

การพัฒนาชุดทดลองการทำงานของหอระบายความร้อนแบบเหนี่ยวนำ
อากาศชนิดอากาศและน้ำไหลสวนทาง

DEVELOPMENT OF INDUCED DRAFT COUNTER FLOW COOLING TOWER
TEST SET



ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

การพัฒนาชุดทดลองการทำงานของหอระบายความร้อนแบบเหนี่ยวนำ
อากาศชนิดอากาศและน้ำไหลสวนทาง
DEVELOPMENT OF INDUCED DRAFT COUNTER FLOW COOLING TOWER
TEST SET



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2556

DEVELOPMENT OF INDUCED DRAFT COUNTER FLOW COOLING TOWER

TEST SET



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2013

ปริญญาโทปีการศึกษา 2556

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การพัฒนาชุดทดลองการทำงานของหอบายความร้อนแบบเหนี่ยวนำอากาศชนิดอากาศ
และน้ำไหลสวนทาง

DEVELOPMENT OF INDUCED DRAFT COUNTER FLOW COOLING TOWER
TEST SET

ผู้จัดทำ

1. นายรมชิต สุวรรณชิต รหัส 53011329
2. นางสาวรัตนภรณ์ สมีแจ่ม รหัส 53011361
3. นางสาวอภิญญา ทรัพย์เย็น รหัส 53011861



(ผศ.ดร. มนต์ศักดิ์ พิมสาร)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนาชุดทดลองการทำงานของหระบายความร้อนแบบเหนี่ยวนำอากาศชนิดอากาศและน้ำไหล

สวนทาง

นายรณชิต สุวรรณชิต 53011329

นางสาวรัตนภรณ์ สมิแจ็ง 53011361

นางสาวอภิญญา ทรัพย์เย็น 53011861

ผศ.ดร. มนต์ศักดิ์ พิมสาร อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2556

บทคัดย่อ

หระบายความร้อน (Cooling Tower) เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่อาศัยหลักการการระเหยของน้ำโดยทำให้น้ำที่มีอุณหภูมิสูงสามารถถ่ายเทความร้อนไปสู่อากาศ ซึ่งนำไปใช้ในการระบายความร้อนของน้ำที่ได้รับความร้อนมาจากกระบวนการทางอุตสาหกรรม โครงการนี้ได้ทำการออกแบบชุดทดลองหระบายความร้อนขนาด 2 กิโลวัตต์ เพื่อใช้เป็นชุดทดลองของห้องปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ชุดทดลองนี้สามารถปรับอัตราการไหลของน้ำไหลเวียนได้จาก 2 ลิตรต่อนาที ถึง 6 ลิตรต่อนาที นอกจากนี้ยังได้ทำการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้คำนวณขีดความสามารถของหระบายความร้อนตามมาตรฐาน CTI ATC-105

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF INDUCED DRAFT COUNTER FLOW COOLING TOWER

LABORATORY TEST

RONNACHIT SUWANNACHIT 53011329

RATTANAPORN SAMEEJAENG 53011361

APINYA SUPYEN 53011861

MONSAK PIMSARN Adviser

Year 2013

Abstract

Cooling Tower is a heat exchange device that relies on the principle of evaporation with allowing hot temperature water to transfer heat to the air. Cooling tower is normally used for cooling heated water from machine or thermal system in manufacturing and power plant, etc. This project is aimed to design a 2 kW of cooling tower prototype that can be used as a test set in Mechanical Engineering Department laboratory. The cooling water for this cooling tower can be varied from 2 l/min to 6 l/min. Moreover, the computer program of cooling tower capability evaluation, followed CTI ATC-105 standard was also developed.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยความเอาใจใส่ แนะนำ และให้คำปรึกษาเป็นอย่างดีจาก ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ ตลอดจนคณาจารย์ทุกท่านที่คอยให้ความรู้และให้คำแนะนำในเรื่องต่างๆ รวมไปถึงเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่านที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ ให้ความอนุเคราะห์ในการยืมอุปกรณ์ต่างๆ และบริษัท เหลียงชิ อุตสาหกรรม (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้การอนุเคราะห์มอบแผงขยายฟิล์มน้ำเพื่อใช้ในการทดลอง คณะจัดทำรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านทั้งหลาย และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง อีกทั้งขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์ สำหรับคำแนะนำเพิ่มเติมทำให้ปริญญานิพนธ์มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น และขอขอบคุณเพื่อนๆ นักศึกษาทุกท่านที่คอยช่วยเหลือ ทั้งร่างกาย แรงใจ และคอยแนะนำข้อมูลดีๆอย่างเต็มที่

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวอันเป็นที่เคารพรักรักซึ่งได้เลี้ยงดูพร้อมทั้งให้โอกาสทางการศึกษาอย่างเต็มที่และคอยให้กำลังใจเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่ได้ให้การสนับสนุนในการทำปริญญานิพนธ์ในครั้งนี้ คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ คณะผู้จัดทำขอบอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน ขออำนาจคุณพระศรีรัตนตรัยอำนวยการความสุขสวัสดิ์จงมีแต่ทุกท่าน

นายรณชิต สุวรรณชิต

นางสาวรัตนภรณ์ สมิแจ้

นางสาวอภิญา ทรัพย์เย็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษา	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ทฤษฎีของอากาศชั้น	3
2.2 ทฤษฎีพื้นฐานของหอระบายความร้อน	6
บทที่ 3 การคำนวณและการออกแบบ	16
3.1 การคำนวณการออกแบบหอระบายความร้อน	16
3.2 การคำนวณขีดความสามารถของหอระบายความร้อน	26
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง	41
3.4 ชุดทดลอง	49
3.5 ขั้นตอนการทดลอง	50
บทที่ 4 ผลการทดลอง	54
4.1 ข้อมูลผลการทดลอง	54
4.2 คำนวณสมรรถนะของหอระบายความร้อนในแต่ละอัตราการไหลของน้ำ	57
4.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	73
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	75
5.1 สรุปผลการทดลอง	75
5.2 ข้อเสนอแนะ	75
5.3 ข้อจำกัดของงานวิจัย	77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่น การค้า
ไม่ว่ากรณี เอกสารอ้างอิง ทั้งหมดนี้ให้คำแปลเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก	79
ภาคผนวก ก ตารางที่ใช้ในการคำนวณ	80
ภาคผนวก ข ภาพฉายและการกำหนดขนาดของหอระบายความร้อน	90
ภาคผนวก ค โครงสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์	92
ภาคผนวก ง เอกสารประกอบการทดลอง	97



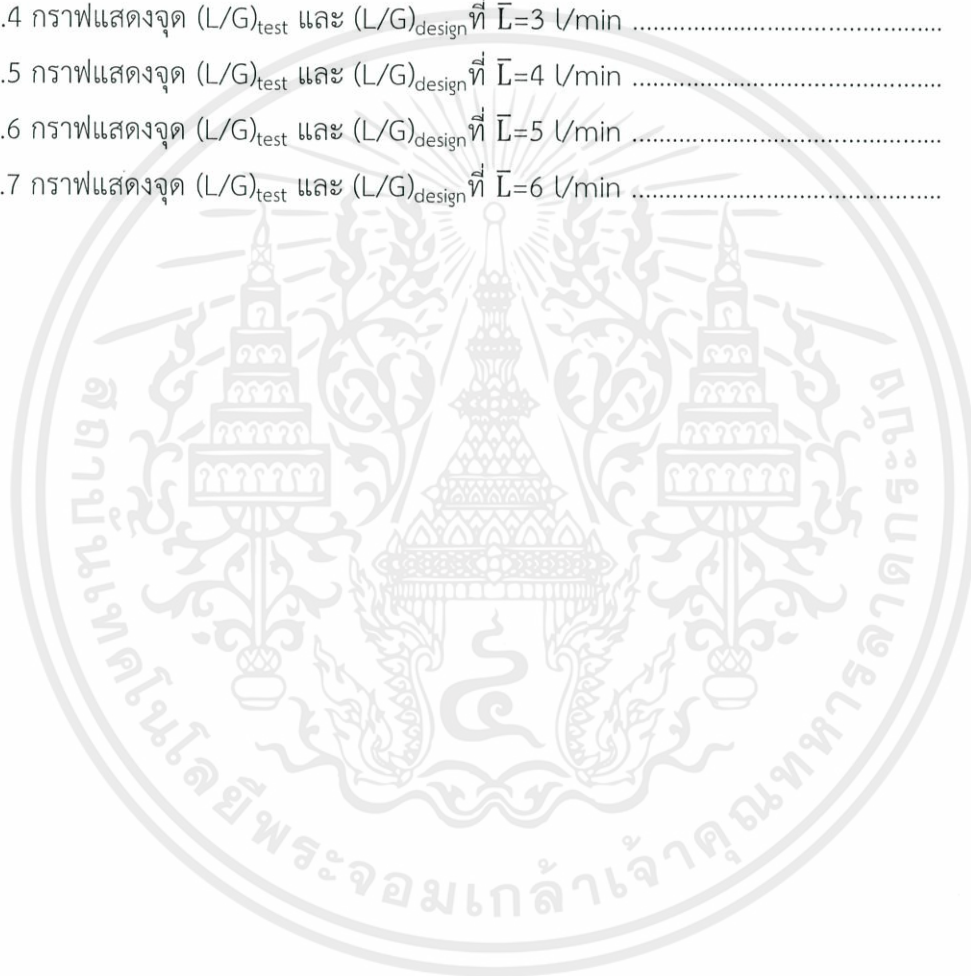
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบของหอระบายความร้อนแบบเหนี่ยวนำอากาศชนิดอากาศและน้ำไหลสวนทาง	7
2.2 การถ่ายโอนความร้อนข้ามผิวร่วมระหว่างน้ำกับอากาศเมื่ออุณหภูมิของน้ำสูงกว่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศ	8
2.3 การถ่ายโอนความร้อนข้ามผิวร่วมระหว่างน้ำกับอากาศเมื่ออุณหภูมิของน้ำต่ำกว่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศ	9
2.4 การวิเคราะห์สมดุลของการถ่ายโอนความร้อนระหว่างน้ำร้อนและอากาศของหอระบายความร้อนแบบเหนี่ยวนำอากาศชนิดอากาศและน้ำไหลสวนทาง	11
2.5 ตำแหน่งพิจารณาค่าของ y 4 ตำแหน่ง ตามวิธีเซบายเซฟฟ์	13
3.1 ทิศทางการไหลของน้ำและอากาศ	16
3.2 แผนภูมิไซโครเมตริก	17
3.3 แผนภาพไซโครเมตริก.....	18
3.4 หน้าต่างโปรแกรมการคำนวณ.....	29
3.5 เส้นคุณลักษณะเฉพาะของหอระบายความร้อน	31
3.6 เส้นแอฟโพรช	39
3.7 การหาจุดออกแบบ (design point) ของหอระบายความร้อน	40
3.8 ถังรองน้ำ	41
3.9 วาล์วปรับอัตราการไหล	42
3.10 โรตاميเตอร์	42
3.11 ขนาดของโรตاميเตอร์	43
3.12 ป้อนน้ำ	44
3.13 หัวฉีด	44
3.14 ฮีตเตอร์	45
3.15 แผงขยายฟิล์มน้ำ	45
3.16 โซลิตสเททรีเลย์	46
3.17 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ	46
3.18 PT100 Temperature Sensor RTD	47
3.19 Automatic switching function of 5 point temperature indicator.....	48
3.20 ชุดทดลองจำลองการทำงานของหอระบายความร้อน.....	49
3.21 ชุดอุปกรณ์ควบคุม.....	50

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.22 แสดงตำแหน่งการวัดความเร็วของอากาศทางออก	51
4.1 แสดงตำแหน่งการวัดความเร็วของอากาศทางออก	54
4.2 กราฟลักษณะเฉพาะและกราฟแอฟโพรชของค่าออกแบบ	57
4.3 กราฟแสดงจุด $(L/G)_{test}$ และ $(L/G)_{design}$ ที่ $\bar{L}=2$ l/min	60
4.4 กราฟแสดงจุด $(L/G)_{test}$ และ $(L/G)_{design}$ ที่ $\bar{L}=3$ l/min	63
4.5 กราฟแสดงจุด $(L/G)_{test}$ และ $(L/G)_{design}$ ที่ $\bar{L}=4$ l/min	66
4.6 กราฟแสดงจุด $(L/G)_{test}$ และ $(L/G)_{design}$ ที่ $\bar{L}=5$ l/min	69
4.7 กราฟแสดงจุด $(L/G)_{test}$ และ $(L/G)_{design}$ ที่ $\bar{L}=6$ l/min	72



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การคำนวณค่า $\frac{1}{\Delta h_A}$, $\frac{1}{\Delta h_B}$, $\frac{1}{\Delta h_C}$ และ $\frac{1}{\Delta h_D}$ ตามวิธีของเซบายเซฟฟ์	14
3.1 การคำนวณค่า $1/\Delta h$ ของค่าออกแบบ ตามวิธีของเซบายเซฟฟ์	29
3.2 ค่า KaV/L ที่ L/G ตั้งแต่ 20 – 120 %	31
3.3 การคำนวณค่า $1/\Delta h$ ที่ $L/G = 0.575$ ตามวิธีของเซบายเซฟฟ์	32
3.4 การคำนวณค่า $1/\Delta h$ ที่ $L/G = 0.527$ ตามวิธีของเซบายเซฟฟ์	33
3.5 การคำนวณค่า $1/\Delta h$ ที่ $L/G = 0.431$ ตามวิธีของเซบายเซฟฟ์	34
3.6 การคำนวณค่า $1/\Delta h$ ที่ $L/G = 0.383$ ตามวิธีของเซบายเซฟฟ์	35
3.7 การคำนวณค่า $1/\Delta h$ ที่ $L/G = 0.287$ ตามวิธีของเซบายเซฟฟ์	36
3.8 การคำนวณค่า $1/\Delta h$ ที่ $L/G = 0.192$ ตามวิธีของเซบายเซฟฟ์	37
3.9 การคำนวณค่า $1/\Delta h$ ที่ $L/G = 0.096$ ตามวิธีของเซบายเซฟฟ์	38
3.10 ค่า KaV/L ที่ L/G ตั้งแต่ 20-120% โดยวิธีเซบายเซฟฟ์	39
3.11 The Installation Size of LZM Series.....	43
3.12 Specification of LZM Series	43
3.13 Specification of Pump	44
3.14 Specification of PT100 Temperature Sensor RTD	47
4.1 ตารางบันทึกข้อมูลการทดลอง	55
4.2 ข้อมูลผลการทดลองครั้งที่ 1	55
4.3 ข้อมูลผลการทดลองครั้งที่ 2	55
4.4 ข้อมูลผลการทดลองครั้งที่ 3	56
4.5 ข้อมูลผลการทดลองครั้งที่ 4	56
4.6 ข้อมูลผลการทดลองครั้งที่ 5	56
4.7 คำนวณค่า $1/\Delta h$ ตามวิธีของเซบายเซฟฟ์เมื่ออัตราการไหลของน้ำ 2 l/min	58
4.8 ค่า $(KaV/L)_{test}$ ที่ $(L/G)_{test}$ ค่าต่างๆ	59
4.9 คำนวณค่า $1/\Delta h$ ตามวิธีของเซบายเซฟฟ์เมื่ออัตราการไหลของน้ำ 3 l/min	61
4.10 ค่า $(KaV/L)_{test}$ ที่ $(L/G)_{test}$ ค่าต่างๆ	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.11 คำนวณค่า $1/\Delta h$ ตามวิธีของทีเซบายเซฟฟ์เมื่ออัตราการไหลของน้ำ 4 l/min.....	64
4.12 แสดงค่า $(KaV/L)_{test}$ ที่ $(L/G)_{test}$ ค่าต่างๆ	65
4.13 คำนวณค่า $1/\Delta h$ ตามวิธีของเซบายเซฟฟ์เมื่ออัตราการไหลของน้ำ 5 l/min	67
4.14 ค่า $(KaV/L)_{test}$ ที่ $(L/G)_{test}$ ค่าต่างๆ	68
4.15 คำนวณค่า $1/\Delta h$ ตามวิธีของเซบายเซฟฟ์เมื่ออัตราการไหลของน้ำ 6 l/min	70
4.16 ค่า $(KaV/L)_{test}$ ที่ $(L/G)_{test}$ ค่าต่างๆ	71



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์ที่ใช้ในปฏิญานิพนธ์

- A = พื้นที่หน้าตัดของแผงขยายฟิล์มน้ำ (m^2)
 C_L = ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ มีค่าเท่ากับ $1 \text{ kcal /kg } ^\circ\text{C}$
 $C_{p, a}$ = ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศชื้น ($\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$)
 $C_{p, da}$ = ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศแห้ง ($\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$)
 $C_{p, v}$ = ความจุความร้อนจำเพาะของไอน้ำ ($\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$)
 F = ตัวประกอบค่าแก้ไขสำหรับหอระบายความร้อน
 $F=1.0$ สำหรับหอระบายความร้อนชนิดอากาศและน้ำไหลสวนทาง
 $F<1.0$ สำหรับหอระบายความร้อนชนิดอากาศและน้ำไหลขวาง
 G = อัตราการไหลของอากาศผ่านแผงขยายฟิล์มน้ำ (kg/s)
 G' = ภาระการใช้อากาศ ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$)
 H = ความสูงของแผงขยายฟิล์มน้ำ (m)
 h_1 = เอนทัลปีของอากาศอิมตัวที่อุณหภูมิกระเปาะเปียกที่อากาศทางเข้า (kJ/kg)
 h_2 = เอนทัลปีของอากาศอิมตัวที่อุณหภูมิกระเปาะเปียกที่อากาศทางออก (kJ/kg)
 h_a = เอนทัลปีของอากาศชื้น (kJ/kg)
 h_{da} = เอนทัลปีของอากาศแห้ง (kJ/kg)
 h_{LG} = เอนทัลปีของการเปลี่ยนจากน้ำไปเป็นไอน้ำ (kJ/kg)
 h_{lm} = ผลต่างของเอนทัลปีแบบลอการิทึม (kJ/kg)
 h_m = เอนทัลปีเฉลี่ย (kJ/kg)
 K = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$)
 K_a = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเชิงปริมาตร ($\text{kg/m}^3 \cdot \text{s}$ ต่อผลต่างเอนทัลปี 1 หน่วย)
 $K_{aV/L}$ = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเชิงปริมาตรในรูปไร้มิติ
 K_g = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลผ่านแผงขยายฟิล์มน้ำ ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$)
 K_T = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ ต่อผลต่างของเอนทัลปี 1 หน่วย)
 L = อัตราการไหลของน้ำผ่านแผงขยายฟิล์มน้ำ (kg/s)
 \bar{L} = อัตราการไหลของน้ำผ่านแผงขยายฟิล์มน้ำ (l/min)
 L' = ภาระการใช้น้ำ ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$)
 L/G = อัตราส่วนของอัตราการไหลระหว่างน้ำและอากาศ
 l = ความสูงของแผงขยายฟิล์มน้ำที่ได้จากการคำนวณ (m) อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณี l_{max} ใดก็ตาม = ความสูงของแผงขยายฟิล์มน้ำสูงสุด (m) อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 l_{set} = ความสูงของแผงขยายฟิล์มน้ำที่กำหนดขึ้น (m)

- m_{da} = มวลของอากาศแห้ง (kg)
 m_g = ปริมาณความชื้นมากที่สุดที่มีอยู่ได้ในอากาศที่อุณหภูมิเดียวกัน (kg)
 m_v = มวลของไอน้ำ (ปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในอากาศ) (kg)
 P_{atm} = ความดันบรรยากาศ (kPa)
 P_{da} = ความดันย่อยของอากาศแห้ง (kPa)
 P_v = ความดันย่อยของไอน้ำ (kPa)
 ΔP = ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้น (mmH₂O)
 Q = ภาระความร้อน (cooling load) (kW)
 Q_L = ความร้อนแฝง (kW)
 Q_S = ความร้อนสัมผัส (kW)
 Q_T = ปริมาณความร้อนทั้งหมดที่ถ่ายเทผ่านผิวรวมออกสู่อากาศ (kW)
 R = ค่าคงตัวของแก๊ส มีค่า 287 J/kg·K
 T_0 = อุณหภูมิอ้างอิง (°C)
 T_1 = อุณหภูมิของน้ำที่ทางเข้าหอบายความร้อน (°C)
 T_2 = อุณหภูมิของน้ำที่ทางออกหอบายความร้อน (°C)
 T_a = อุณหภูมิของอากาศ (°C)
 T_{ai} = อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าหอบายความร้อน (°C)
 T_{db} = อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (°C)
 T_s = อุณหภูมิที่ผิวรวมระหว่างน้ำและอากาศ (°C)
 T_w = อุณหภูมิของน้ำ (°C)
 T_{wb} = อุณหภูมิกระเปาะเปียก (°C)
 $(T_{wb})_{ai}$ = อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศที่ทางเข้าหอบายความร้อน (°C)
 V = ปริมาตรของแผงขยายฟิล์มน้ำ (m³)
 $V_{p, act}$ = ความเร็วอากาศผ่านแผงขยายฟิล์มน้ำจริง (m/s)
 Z = ความสูงที่ระดับน้ำทะเล (m)
 z = ความสูงของแผงขยายฟิล์มน้ำ (m)
%RH = ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ (%)
 α = ตัวประกอบรูปร่างของการนำความร้อน (kJ/kg dry air)
 γ = ค่าความร้อนแฝงของการระเหยของน้ำ (kJ/kg)
 ρ_{ai} = ความหนาแน่นของอากาศที่ทางเข้าหอบายความร้อน (kg/m³)
 V = อัตราการไหลเชิงปริมาตร (m³/s)
 \emptyset = อัตราส่วนความชื้น
 \dot{m}_a = อัตราการไหลโดยมวลของอากาศ (kg/s)

m_w = อัตราการไหลโดยมวลของน้ำ (kg/s)

ω = ความชื้นสัมบูรณ์ (kg water vapor/kg dry air)

ω_a = ความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศ (kg water vapor/kg dry air)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

หอระบายความร้อนเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยอาศัยหลักการการระเหยของน้ำหล่อเย็น ซึ่งน้ำหล่อเย็นส่วนหนึ่งจะสูญเสียไประหว่างกระบวนการ และน้ำส่วนใหญ่สามารถนำกลับมาเข้าสู่ระบบได้อีก โดยส่วนใหญ่หอระบายความร้อนถูกนำไปใช้ระบายความร้อนของอุปกรณ์ความร้อนต่างๆในระบบความร้อนของภาคอุตสาหกรรม รวมถึงการระบายความร้อนในระบบปรับอากาศ ซึ่งหอระบายความร้อนจัดว่าเป็นอุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ทำหน้าที่ลดอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นอุณหภูมิสูงให้เหลืออุณหภูมิต่ำที่เหมาะสม การออกแบบหอระบายความร้อนต้องอาศัยหลักการทางอุณหพลศาสตร์และกลศาสตร์ของไหล เพื่อกำหนดหาสมรรถนะและขนาดของหอระบายความร้อนที่เหมาะสมกับการใช้งาน

การศึกษากระบวนการทำงานของหอระบายความร้อนเป็นเรื่องที่ทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากหอระบายความร้อนจะถูกติดตั้งไว้ในโรงงานอุตสาหกรรมและโรงไฟฟ้าเป็นส่วนใหญ่ซึ่งยากต่อการเข้าไปศึกษาทำความเข้าใจกระบวนการทำงานต่างๆ เนื่องด้วยปัญหาเรื่องความปลอดภัยและปัจจัยหลายๆด้าน ด้วยเหตุนี้เราจึงมีแนวคิดที่จะสร้างชุดทดลองเพื่อจำลองกระบวนการทำงานของหอระบายความร้อนและใช้เป็นสื่อการเรียนการสอนในห้องปฏิบัติการต่อไป การออกแบบหอระบายความร้อนนี้ เน้นออกแบบให้มีขนาดเล็กเหมาะสำหรับทำการทดลองเพื่อศึกษากระบวนการทำงานของหอระบายความร้อน หากมีการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่างๆที่สำคัญ เช่น อัตราการไหลของน้ำ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิไปในแต่ละสภาวะ นำไปสู่การเปรียบเทียบการทำงานและประสิทธิภาพของหอระบายความร้อนในสภาวะที่แตกต่างกัน ทำให้ผู้ที่ศึกษามีความเข้าใจถึงกลไกการทำงานของหอระบายความร้อนและปรากฏการณ์ต่างๆที่เกิดขึ้น สามารถนำความรู้จากการศึกษาทดลองไปประยุกต์ใช้สำหรับการออกแบบและวิเคราะห์หอระบายความร้อนจริงในภาคอุตสาหกรรมที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาวิธีการทำงานของหอระบายความร้อนแบบอากาศหมุนเวียนด้วยแรงกล
2. ออกแบบและสร้างชุดทดลองหอระบายความร้อนแบบเหนี่ยวนำอากาศชนิดอากาศและน้ำไหลสวนทางกัน ที่สามารถปรับค่าอัตราการไหลของน้ำได้
3. จัดทำเอกสารประกอบการทดลองหอระบายความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการคำนวณขีดความสามารถของหอระบายความร้อน

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

- สร้างชุดทดลองจำลองหลักการทำงานของหอระบายความร้อนแบบเหนี่ยวนำอากาศชนิดอากาศและน้ำไหลสวนทาง (Inducted Draft Counter Flow Cooling Tower)
- หอระบายความร้อนขนาด 2 kW
- สามารถปรับอัตราการไหลของน้ำได้จาก 2 ลิตรต่อนาที ถึง 6 ลิตรต่อนาที

1.4 ขั้นตอนการศึกษา

- ศึกษาและทำความเข้าใจหลักการ ทฤษฎี ส่วนประกอบและระบบการทำงานของหอระบายความร้อน
- ศึกษาและดำเนินการการออกแบบชุดทดลองการทำงานของหอระบายความร้อน
- ศึกษาและพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์วิเคราะห์ขีดความสามารถของหอระบายความร้อน
- ดำเนินการจัดหาอุปกรณ์และทำการสร้างชุดทดลองหอระบายความร้อน
- ทำการทดสอบการทำงานของชุดทดลองหอระบายความร้อน ว่าทำงานได้ตามสมรรถนะที่ได้วิเคราะห์ไว้ในขั้นต้นหรือไม่ พร้อมทั้งจัดทำเอกสารประกอบการศึกษาและทดลอง
- ดำเนินการปรับปรุงและแก้ไขระบบ หากระบบการทำงานมีความบกพร่อง
- บันทึกผลการทดลองและปัญหาที่เกิดขึ้นเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาชุดทดลองหอระบายความร้อน ต่อไป

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- สามารถนำความรู้ความเข้าใจที่เกี่ยวกับหอระบายความร้อนนั้นไปประยุกต์ใช้ในระบบอุตสาหกรรมที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นได้และสามารถนำไปประยุกต์เป็นสื่อการเรียนรู้ให้แก่ผู้ที่สนใจได้
- ได้ชุดการทดลองสาธิตการทำงานของหอระบายความร้อนที่สามารถนำมาใช้ในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สเรียนวิชาการทดลองทางวิศวกรรมเครื่องกลของภาควิชาได้ ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีของอากาศชื้น

2.1.1 อากาศแห้งและอากาศบรรยากาศ

อากาศ คือ ของผสมระหว่างไนโตรเจน ออกซิเจน และแก๊สอื่นๆในปริมาณเล็กน้อย โดยทั่วไปอากาศในบรรยากาศมักจะมีไอน้ำหรือความชื้นรวมอยู่ด้วย เรียกว่า อากาศบรรยากาศ (atmospheric air) ส่วนอากาศที่ไม่มีไอน้ำอยู่ เรียกว่า อากาศแห้ง (dry air) การวิเคราะห์อากาศ จะเป็นการวิเคราะห์ของผสมระหว่างไอน้ำและอากาศแห้ง มวลของอากาศแห้งมีองค์ประกอบคงที่ แต่ปริมาณของไอน้ำจะมีการเปลี่ยนแปลง โดยเกิดจากการควบแน่นและการระเหยของน้ำในมหาสมุทร ทะเลสาบ แม่น้ำ รวมถึงร่างกายมนุษย์

2.1.2 ความดันบรรยากาศ

การวิเคราะห์อากาศบรรยากาศสามารถพิจารณาพฤติกรรมของอากาศเป็นแก๊สอุดมคติได้ ดังนั้นความดันของอากาศบรรยากาศ (P) จะเท่ากับผลรวมของ ความดันย่อยของอากาศแห้ง (P_{da}) และความดันย่อยของไอน้ำ (P_v) เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$P = P_{da} + P_v \quad (2.1)$$

2.1.3 ความชื้นสัมบูรณ์และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ

ความชื้นสัมบูรณ์ (absolute humidity) คือ จำนวนมวลของไอน้ำที่มีอยู่ในหนึ่งหน่วยมวลของอากาศแห้ง มีหน่วยเป็น kg water vapor/kg dry air บางครั้งอาจเรียกว่า ความชื้นจำเพาะ (specific humidity) หรือ อัตราส่วนความชื้น (humidity ratio) กำหนดด้วยสัญลักษณ์ ω

$$\omega = \frac{m_v}{m_{da}} \quad (2.2)$$

จากสูตรของแก๊สอุดมคติ $PV = mRT$ จะได้ $m_v = \frac{P_v V}{R_v T}$ และ $m_{da} = \frac{P_{da} V}{R_{da} T}$ แทนค่าในสมการ(2) จะได้

$$\omega = \frac{m_v}{m_{da}} = \frac{P_v V / R_v T}{P_{da} V / R_{da} T} = \frac{P_v / R_v}{P_{da} / R_{da}} = 0.622 \frac{P_v}{P_{da}}$$

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และแทนค่า P_{da} จากสมการที่ (2.1) จะได้

$$\omega = 0.622 \frac{P_v}{P - P_v} \quad (2.3)$$

อากาศแห้งที่ไม่มีไอน้ำเป็นองค์ประกอบ จะมีความชื้นสัมบูรณ์เท่ากับ 0 หากเพิ่มไอน้ำหรือความชื้นให้กับอากาศแห้งดังกล่าว พบว่าความชื้นสัมพัทธ์จะเพิ่มขึ้น และถ้าเพิ่มไอน้ำต่อไปจนกระทั่งอากาศไม่สามารถรับไอน้ำได้อีกต่อไป แสดงว่าอากาศได้รับไอน้ำในปริมาณสูงสุดและอยู่ในสภาวะอิ่มตัวด้วยความชื้น เรียกอากาศที่สภาวะนี้ว่า อากาศอิ่มตัว (saturated air)

ความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity) คือ ปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในอากาศ (m_v) เทียบกับปริมาณความชื้นมากที่สุดที่จะมีอยู่ได้ในอากาศที่อุณหภูมิเดียวกัน (m_g) เขียนสมการได้

$$\phi = \frac{m_v}{m_g} = \frac{P_v V / R_v T}{P_g V / R_g T} = \frac{P_v}{P_g} \quad (2.4)$$

จากสมการที่ (2.3) และ (2.4) สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง ω และ ϕ ได้ดังนี้

$$\phi = \frac{\omega P}{(0.622 + \omega) P_g} \quad (2.5)$$

และ

$$\omega = \frac{0.622 \phi P_g}{P - \phi P_g} \quad (2.6)$$

ความชื้นสัมพัทธ์มีค่าตั้งแต่ 0% สำหรับอากาศแห้ง และ 100% สำหรับอากาศอิ่มตัว ปริมาณความชื้นที่สามารถมีอยู่ได้ในอากาศจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอากาศ ดังนั้น ความชื้นสัมพัทธ์จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิแม้ว่าความชื้นสัมบูรณ์จะมีค่าคงที่ก็ตาม

2.1.4 อุณหภูมิจุดน้ำค้าง

อุณหภูมิจุดน้ำค้าง (dew-point temperature, T_{dp}) คือ อุณหภูมิที่เริ่มมีการควบแน่นเกิดขึ้นเมื่ออากาศถูกทำให้เย็นตัวลงที่ความดันคงที่ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง คือ อุณหภูมิอิ่มตัวของน้ำที่ความดันไอของน้ำนั่นเอง กระบวนการจะดำเนินไปตามแนวเส้นของความชื้นสัมพัทธ์ 100% อุณหภูมิอิ่มตัวและอุณหภูมิจุดน้ำค้างของอากาศอิ่มตัว คือจุดเดียวกัน ที่สภาวะนี้ค่า $T_{dp} = T_{wb} = T_{db}$ ซึ่งอุณหภูมินี้แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงความร้อนแฝง

2.1.5 อุณหภูมิกระเปาะแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (dry-bulb temperature, T_{db}) คือ อุณหภูมิของอากาศที่อ่านจากเทอร์โมมิเตอร์ธรรมดา เป็นการวัดความร้อนสัมผัส (sensible heat) คือ ปริมาณความร้อนที่ทำให้

สสารที่อุณหภูมิเปลี่ยนไป แต่ยังคงสถานะเดิม การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกระเปาะแห้งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของความร้อนสัมผัส

2.1.6 อุณหภูมิกระเปาะเปียก

อุณหภูมิกระเปาะเปียก (wet-bulb temperature, T_{wb}) คือ อุณหภูมิของอากาศที่อ่านจากเทอร์โมมิเตอร์ที่กระเปาะหุ้มด้วยสำลีหรือไส้ตะเกียงที่ชุ่มน้ำ และทำการหมุนไปในอากาศ ซึ่งอุณหภูมินี้จะแสดงถึงค่าความร้อนรวม (ความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝง)

2.1.7 ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศชื้น

ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศชื้น คือ ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการทำให้อากาศชื้นต่อหนึ่งหน่วยมวลของอากาศแห้ง มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 หน่วยที่ความดันคงที่ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$C_{p,a} = C_{p,da} + \omega_a C_{p,v} \quad (2.7)$$

2.1.8 เอนทัลปีของอากาศชื้น

เอนทัลปีของอากาศชื้น คือ ผลรวมของเอนทัลปีของอากาศแห้ง (h_{da}) และเอนทัลปีของไอน้ำในอากาศชื้นนั้น (h_v) ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$h_a = h_{da} + \omega_a h_v \quad (2.8)$$

สำหรับ h_{da} และ h_v เป็นค่าอ้างอิงที่อุณหภูมิ T_0 เท่ากับ 0 องศาเซลเซียส จะได้

$$h_{da} = C_{p,da}(T_a - T_0)$$

$$h_v = C_{p,v}(T_a - T_0) + h_{LG}$$

ดังนั้น

$$h_a = C_{p,da} + \omega_a C_{p,v} (T_a - T_0) + \omega_a h_{LG}$$

$$h_a = C_{p,a}(T_a - T_0) + \omega_a h_{LG} \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ทฤษฎีพื้นฐานของหอระบายความร้อน

2.2.1 หลักการทำงาน

มนตรี[4] หอระบายความร้อนเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับระบายความร้อนออกจากน้ำที่มีอุณหภูมิสูงในระบบทำความเย็นหรือในกระบวนการผลิต ทำให้อุณหภูมิของน้ำลดลงและสามารถนำกลับไปใช้หมุนเวียนในระบบได้อีก การระบายความร้อนจะอาศัยการถ่ายเทความร้อนจากน้ำสู่อากาศ และจะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิของน้ำสูงกว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศ ซึ่งกลไกการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในหอระบายความร้อน ได้แก่ การถ่ายเทความร้อนสัมผัส (sensible heat) จากน้ำสู่อากาศ และการถ่ายเทความร้อนแฝง (latent heat) จากการระเหยของน้ำบางส่วนออกจากน้ำไหลเวียน ดังนั้นการคำนวณการถ่ายเทความร้อนในหอระบายความร้อนจึงต้องอาศัยการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลไปพร้อมกัน

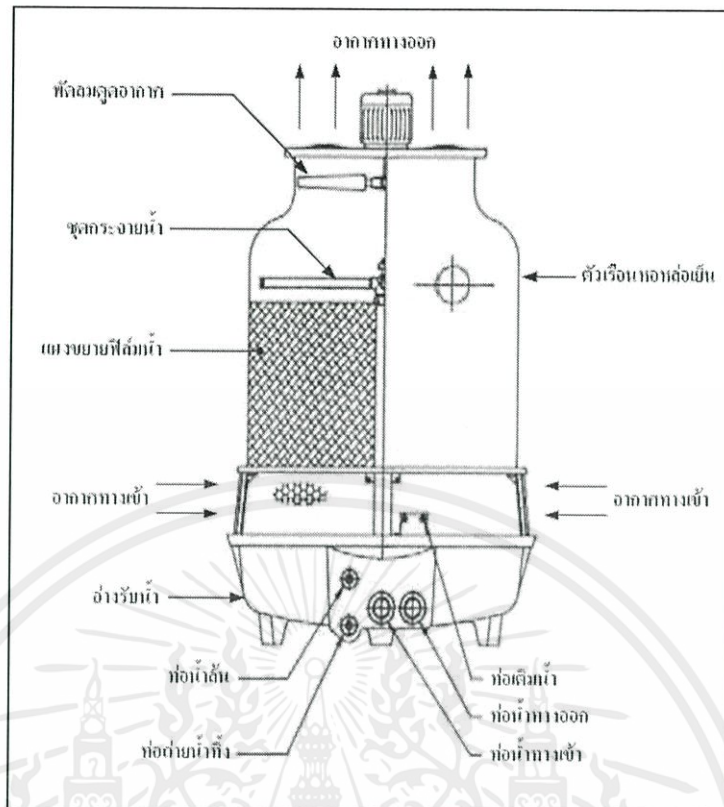
หอระบายความร้อนชนิดอากาศและน้ำไหลสวนทาง อากาศจะถูกดูดขึ้นและแทรกตัวผ่านแผงขยายฟิล์มน้ำ (packing) ไปสัมผัสกับฟิล์มน้ำที่ถูกกระจายออกเต็มแผงขยายฟิล์มนั้นและเคลื่อนที่ลงมาด้านล่างของตัวหอระบายความร้อน การระเหยของน้ำจะเกิดขึ้นที่ฟิล์มน้ำร้อนบนแผงขยายฟิล์ม ทำให้น้ำสูญเสียความร้อนแฝงและเย็นตัวลงในที่สุด

หอระบายความร้อนชนิดอากาศและน้ำไหลขวาง น้ำจะไหลผ่านหัวฉีดจากด้านบนลงสู่ด้านล่างผ่านแผงขยายฟิล์มและอากาศจะไหลมาตามแนวระดับผ่านแผงขยายฟิล์มและแผงกันกระเซ็น แล้วไหลออกทางด้านบนของหอระบายความร้อน

การถ่ายเทความร้อนจากน้ำร้อนสู่อากาศจะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิของน้ำร้อนสูงกว่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศและการระเหยของไอน้ำออกจากผิวร่วมระหว่างน้ำและอากาศ จะเกิดขึ้นเสมอเมื่ออัตราส่วนของความชื้นของอากาศอิ่มตัวมีค่าสูงกว่าอัตราส่วนความชื้นของอากาศ ดังนั้นถ้าอากาศไม่อิ่มตัวไหลผ่านแผงขยายฟิล์ม น้ำจะระเหยไปในอากาศนั้น ทำให้อากาศมีความชื้นเพิ่มขึ้น ความร้อนแฝงของการระเหยของน้ำจะถูกดึงออกมาจากน้ำที่มีอุณหภูมิสูงและถ่ายเทสู่อากาศ

โดยปกติหอระบายความร้อนชนิดไหลสวนทางน้ำร้อนจะไหลเข้าด้านบนของแผงขยายฟิล์มและไหลลงสู่ด้านล่างของแผงขยายฟิล์ม จึงทำให้อุณหภูมิของน้ำลดลงเรื่อยๆเมื่อไหลลงสู่ด้านล่าง ในการออกแบบหอระบายความร้อนจึงต้องทำให้น้ำที่ทางออกมีอุณหภูมิลดลงจนเข้าใกล้อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศให้มากที่สุด แต่ในทางปฏิบัติอุณหภูมิของน้ำทางออกแผงขยายฟิล์มจะลดลงไม่ถึงอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศบรรยากาศ ซึ่งขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของหอระบายความร้อนด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



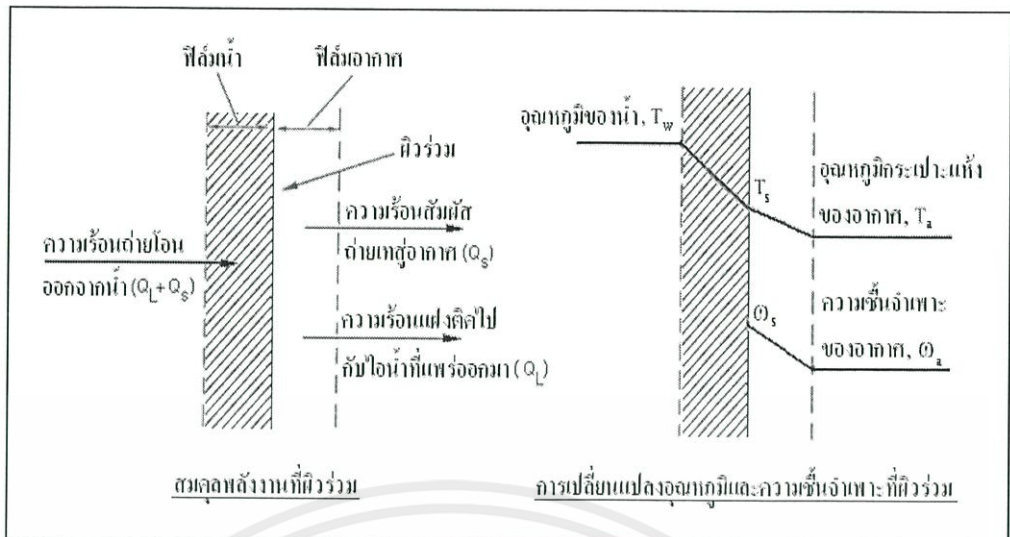
รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของหอระบายความร้อนแบบเหนี่ยวนำอากาศชนิดอากาศและน้ำไหลสวนทาง

สำหรับความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของน้ำทางเข้าหอระบายความร้อนและอุณหภูมิของน้ำทางออกหอระบายความร้อน เรียกว่า เรนจ์ ส่วนความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของน้ำทางออกหอระบายความร้อนและอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศทางเข้าหอระบายความร้อน เรียกว่า แอปโพรช

สาเหตุที่ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวล (การระเหยของน้ำ) คือ ศักย์ขับเคลื่อนความร้อน (driving force) ระหว่างน้ำกับอากาศ ซึ่งเป็นผลมาจาก

1. อุณหภูมิแตกต่างระหว่างน้ำและอากาศ ซึ่งจะใช้อุณหภูมิที่ผิวร่วมและอุณหภูมิกระเปาะแห้ง ในรูปที่ 2.2 ศักย์ขับเคลื่อนความร้อนสัมผัส คือ $(T_s - T_a)$ ทำให้ความร้อนสัมผัส (Q_s) ถ่ายเทจากผิวร่วมสู่อากาศ

2. ความแตกต่างระหว่างความดันไอของอากาศที่ผิวร่วมและความดันไอของอากาศ อาจใช้ผลต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นของอากาศที่ผิวร่วม (ω_s) และอัตราส่วนความชื้นภายนอกผิวร่วม (ω_a) ศักย์ขับเคลื่อนความร้อนคือ $(\omega_s - \omega_a)$ จึงทำให้ความร้อนแฝงติดไปกับไอน้ำที่ระเหยออกมาจากผิวร่วม เอกสาร (Q_D) และเข้าสู่อากาศ ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

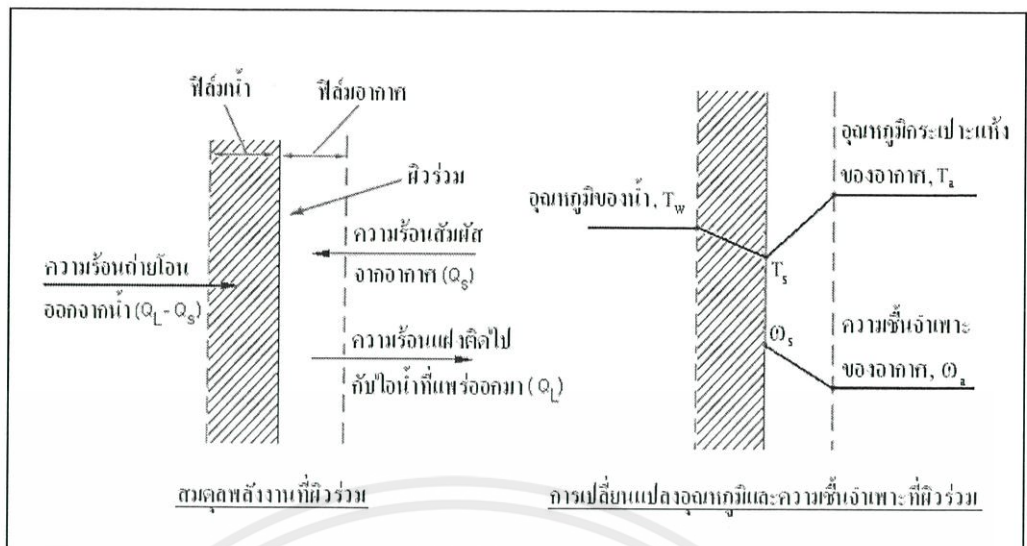


รูปที่ 2.2 การถ่ายโอนความร้อนข้ามผิวร่วมระหว่างน้ำกับอากาศเมื่ออุณหภูมิของน้ำสูงกว่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศ (มนตรี 2544)

การถ่ายเทความร้อนออกจากน้ำสู่อากาศในรูปที่ 2.2 จะเกิดในกรณีที่อุณหภูมิของน้ำสูงกว่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศ ความร้อนที่ถ่ายเทโดยน้ำทั้งหมดคือ ผลรวมระหว่างความร้อนแฝงและความร้อนสัมผัส นั่นคือ $(Q_L + Q_s)$ ลักษณะการถ่ายเทความร้อนในกรณีนี้จะเกิดขึ้นที่บริเวณด้านบนของแผงขยายฟิล์มน้ำ เมื่อน้ำไหลลงสู่ด้านล่างของแผงขยายฟิล์มน้ำจะพบว่าน้ำมีอุณหภูมิลดลงและอาจจะต่ำกว่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศ (แต่ยังสูงกว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศ) ซึ่งการถ่ายเทความร้อนจะแตกต่างไปจากกรณีที่อุณหภูมิของน้ำสูงกว่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศ กล่าวได้ว่า ความร้อนสัมผัสจะถ่ายเทจากอากาศเข้าสู่ผิวร่วมดังรูปที่ 2.3 เนื่องจากอุณหภูมิของอากาศสูงกว่าอุณหภูมิของผิวร่วม

เมื่ออุณหภูมิที่ผิวร่วมสูงกว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศทำให้ ω_s ยังคงมากกว่า ω_a จึงมีการระเหยของน้ำออกจากผิวร่วมสู่อากาศต่อไป และมีความร้อนแฝงติดไปกับไอน้ำ ทิศทางการถ่ายเทของ Q_s และ Q_L จะสวนทางกัน โดยที่ Q_s จะถ่ายเทจากอากาศสู่ผิวร่วมเนื่องจากมีผลต่างของ $(T_a - T_s)$ และ Q_L จะถ่ายเทออกจากผิวร่วมสู่อากาศ เนื่องจากมีผลต่างของ $(\omega_s - \omega_a)$ ดังนั้น ความร้อนที่ถ่ายเทโดยน้ำทั้งหมดมีปริมาณเท่ากับ $(Q_L - Q_s)$ ดังรูปที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 การถ่ายโอนความร้อนข้ามผิวร่วมระหว่างน้ำกับอากาศเมื่ออุณหภูมิของน้ำต่ำกว่าอุณหภูมิระเหยแห้งของอากาศ (มนตรี 2544)

2.2.2 ทฤษฎีและสมการที่ใช้ในการคำนวณ

มนตรี[4]เมื่อน้ำระเหยจะใช้ความร้อนแฝงในการระเหย จึงทำให้อุณหภูมิของน้ำร้อนลดลงองค์ประกอบสำคัญในการทำให้เกิดการระเหยได้ง่ายและรวดเร็ว คือ พื้นที่สัมผัสระหว่างน้ำและอากาศ ระยะเวลาระหว่างการสัมผัสกัน และความเร็วที่สัมพันธ์ต่อกันระหว่างน้ำและอากาศ อย่างไรก็ตามการออกแบบหอระเหยความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูง ควรจะออกแบบให้หอระเหยความร้อนนั้นสามารถทำให้น้ำเย็นที่ได้ออกมามีอุณหภูมิเข้าใกล้อุณหภูมิระเหยเปียกของบรรยากาศให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ ดังนั้น ปริมาณความร้อนทั้งหมดที่ถ่ายเทผ่านผิวร่วมออกสู่อากาศในรูปที่ 2.2 ก็คือผลรวมระหว่างความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝงของการระเหยของไอน้ำที่แพร่เข้าไปในอากาศเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$Q_T = Q_S + Q_L \quad (2.10)$$

ในส่วนของการความร้อนแฝงของการระเหยของไอน้ำจะแปรผันตามพื้นที่ผิวของฟิล์มน้ำร้อน (A) และผลต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นของอากาศที่ผิวร่วม (ω_s) กับอัตราส่วนความชื้นของอากาศบรรยากาศ (ω) ซึ่งปริมาณของไอน้ำที่แพร่ผ่านผิวร่วม หาได้จากสมการ

$$m_w = K_g A (\omega_s - \omega_a) \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้เพื่อประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังสมการ

$$Q_L = \gamma m_v$$

หรือ

$$Q_L = \gamma K_g A (\omega_s - \omega_a) \quad (2.12)$$

ในการพิจารณาปริมาณความร้อนสัมผัสถ่ายเทสู่อากาศ พบได้บริเวณด้านบนของหอระบายความร้อน คำนวณได้จาก

$$Q_s = \alpha A (T_w - T_a) \quad (2.13)$$

ปริมาตรความร้อนทั้งหมดที่ระบายออกจากน้ำร้อนโดยอากาศ คำนวณจากผลรวมของ Q_L ในสมการ (2.12) และ Q_s ในสมการ (2.13)

$$Q_L = \gamma K_g A (\omega_s - \omega_a) + \alpha A (T_w - T_a) \quad (2.14)$$

นอกจากนี้ Merkle ได้เสนอว่า ความร้อนทั้งหมดที่ระบายออกจากน้ำร้อนที่ตำแหน่งหนึ่งในหอระบายความร้อนจะแปรผันตรงกับ

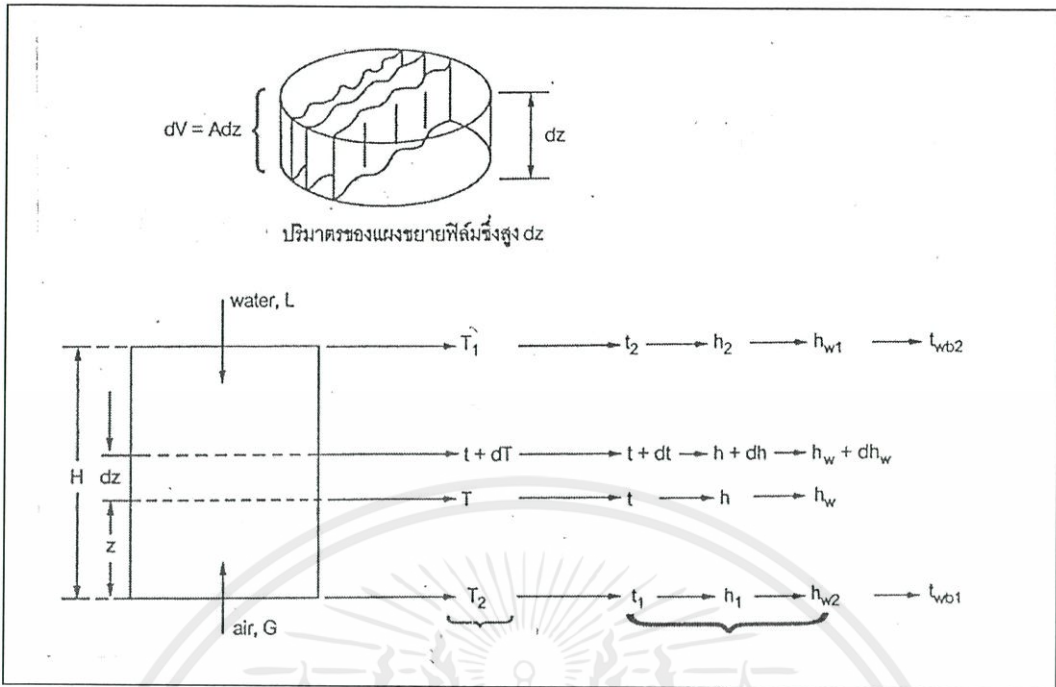
1. ผลต่างของเอนทัลปีของอากาศที่ตำแหน่งนั้น (h_a) กับเอนทัลปีของอากาศอิ่มตัวที่อุณหภูมิของน้ำจุดเดียวกัน (h_w)
2. พื้นที่ผิวของฟิล์มน้ำร้อน (A)

เขียนสมการได้

$$Q_T = K_T A (h_w - h_a) \quad (2.15)$$

เมื่อ K_T คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน มีหน่วย kcal/m² hr ต่อผลต่างของเอนทัลปี 1 หน่วย จะเห็นว่าความร้อนจะหยุดถ่ายโอนเมื่อ h_w มีค่าเท่ากับค่าของ h_a เกิดเมื่อน้ำไหลลงมาตอนล่างของหอหรือเมื่อน้ำร้อนถูกทำให้เย็นลงจนกระทั่งทำให้อุณหภูมิของอากาศอิ่มตัวที่ผิวร่วมลดลงจนถึงอุณหภูมิกระเปาะเปียก (T_{wb}) ของอากาศบรรยากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 การวิเคราะห์สมดุลของการถ่ายโอนความร้อนระหว่างน้ำร้อนและอากาศของหอระบาย ความร้อนแบบเหนี่ยวนำอากาศชนิดอากาศและน้ำไหลสวนทาง (มนตรี 2544)

พิจารณาแก๊สขยายฟิล์มที่มีพื้นที่หน้าตัด A และหนา dZ จะมีปริมาตรเชิงอนุพันธ์ $dV = AdZ$ อากาศไหลขึ้นที่ตำแหน่ง Z ด้วยอัตราการไหล $G \text{ kg/hr}$ น้ำร้อนไหลลงที่ตำแหน่ง $z+dz$ ด้วยอัตราการไหล $L \text{ kg/hr}$ และน้ำมีความจุความร้อนจำเพาะคงตัว $C_L = 1 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C}$ ภายใต้สมดุลของพลังงานในปริมาตรเชิงอนุพันธ์เขียนได้ว่า

$$(\text{ปริมาณความร้อนที่อากาศรับไว้}) = (\text{ปริมาณความร้อนที่ถ่ายโอนโดยแก๊สขยายฟิล์ม})$$

$$Gdh = LC_L dT = LdT \tag{2.16}$$

พิจารณาขนาดของแก๊สขยายฟิล์ม ซึ่งมีปริมาตร $dV = Adz$ โดยมีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเชิงปริมาตร (volumetric heat transfer coefficient) เท่ากับ $Ka \text{ kg/m}^3 \text{ hr}$ ต่อผลต่างเอนทัลปี 1 หน่วย และมีศักดิ์ขับเคลื่อนความร้อน เท่ากับ $(h_w - h)$ จากสมดุลพลังงาน เขียนได้ว่า

$$\{\text{ปริมาณความร้อนที่น้ำร้อนคายออก}\}_{2 \rightarrow 1} = \{\text{ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทโดยแก๊สขยายฟิล์ม}\}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 $C_L dT = Ka(Adz)(h_w - h)$
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{Ka}{L} \int_0^V dV = \frac{KaV}{L} = \int_{T_2}^{T_1} \frac{C_L dT}{h_w - h} \tag{2.17}$$

กำหนดให้ $h_w - h = (h_w - h)_{\text{mean}} = \Delta h_m$

จะได้

$$\frac{KaV}{L} = \frac{C_L(T_1 - T_2)}{L\Delta h_m} = \frac{C_L\Delta T}{\Delta h_m} \quad (2.18)$$

สมการ (2.18) ใช้คำนวณหา KaV/L ของหอระบายความร้อน การกำหนดจุดวัดอุณหภูมิ น้ำร้อนจะพิจารณาตามวิธีของเชบายเชฟฟ์ (Tchebycheff)

2.2.3 การคำนวณ KaV/L ตามวิธีเชบายเชฟฟ์

มนตรี[6] จากการทดสอบหอระบายความร้อนตัวหนึ่งๆจะสามารถวัดค่าของอุณหภูมิของน้ำร้อนทางเข้า (T_1) และอุณหภูมิของน้ำเย็นทางออก (T_2) และอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศทางเข้า (T_{WB}) ภายใต้ค่ากำหนดของ L/G นั้น ค่าของ KaV/L สามารถหาได้จากสมการ (2.17) ดังนี้

$$\frac{KaV}{L} = \int_{T_2}^{T_1} \frac{C_L dT}{(h_w - h)}$$

การคำนวณค่าของ KaV/L นี้อยู่ในรูปของปริพันธ์ วิธีเชบายเชฟฟ์จะนำมาใช้หาปริพันธ์นี้โดยตรง โดยพิจารณาดังนี้ ปริพันธ์ของ $\int_a^b y dx$ จะพิจารณาในรูปของผลบวกของแต่ละค่าของ y ที่กำหนดไว้ทั้งหมด 4 จุดในช่วงของ $a \leq x \leq b$ แล้วคูณด้วยค่าของ $(b-a)$ ตำแหน่งหรือจุดที่ใช้พิจารณาค่าของ y อยู่ที่ $x = 0.10(b-a)$, $0.40(b-a)$, $0.6(b-a)$ และ $0.9(b-a)$ ตามลำดับ ซึ่งได้แก่จุด A, B, C และ D ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ดังนี้

$$\int_a^b y dx = \frac{b-a}{4} (y_A + y_B + y_C + y_D) \quad (2.19)$$

โดยที่ y_A คือค่า y ที่ตำแหน่ง $x_A = a + 0.1(b-a)$

y_B คือค่า y ที่ตำแหน่ง $x_B = a + 0.4(b-a)$

y_C คือค่า y ที่ตำแหน่ง $x_C = b - 0.4(b-a)$ หรือ $a + 0.6(b-a)$

y_D คือค่า y ที่ตำแหน่ง $x_D = b - 0.1(b-a)$ หรือ $a + 0.9(b-a)$

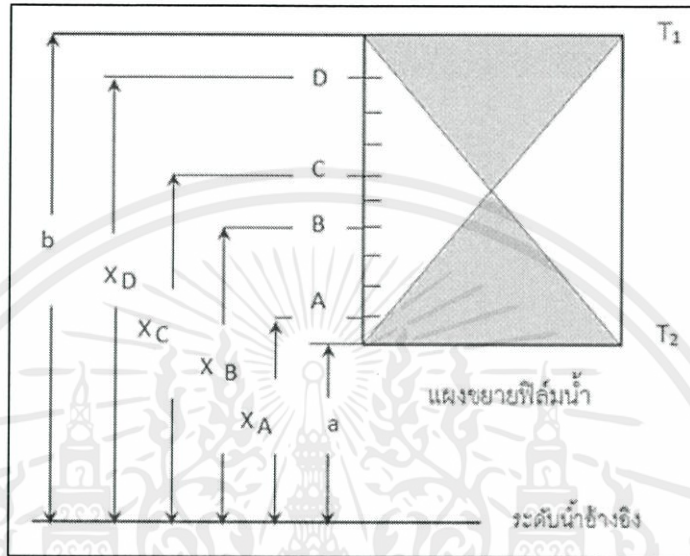
กำหนด $dx = dT$ และ $y = \frac{1}{\Delta h}$ โดยที่ $\Delta h = (h_w - h)$ ดังนั้นจากสมการ (2.19) จะเขียนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้นำไปเผยแพร่และอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{KaV}{L} = \frac{C_L(T_1 - T_2)}{4} \left[\frac{1}{\Delta h_A} + \frac{1}{\Delta h_B} + \frac{1}{\Delta h_C} + \frac{1}{\Delta h_D} \right] \quad (2.20)$$

- Δh_A คือ ค่าของ $(h_w - h_a)$ ที่อุณหภูมิ $T_2 + 0.1 (T_1 - T_2)$
 Δh_B คือ ค่าของ $(h_w - h_a)$ ที่อุณหภูมิ $T_2 + 0.4 (T_1 - T_2)$
 Δh_C คือ ค่าของ $(h_w - h_a)$ ที่อุณหภูมิ $T_1 + 0.4 (T_1 - T_2)$ หรือ $T_2 + 0.6 (T_1 - T_2)$
 Δh_D คือ ค่าของ $(h_w - h_a)$ ที่อุณหภูมิ $T_1 + 0.1 (T_1 - T_2)$ หรือ $T_2 + 0.9 (T_1 - T_2)$



รูปที่ 2.5 ตำแหน่งพิจารณาค่าของ y 4 ตำแหน่ง ตามวิธีเขบายเซฟฟ์

กำหนดรายละเอียดในการทดสอบคูลิ่งเทอเวอร์แบบไหลสวนทาง

1. อุณหภูมิของน้ำร้อนทางเข้า (T_1)
2. อุณหภูมิของน้ำเย็นทางออก (T_2)
3. อุณหภูมิกระเปาะเปียกทางเข้า (T_{wb})
4. อัตราส่วนของอัตราการไหล (L/G)

ขั้นตอนการคำนวณ

1. แบ่งช่วงอุณหภูมิของน้ำ ($T_1 - T_2$) ออกเป็น 10 ส่วน ๆ ละเท่ากัน
2. กำหนดจุดพิจารณาค่าที่ซับซ้อนความร้อน ($\Delta h = h_w - h_a$) ตามวิธีของเขบายเซฟฟ์ จะได้จุด A, B, C และ D
3. คำนวณสมมูลของพลังงาน $(G\Delta h)_{air} = (L C_L \Delta T)_{water}$ และจะได้

$$\Delta h = \frac{L}{G} C_L \Delta T \quad (2.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น กำหนดให้เอนทัลปีของอากาศที่จุด 1 (h_1) เป็นเอนทัลปีของอากาศอิ่มตัวที่อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศที่จุดนั้น $T_{wb1} = 12^\circ\text{C}$ และใช้ตารางที่ X หาเอนทัลปีของอากาศอิ่มตัว เอนทัลปีของ

อากาศที่จุด 1, A, B, C, D และ 2 คือ h_1, h_A, h_B, h_C, h_D และ h_2 เมื่อทราบอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศที่เข้า (T_{wb1}) จึงทำให้หา h_1 ได้จากตารางที่ 2.1 และสามารถนำไปคำนวณเอนทัลปีจุดอื่นได้ดังนี้

$$h_2 = h_1 + C_L(L/G)(T_1 - T_2) \quad (2.22a)$$

$$h_A = h_1 + 0.1 C_L(L/G)(T_1 - T_2) \quad (2.22b)$$

$$h_B = h_1 + 0.4 C_L(L/G)(T_1 - T_2) \quad (2.22c)$$

$$h_C = h_2 + 0.4 C_L(L/G)(T_1 - T_2) \quad (2.22d)$$

$$h_D = h_2 + 0.1 C_L(L/G)(T_1 - T_2) \quad (2.22e)$$

ในที่นี้ C_L คือ ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ ซึ่งปกติจะใช้ $C_L = 4.1868 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$

ตารางที่ 2.1 การคำนวณค่า $\frac{1}{\Delta h_A}, \frac{1}{\Delta h_B}, \frac{1}{\Delta h_C}$ และ $\frac{1}{\Delta h_D}$ ตามวิธีของเชบายเชฟฟ์

อุณหภูมิของน้ำ $^\circ\text{C}$	h_w (kJ/kg)	h (kJ/kg)	$\Delta h=(h_w - h)$	$1/\Delta h$
$T_2 = 21.8$	-	$h_1 = 34.1$	-	-
$T_A=T_2+0.1(T_1-T_2) = 22.6$	66.7	$h_A = 37.6$	29.1	0.0344
$T_B=T_2+0.4(T_1-T_2) = 22.6$	76.3	$h_B = 48.1$	28.2	0.0355
$T_C=T_1-0.4(T_1-T_2) = 26.6$	83.2	$h_C = 55.2$	28.2	0.0357
$T_D=T_1-0.1(T_1-T_2) = 29$	94.6	$h_D = 69.2$	28.9	0.0346
$T_1 = 29.8$	-	$h_2 = 69.2$	-	-
				$\sum 1/\Delta h = 0.1402$

ดังนั้น

$$\frac{KaV}{L} = \frac{c_L(T_1-T_2)}{4} \sum \frac{1}{\Delta h}$$

$$= 4.1868 \times \frac{29.8-21.8}{4} \times 0.1402$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 1.174$$

ข้อสังเกต

-วิธีระบายความร้อน แนะนำโดย Cooling Tower Institute (CTI) ตามข้อกำหนดของมาตรฐาน CTI ATC-105

-จากการคำนวณหาค่าของ L/G และ KaV/L จากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบตามมาตรฐานของ CTI จะต้องนำไปคำนวณหาขีดความสามารถของหอระบายความร้อน (tower capability) ต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

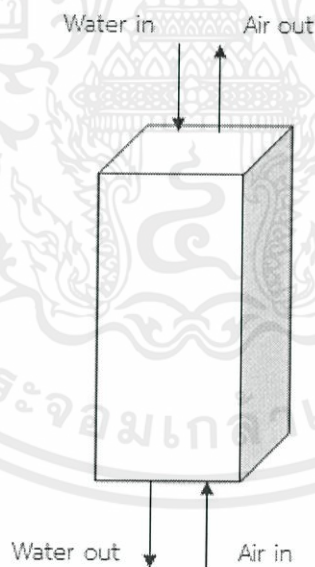
การคำนวณและการออกแบบ

การคำนวณและออกแบบชุดเครื่องจักรการทำงานของหอบายความร้อนนี้ทำการออกแบบขนาดของหอบายความร้อนและคำนวณหาสมรรถนะโดยแบ่งการคำนวณเป็น 2 ตอน คือ

- การออกแบบหอบายความร้อนภายใต้ค่าเงื่อนไขดังต่อไปนี้
 1. ชุดทดลองสามารถระบายความร้อนได้ $Q = 2 \text{ kW}$
 2. เรนจ์ = $5 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- คำนวณหาขีดความสามารถของหอบายความร้อนโดยเทียบผลข้อมูลที่ได้จากการทดลองกับผลข้อมูลจากการคำนวณ

3.1 การคำนวณการออกแบบหอบายความร้อน

หาขนาดของหอบายความร้อนโดยการคำนวณปริมาตรของแผงขยายฟิล์มตามที่ต้องการเพื่อใช้ในการสร้างชุดทดลองจำลองการทำงานของหอบายความร้อนนี้



รูปที่ 3.1 ทิศทางการไหลของน้ำและอากาศ

กำหนดให้

เอกสารนี้ อุณหภูมิของอากาศทางเข้า, $T_{ai} = 30 \text{ }^{\circ}\text{C} = 303 \text{ K}$ เป็นต้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณี ความดันบรรยากาศ, $P_{atm} = 101.3 \text{ kPa}$ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ความชื้นสัมพัทธ์, $\%RH = 70\%$

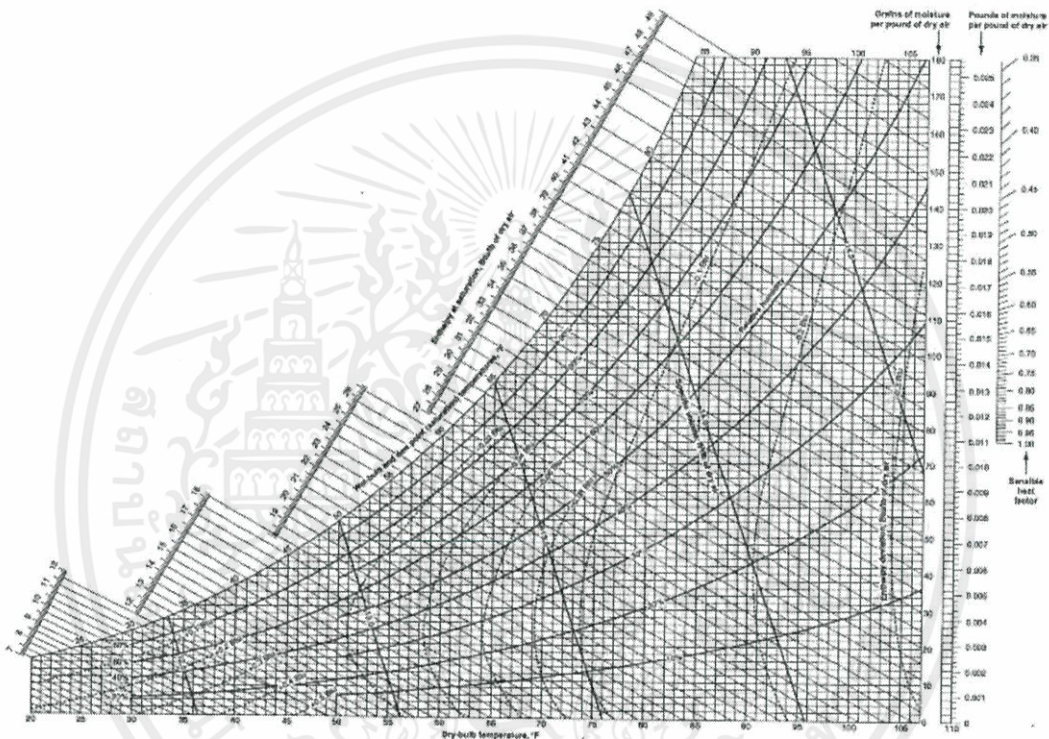
หาความหนาแน่นของอากาศ

$$\rho_{ai} = \frac{P_{atm}}{R \times T_{ai}}$$

(ค่าคงตัวของแก๊ส, $R = 287 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$)

$$= \frac{101.3 \times 10^3}{287 \times 303}$$

$$= 1.165 \text{ kg/m}^3$$



รูปที่ 3.2 แผนภาพไซโครเมตริก

จากแผนภูมิไซโครเมตริก (Psychrometric chart) ที่ $T_{ai} = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์, %RH = 70% จะได้อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศทางเข้า, $(T_{wb})_{ai} = 25.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยให้อากาศทางออกมีความชื้นสัมพัทธ์, %RH = 100% จากความต้องการ Cooling load, $Q = 2 \text{ kW}$ คำนวณอัตราการไหลโดยมวลของน้ำ จากความต้องการเรนจ์ = $5 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$Q = \dot{m}_w C_L \Delta T$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ $2 = \dot{m}_w (4.18) (5)$ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

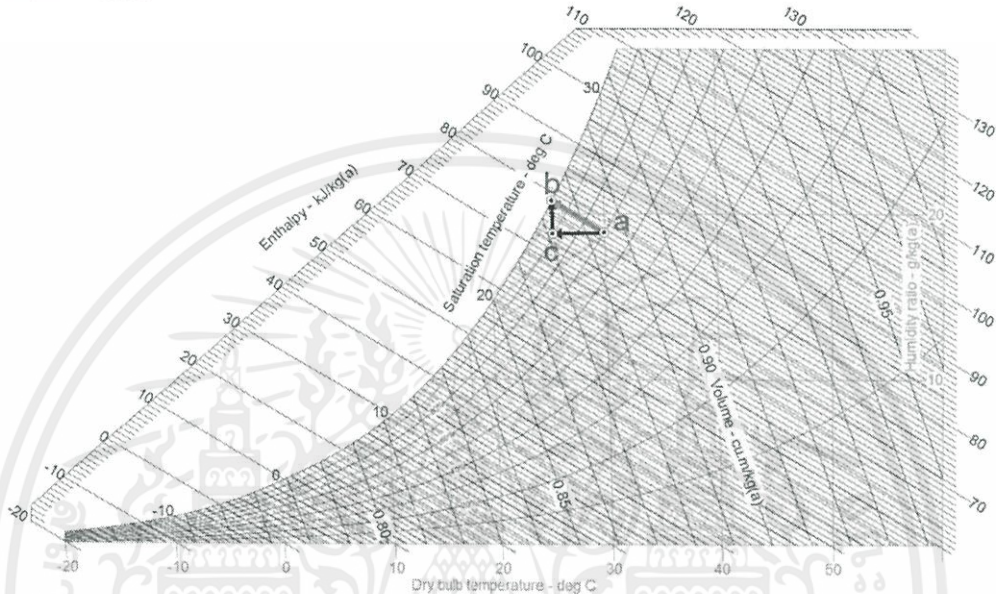
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา $\dot{m}_w = 0.0957 \text{ kg/s}$ นี้ไปใช้ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{อัตราการไหลโดยมวลของน้ำ} = 0.0957 \text{ kg/s} = L$$

คำนวณอัตราการไหลโดยมวลของอากาศ

คิดจากปริมาณความร้อนทั้งหมดที่อากาศได้รับโดยคำนวณได้จากผลรวมของปริมาณความร้อนสัมผัสที่นำถ่ายโอนสู่อากาศ, Q_s กับปริมาณความร้อนแฝงของไอน้ำที่แพร่ผ่านผิวร่วม, Q_L กับปริมาณความร้อนสัมผัสที่นำถ่ายโอนสู่อากาศ

Pressure: 101325 Pa



รูปที่ 3.3 แผนภาพไซโครเมตริก

จุด a อากาศทางเข้า อุณหภูมิกระเปาะแห้ง, $T_{ai} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, อุณหภูมิกระเปาะเปียก, $(T_{wb})_{ai} = 25.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, %RH = 70%, เอนทัลปี, $h_a = 78\text{ kJ/kg}$, อัตราส่วนความชื้นของอากาศ, $\omega_a = 0.01879\text{ kg/kg-dry air}$

จุด b อากาศทางออก อุณหภูมิกระเปาะแห้ง, $T_{ao} = 25.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, อุณหภูมิกระเปาะเปียก, $(T_{wb})_{ao} = 25.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, %RH = 100%, เอนทัลปี, $h_b = 78\text{ kJ/kg}$, อัตราส่วนความชื้นของอากาศ, $\omega_b = 0.02070\text{ kg/kg-dry air}$

จุด c อุณหภูมิกระเปาะแห้ง = $25.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, อุณหภูมิกระเปาะเปียก = $24.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, %RH = 90.5%, เอนทัลปี, $h_c = 73\text{ kJ/kg}$, อัตราส่วนความชื้นของอากาศ, $\omega_c = 0.01879\text{ kg/kg-dry air}$

$$Q = Q_s + Q_L$$

$$2 = \dot{m}_a(h_a - h_c) + \dot{m}_a(h_b - h_c)$$

เอกสารนี้จะได้สารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$2 = \dot{m}_a(78 - 73) + \dot{m}_a(78 - 73)$$

$$\dot{m}_a = 0.2\text{ kg/s}$$

$$\text{การไหลโดยมวลของอากาศ} = 0.2 \text{ kg/s} = G$$

คำนวณอัตราการไหลโดยมวลของน้ำที่เติม จากค่าในแผนภาพไซโครเมตริก กำหนดให้เปอร์เซ็นต์ 0.3% ของอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำ[12]

$$\dot{m}_{\text{make up}} = \dot{m}_{\text{evap}} + \dot{m}_{\text{drift loss}}$$

จะได้

$$\begin{aligned} \dot{m}_{\text{make up}} &= \dot{m}_a(\omega_b - \omega_a) + \left(\frac{0.3}{100} \times \dot{m}_w\right) \\ &= 0.2(0.02070 - 0.01879) + \left(\frac{0.3}{100} \times 0.0957\right) \\ &= 0.0006691 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

จะได้อัตราส่วนของอัตราการไหลดังนี้

$$\frac{L}{G} = \frac{0.0957 \text{ kg/s}}{0.2 \text{ kg/s}} = 0.479$$

คำนวณปริมาตรของแผงขยายฟิล์ม

จาก

$$Q = KaVF(\Delta h_{lm})$$

กำหนดพื้นที่หน้าตัดของแผงขยายฟิล์มเท่ากับ $0.23 \times 0.23 = 0.0529 \text{ m}^2$

หาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, Ka จากความสัมพันธ์ของ Gharagheizi et al. (Vertical Corrugated Packing) [9] ใช้รุ่น CF-1900 สมมติให้ความสูง (l_{sel}) 0.64 m

$$Ka = 0.534375(L')^{0.747}(G')^{0.253}$$

$$\text{ที่ความสูง } 0.64 \text{ m} \text{ เมื่อ } L' = \frac{L}{A} = \frac{0.0957}{0.0529} = 1.81 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

$$G' = \frac{G}{A} = \frac{0.2}{0.0529} = 3.78 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \cdot \text{s}$$

เอกสารนี้จะได้สารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Ka = 1.165 \text{ kg/m}^3\text{s}$$

โดยกำหนด

$$\text{อุณหภูมิน้ำร้อนทางเข้า } (T_1) = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\text{อุณหภูมิน้ำร้อนทางออก } (T_2) = 35 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\text{อุณหภูมิกระเปาะเปียกทางเข้า} = 25.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\text{เรนจ์ค่าออกแบบ } R = (T_1 - T_2) = 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

กำหนดให้ ตัวประกอบค่าแก้สำหรับหอระบายความร้อน แบบไหลสวนทาง (F)=1.0 ดังนั้น ค่าผลต่างของเอนทัลปีแบบลอการิทึม สามารถคำนวณได้จาก

$$\Delta h_{lm} = \frac{(h_{w_1} - h_2) - (h_{w_2} - h_1)}{\ln\left(\frac{h_{w_1} - h_2}{h_{w_2} - h_1}\right)}$$

โดยที่ h_{w_1} คือ เอนทัลปีของอากาศอิ่มตัวที่อุณหภูมิ T_1 (อุณหภูมิน้ำร้อนที่ทางเข้า)

h_{w_2} คือ เอนทัลปีของอากาศอิ่มตัวที่อุณหภูมิ T_2 (อุณหภูมิน้ำเย็นที่ทางออก)

h_1 คือ เอนทัลปีของอากาศอิ่มตัวที่อุณหภูมิ $(T_{wb})_{ai}$

h_2 คือ เอนทัลปีของอากาศอิ่มตัวที่อุณหภูมิ $(T_{wb})_{ao}$, $h_2 = h_1 + c_L\left(\frac{L}{G}\right)\Delta T$

แทนค่า

$$\begin{aligned} \Delta h_{lm} &= \frac{(166.03 - 88.42) - (129.00 - 78.42)}{\ln\left(\frac{166.03 - 88.41}{129.00 - 78.42}\right)} \\ &= 63.13 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

จากสมการ

$$Q = K_a V F (\Delta h_{lm})$$

แทนค่า

$$2 = (1.165) V (1) (63.13)$$

$$V = 0.0272 \text{ m}^3$$

พื้นที่หน้าตัดของแผงขยายฟิล์มเท่ากับ 0.0529 m^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และ $1 = \frac{0.0272}{0.0529}$ ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 0.514 \text{ m}$$

$$l_{\text{sel}} > l$$

$$l_{\text{max}} = l = 0.64 \text{ m}$$

ดังนั้น จะได้ความสูงของแผงขยายฟิล์มเท่ากับ 0.64 m

หาค่าความดันสูญเสียของอากาศที่ผ่านในหอระบายความร้อน
ความดันสูญเสียของอากาศทางเข้า

คำนวณจาก
$$\Delta P_{\text{inlet}} = K\left(\frac{1}{2}\right)\rho v^2$$

เมื่อ $K = 0.78$ [ภาคผนวก ก รูปที่ ก.1]

ความหนาแน่นของอากาศทางเข้าหอระบายความร้อน,

$$\rho_{\text{ai}} = \frac{P_{\text{atm}}}{R \times T_{\text{ai}}} = \frac{101.3 \times 10^3}{287 \times 303} = 1.165 \text{ kg/m}^3$$

ความเร็วอากาศทางเข้าหอระบายความร้อน,

$$v_{\text{inlet}} = \frac{V_{\text{ai}}}{A_{\text{inlet}}} = \frac{(0.2)/(1.165)}{(0.1)(0.15)} = 11.467 \text{ m/s}$$

แทนค่าจะได้

$$\Delta P_{\text{inlet}} = 59.74 \text{ Pa} = 6.092 \text{ mmHg}_2\text{O}$$

ความดันสูญเสียของอากาศที่ผ่านแผงขยายฟิล์มน้ำ

สำหรับแผงขยายฟิล์มน้ำรุ่น CF-1900 ความดันสูญเสียที่ผ่านแผงขยายฟิล์มน้ำ [7]

คำนวณจาก

$$\Delta P_{\text{Fill}} = 0.95 [6.7033 (10^{-7}) (v_{\text{p,act}})^2 + 2.41582 \text{E} - 05 (L^0) (v_{\text{p,act}})] (H/4)^{0.8}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
เมื่อ ความเร็วอากาศผ่านแผงขยายฟิล์มน้ำจริง,
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v_{\text{p,act}} = \frac{V_{\text{Fill}}}{A_{\text{Fill}}} = \frac{(0.2)/(1.165)}{0.0529} = 3.25 \text{ m/s} = 638.83 \text{ ft/min}$$

$$L^0 = \frac{L}{A} = 2.682 \text{ gpm/ft}^2$$

$$H = 0.64 \text{ m} = 2.1 \text{ ft}$$

แทนค่าจะได้ $\Delta P_{\text{Fill}} = 0.179 \text{ in} - \text{wg} = 4.547 \text{ mmH}_2\text{O}$

ดันสูญเสียของอากาศทางออก

คำนวณจาก

$$\Delta P_{\text{outlet}} = [(k_i)(0.5)(\rho_{ao})(v_{\text{outlet}})^2]_{\text{ปวงทางเข้าพัดลม}} + [(k_{ob})(0.5)(\rho_{ao})(v_{ob})^2]_{\text{สิ่งกีดขวางทางออก}}$$

เมื่อ สัมประสิทธิ์การต้านทานการไหลตามรูปแบบทางเข้าของปากปล่องปล่อยลม,

$$k_i = 0.4 \text{ [ภาคผนวก ก ตารางที่ ก.4]}$$

สัมประสิทธิ์ต้านทานการไหลผ่านสิ่งกีดขวางปล่องปล่อยลม, $K_{ob} = 0.025$ [ภาคผนวก ก รูปที่ ก.3]

$$\text{ความหนาแน่นของอากาศที่ปล่องปล่อยลม, } \rho_{ao} = \frac{P_{\text{atm}}}{R \times T_{ao}} = \frac{101.3 \times 10^3}{287 \times 298.5} = 1.1536 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศที่ทางออก, } V_{ao} = \frac{G}{\rho_{ao}} = \frac{0.2}{1.1536} = 0.1734 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{ความเร็วของอากาศที่ทางเข้าปากปล่องปล่อยลม, } v_{\text{outlet}} = \frac{V_{ao}}{A_{fan}} = \frac{0.1734}{0.0118} = 14.69 \text{ m/s}$$

$$\text{ความเร็วของอากาศที่ผ่านพัดลม, } v_{obi} = v_{\text{outlet}} = 14.69 \text{ m/s}$$

แทนค่าจะได้ $\Delta P_{\text{outlet}} = 52.90 \text{ Pa} = 5.394 \text{ mmH}_2\text{O}$

$$\Delta P_{\text{total}} = \Delta P_{\text{inlet}} + \Delta P_{\text{Fill}} + \Delta P_{\text{outlet}}$$

$$= 6.092 + 4.547 + 5.394$$

$$= 16.033 \text{ mmH}_2\text{O}$$

จะสามารถหาค่ากำลังของพัดลมได้

จากสมการ

$$\begin{aligned} \text{เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน} P_A &= \frac{Q \Delta P_{\text{total}}}{102} \text{ านัน ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า} \\ \text{ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้} \\ &= \frac{(0.172)(13.985)}{102} \end{aligned}$$

$$= 0.0236 \text{ kW} = 24 \text{ W}$$

นำกำลังที่คำนวณได้ไปเลือกซื้อขนาดของพัดลม ซึ่งเลือกพัดลมขนาด 59.4/50.6 W ที่ความถี่ของกระแสไฟฟ้า 50/60 เฮิรตซ์ มาใช้งาน

คำนวณหาขนาดของปั๊ม

หาเฮดความสูญเสียรวม (Total Dynamics Head) ที่อัตราการไหลสูงสุด 10 l/min ($0.0001667 \text{ m}^3/\text{s}$)

จาก

$$\text{Total Dynamics Head (TDH)} = (Z_2 - Z_1) + H_L$$

เมื่อ $Z_2 - Z_1 =$ ความแตกต่างของระดับน้ำทั้งสองจุด = 1.095 m

$H_L =$ เฮดสูญเสียภายในท่อ = $H_{Lr} + H_{Le} =$ เฮดความฝืด + เฮดการสูญเสียจากการไหลผ่านอุปกรณ์

หาเฮดความสูญเสียของอุปกรณ์ด้านดูด

จากสมการ

$$H_{Le} = \sum K \frac{V^2}{2g}$$

เมื่อ $K = 0.78$ (ปากทางเข้า)

$= 2 \times 1.5 = 3$ (ข้องอ 90° 2 แห่ง) [ภาคผนวก ก ตารางที่ ก.6]

$D = 1 \text{ in} = 0.0254 \text{ m}$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\frac{\pi D^2}{4}} = \frac{Q}{\frac{\pi (0.0254)^2}{4}} = 1984.13Q$$

จะได้

$$H_{Le, \text{suc}} = (0.78 + 3) \frac{(1984.13Q)^2}{2 \times 9.81}$$

หาเฮดความสูญเสียของอุปกรณ์ด้านส่ง

เมื่อ $K = 1.5$ ข้องอ 90° [ภาคผนวก ก ตารางที่ ก.6]

$= 10$ (วาล์วปรับอัตราการไหล)

$= 2$ (ข้อต่อแยก)

$D = \frac{3}{4} \text{ in} = 0.01905 \text{ m}$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\frac{\pi D^2}{4}} = \frac{Q}{\frac{\pi (0.01905)^2}{4}} = 3508.77Q$$

จะได้

$$H_{Le,dis} = (1.5 + 10 + 2) \frac{(3508.77Q)^2}{2 \times 9.81}$$

หาเฮดความสูญเสียของข้อต่อปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด

เมื่อ $K = 4 \times 0.47 = 1.88$ (ข้อต่อปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง) [ภาคผนวก ก ตารางที่

ก.6]

$$= 4 \times 0.5 = 2 \text{ (หัวฉีด)}$$

$$D = \frac{1}{4} \text{ in} = 0.00635 \text{ m}$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\frac{\pi D^2}{4}} = \frac{Q}{\frac{\pi (0.00635)^2}{4}} = 31576.4Q$$

จะได้

$$H_{Le,joint} = (1.88) \frac{(31576.4Q)^2}{2 \times 9.81}$$

เพราะฉะนั้นเฮดความสูญเสียที่ผ่านอุปกรณ์จะได้

$$H_{Le,Total} = (0.78 + 3) \frac{(1984.13Q)^2}{2 \times 9.81} + (1.5 + 10 + 2) \frac{(3508.77Q)^2}{2 \times 9.81} \\ + (1.88) \frac{(31576.4Q)^2}{2 \times 9.81} + (2) \frac{(166574.37Q)^2}{2 \times 9.81}$$

เมื่ออัตราการไหลสูงสุด 10 l/min ($0.0001667 \text{ m}^3/\text{s}$)

จะได้

$$H_{Le,Total} = 81.3535 \text{ m}$$

หาเฮดความฝืดด้านดูด

จากภาคผนวก ก รูปที่ ก.5 ท่อ PVC มีค่า Absolute Roughness = 0

เพราะฉะนั้น ความขรุขระสัมพัทธ์ = 0

ที่น้ำอุณหภูมิ 40°C มีค่า Kinematic Viscosity, (ν) = $6.58 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$

ความเร็วของน้ำในท่อด้านดูด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหานี้ไปเผยแพร่อย่างอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0.0001667}{\frac{\pi (0.0254)^2}{4}} = 0.329 \text{ m/s}$$

หาค่าเรโนลด์นัมเบอร์ (Reynold's Number)

จาก
$$Re = \frac{VD}{\nu} = \frac{(0.329)(0.0254)}{6.58 \times 10^{-7}} = 12700$$

เนื่องจาก Re มีค่ามากกว่า 4000 จึงเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow)

จาก Moody Chart นำค่า Re และความขรุขระสัมพัทธ์เพื่อหาค่าตัวประกอบความเสียดทาน (f) = 0.008

จะได้เฮดความฝืดด้านดูดเป็น

$$H_{f,suc} = f \frac{L V^2}{D 2g}$$

$$H_{f,suc} = 0.008 \frac{(0.11 + 0.29 + 0.27)}{0.0254} \times \frac{(0.329)^2}{2(9.81)} = 0.001164 \text{ m}$$

หาเฮดความฝืดด้านส่ง

ความเร็วของน้ำในท่อด้านส่ง

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0.0001667}{\frac{\pi(0.01905)^2}{4}} = 0.585 \text{ m/s}$$

หาค่าเรโนลด์นัมเบอร์ (Reynold's Number)

จาก
$$Re = \frac{VD}{\nu} = \frac{(0.585)(0.01905)}{6.58 \times 10^{-7}} = 16937$$

เนื่องจาก Re มีค่ามากกว่า 4000 จึงเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow)

จาก Moody Chart นำค่า Re และความขรุขระสัมพัทธ์เพื่อหาค่าตัวประกอบความเสียดทาน (f) = 0.008

จะได้เฮดความฝืดด้านส่งเป็น

$$H_{f,dis} = f \frac{L V^2}{D 2g}$$

$$H_{f,dis} = 0.008 \frac{(0.515 + 0.23 + 0.17 + 0.18 + 2(0.4))}{0.01905} \times \frac{(0.585)^2}{2(9.81)} = 0.014 \text{ m}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจะได้

$$TDH = 1.095 + 81.3535 + 0.001164 + 0.014 = 82.5 \text{ m}$$

หากำลังของเครื่องสูบน้ำ

น้ำหนักจำเพาะของน้ำ, γ ที่ 40°C เท่ากับ 9731 N/m³

$$P_H = \frac{\gamma Q(\text{TDH})}{1000} = \frac{9731 \times 0.0001667 \times 82.5}{1000} = 0.134 \text{ kW}$$

นำกำลังที่คำนวณได้ไปเลือกซื้อปั๊ม ซึ่งเลือกปั๊มขนาด 0.37 kW มาใช้งาน

3.2 การคำนวณขีดความสามารถของหอระบายความร้อน

การคำนวณขีดความสามารถของการทำงานของหอระบายความร้อน คำนวณตามหลักเงื่อนไขของการทดสอบตามมาตรฐาน CTI โดยการคำนวณค่าออกแบบของ KaV/L และ L/G ที่ได้จากการคำนวณไปสร้างสมการบ่งลักษณะเฉพาะแล้วนำไปสร้างเส้นลักษณะเฉพาะ (Characteristic curve) และ เส้นแอฟโพรช (Approach curve) ของชุดทดลองที่ออกแบบเพื่อหาจุดออกแบบ $(L/G)_{\text{design}}$ ซึ่งได้จากจุดตัดของทั้งสองเส้น จากนั้นกำหนดค่าอัตราการไหลของน้ำทางเข้าที่ต้องการทดสอบที่ค่าต่างๆ นำอัตราส่วนอัตราการไหลที่ได้จากการทดสอบ $(L/G)_{\text{test}}$ ของค่าต่างๆที่กำหนดมาคำนวณหาค่า $(KaV/L)_{\text{test}}$ นำค่าไปสร้างสมการบ่งลักษณะเฉพาะแล้วนำไปสร้างเส้นลักษณะเฉพาะของค่าทดสอบ เพื่อหาจุดทดสอบ $(L/G)_{\text{test}}$ ซึ่งได้จากจุดตัดของเส้นลักษณะเฉพาะของค่าทดสอบกับเส้นแอฟโพรช จากนั้นนำ จุดออกแบบ $(L/G)_{\text{design}}$ และจุดทดสอบ $(L/G)_{\text{test}}$ ที่ได้มาคำนวณหาขีดความสามารถของหอระบายความร้อนของชุดทดลองนี้

คำนวณค่าออกแบบของ KaV/L

อัตราการไหลโดยมวลของน้ำ (L) = 0.0957 kg/s

อัตราการไหลโดยมวลของอากาศ (G) = 0.0488 kg/s

อุณหภูมิน้ำร้อนทางเข้า (T_1) = 40 °C

อุณหภูมิน้ำร้อนทางออก (T_2) = 35 °C

อุณหภูมิกะเปาะเปียกทางเข้า = 25.5 °C

เรนจ์ค่าออกแบบ $R = (T_1 - T_2) = 5$ °C

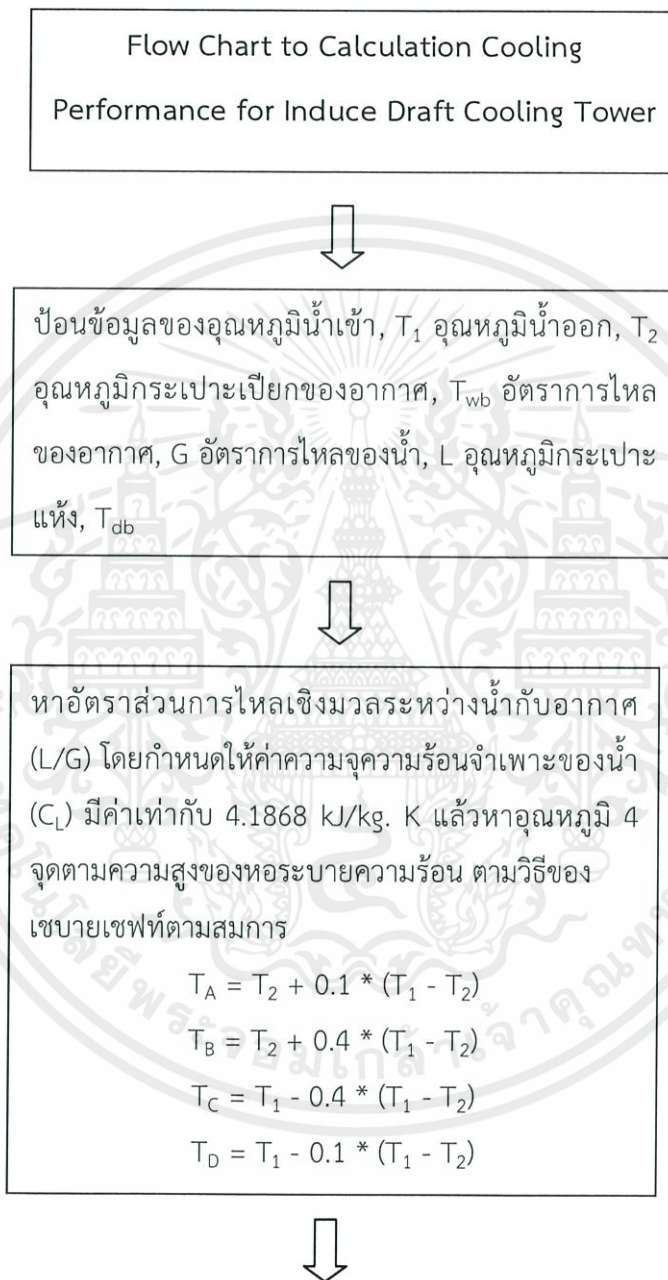
จะได้
$$\left(\frac{L}{G}\right)_{\text{design}} = \frac{0.0957}{0.2} = 0.479$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ค่าออกแบบ $\left(\frac{KaV}{L}\right)_{\text{design}}$ นี้ได้มาจากวิธีที่เขบายเซฟฟ์แนะนำโดย Cooling Tower Institute (CTI) ใช้

ตามข้อกำหนดของมาตรฐาน CTI ATC-105[11]

เนื่องจากการคำนวณค่า $\left(\frac{KaV}{L}\right)$ โดยวิธีที่เซบายเซฟฟ์ เป็นเรื่องที่ต้องใช้เวลาในการคำนวณอย่างมากในแต่ละครั้ง จึงได้สร้างโปรแกรมเพื่อช่วยในการคำนวณ

Flow chart ที่ใช้ในการเขียนโปรแกรม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาเอนทัลปีของอากาศอิมตัวทางเข้า, h_1 และหาเอนทัลปีของอากาศอิมตัวทางออก, h_2 จากสมการ

$$h_2 = h_1 + C_L(L/G)(T_1 - T_2)$$



หาเอนทัลปีของอากาศโดยแบ่งเป็น 4 จุด ตามความสูงของหอระบายความร้อน ตามสมการ

$$h_A = h_1 + 0.1 * C_L * (L/G) * (T_1 - T_2)$$

$$h_B = h_1 + 0.4 * C_L * (L/G) * (T_1 - T_2)$$

$$h_C = h_2 - 0.4 * C_L * (L/G) * (T_1 - T_2)$$

$$h_D = h_2 - 0.1 * C_L * (L/G) * (T_1 - T_2)$$



หาเอนทัลปีของอากาศอิมตัวที่อุณหภูมิเดียวกันกับน้ำที่จุด A, B, C และ D

$$(h_w)_A \text{ ที่ } T_A$$

$$(h_w)_B \text{ ที่ } T_B$$

$$(h_w)_C \text{ ที่ } T_C$$

$$(h_w)_D \text{ ที่ } T_D$$



คำนวณ

$$\sum \frac{1}{\Delta h} = \frac{1}{(h_w)_A - h_A} + \frac{1}{(h_w)_B - h_B} + \frac{1}{(h_w)_C - h_C} + \frac{1}{(h_w)_D - h_D}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษายกเว้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาค่า KaV/L จากสมการ

$$\frac{KaV}{L} = \frac{\sum \left(\frac{1}{\Delta h} \right) C_L (T_1 - T_2)}{4}$$

Form1

ข้อมูลการเข้างานของ Cooling Tower

ผลการวิเคราะห์การเข้างานของ Cooling Tower

1. Inlet Water Temperature C

2. Outlet Water Temperature C

3. Wet Bulb Temperature C

4. Air Flow Rate m³/min

5. Water Flow Rate L/min

6. Dry Bulb Temperature C

L/G Ratio

Volumetric Heat Transfer coeff. (KaV/L)

Characteristic Equation

OK Cancel Change Flow

รูปที่ 3.4 หน้าต่างโปรแกรมการคำนวณ

กำหนด $C_L = 4.18 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$

ตารางที่ 3.1 การคำนวณค่า $1/\Delta h$ ของค่าออกแบบ ตามวิธีของเซบายเซฟฟ์

อุณหภูมิของน้ำ (°C)	h_w , เอนทัลปีของอากาศอิ่มตัว (kJ/kg dry air)	h , เอนทัลปีของอากาศชื้น (kJ/kg dry air)	$\Delta h = h_w - h$	$1/\Delta h$
$T_2 = 35 \text{ }^\circ\text{C}$	-	ที่ $(T_{wb})_{ai} = 25.5 \text{ }^\circ\text{C}$, $h_1 = 78.42$	-	-
$T_A = T_2 + 0.1(T_1 - T_2) = 35.5 \text{ }^\circ\text{C}$	132.360	$h_A = h_1 + 0.1C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 79.42$	52.94	0.0189
$T_B = T_2 + 0.4(T_1 - T_2) = 37 \text{ }^\circ\text{C}$	142.770	$h_B = h_1 + 0.4C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 82.42$	60.35	0.0166
$T_C = T_2 + 0.6(T_1 - T_2) = 38 \text{ }^\circ\text{C}$	150.150	$h_C = h_1 + 0.6C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 84.42$	65.73	0.0152
$T_D = T_2 + 0.9(T_1 - T_2) = 39.5 \text{ }^\circ\text{C}$	161.965	$h_D = h_1 + 0.9C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 87.43$	74.54	0.0134
$T_1 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$	-	$h_2 = h_1 + C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 88.43$	-	-
				$\Sigma(1/\Delta h) = 0.0641$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะในรูปแบบใดก็ตาม หากมีข้อผิดพลาดประการใด ขออภัยเป็นอย่างสูงและขอสงวนสิทธิ์ในสิ่งที่ปรากฏ

จากสมการ

$$\begin{aligned} \left(\frac{KaV}{L}\right)_{\text{design}} &= \frac{C_L(T_1 - T_2)}{4} \Sigma \left(\frac{1}{\Delta h}\right) \\ &= \frac{4.18(40 - 35)}{4} (0.0836) \end{aligned}$$

จะได้

$$\left(\frac{KaV}{L}\right)_{\text{design}} = 0.335$$

สร้างเส้นลักษณะเฉพาะของหอระบายความร้อน

จากทฤษฎีการออกแบบหอระบายความร้อนจะกำหนดสมการบ่งลักษณะเฉพาะในรูปของ

$$\frac{KaV}{L} = C \left(\frac{L}{G}\right)^n \quad (\text{กำหนด } n = -0.6)$$

แทนค่า $\left(\frac{KaV}{L}\right)_{\text{design}} = 0.335$ และ $\left(\frac{L}{G}\right)_{\text{design}} = 0.479$ ในสมการ

เมื่อทราบค่าของ $\left(\frac{KaV}{L}\right)_{\text{design}}$ ของหอระบายความร้อนที่ 100% ของค่าอัตราการไหลที่ออกแบบ แทนค่าเพื่อสร้างสมการบ่งลักษณะเฉพาะ

จะได้ $0.335 = C(0.479)^{-0.6}$

$$C = 0.2154$$

จะได้สมการบ่งลักษณะเฉพาะ

$$\frac{KaV}{L} = 0.2154 \left(\frac{L}{G}\right)^{-0.6} \quad (3.1)$$

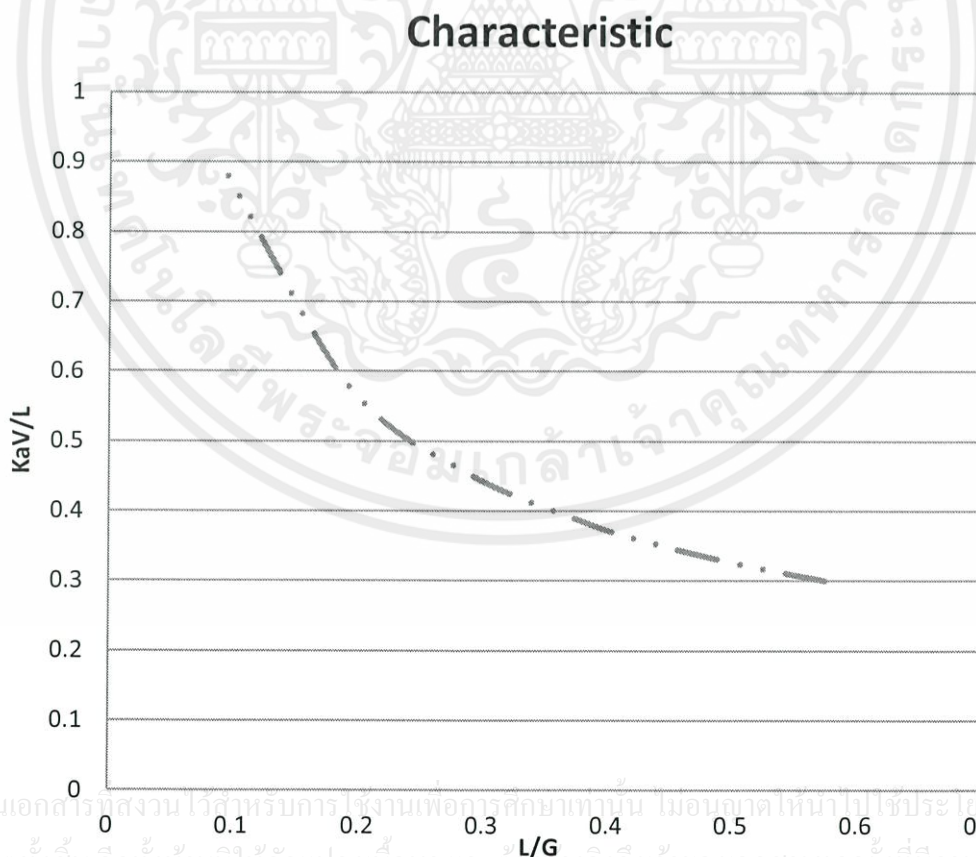
ในการสร้างเส้นลักษณะเฉพาะของหอระบายความร้อนที่ออกแบบจะกำหนดค่าของ L/G ให้ลดลงหรือเพิ่มขึ้นเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับค่าออกแบบที่คำนวณได้ดังตารางที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 ค่า KaV/L ที่ L/G ตั้งแต่ 20 – 120 %

% ของอัตราส่วนการไหลของ ค่าออกแบบ (L/G=0.479)	ค่า L/G ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ	KaV/L จำนวนจากสมการ (3.1)
120	0.575	0.300
110	0.527	0.316
100	0.479	0.335
90	0.431	0.357
80	0.383	0.383
60	0.287	0.455
40	0.192	0.580
20	0.096	0.880

นำข้อมูลจากตารางที่ 3.2 มาสร้างกราฟลักษณะเฉพาะ KaV/L กับ L/G



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.5 เส้นคุณลักษณะเฉพาะของหอบายความร้อน

สร้างเส้นแอฟโพรช

ในการสร้างเส้นแอฟโพรชจะใช้ค่า L/G ค่าเดียวกันกับที่กำหนดในการสร้างเส้นลักษณะเฉพาะของค่าออกแบบ แต่การคำนวณค่าของ KaV/L นั้นจะใช้วิธีขยายเซฟฟ์คำนวณ ในที่นี้เราจะใช้โปรแกรมในการช่วยคำนวณได้

คำนวณค่า KaV/L จากค่า L/G ค่าต่างๆ โดยวิธีขยายเซฟฟ์

กำหนดค่า L/G ที่ 120% ของ L/G = 0.479 ได้ 0.575

120% → L/G = 0.575

ตารางที่ 3.3 การคำนวณค่า $1/\Delta h$ ที่ L/G = 0.575 ตามวิธีของเซบายเซฟฟ์

อุณหภูมิของน้ำ (°C)	h_w , เอนทัลปีของอากาศอิ่มตัว (kJ/kg dry air)	h , เอนทัลปีของอากาศชื้น (kJ/kg dry air)	$\Delta h = h_w - h$	$1/\Delta h$
$T_2 = 35 \text{ }^\circ\text{C}$	-	ที่ $(T_{wb})_{ai} = 25.5 \text{ }^\circ\text{C}$, $h_1 = 78.42$	-	-
$T_A = T_2 + 0.1(T_1 - T_2) = 35.5 \text{ }^\circ\text{C}$	132.360	$h_A = h_1 + 0.1C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 79.62$	52.74	0.0190
$T_B = T_2 + 0.4(T_1 - T_2) = 37 \text{ }^\circ\text{C}$	142.770	$h_B = h_1 + 0.4C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 83.23$	59.54	0.0168
$T_C = T_2 + 0.6(T_1 - T_2) = 38 \text{ }^\circ\text{C}$	150.150	$h_C = h_1 + 0.6C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 85.63$	64.52	0.0155
$T_D = T_2 + 0.9(T_1 - T_2) = 39.5 \text{ }^\circ\text{C}$	161.965	$h_D = h_1 + 0.9C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 89.24$	72.73	0.0137
$T_1 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$	-	$h_2 = h_1 + C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 90.44$	-	-
				$\Sigma(1/\Delta h) = 0.0650$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{KaV}{L} = \frac{C_L(T_1 - T_2)}{4} \sum \left(\frac{1}{\Delta h} \right) = \frac{4.18(40 - 35)}{4} (0.0650)$$

$$\left(\frac{KaV}{L}\right)_{L/G=0.579} = 0.340$$

กำหนดค่า L/G ที่ 110% ของ L/G = 0.479 ได้ 0.527

$$110\% \rightarrow L/G = 0.527$$

ตารางที่ 3.4 การคำนวณค่า $1/\Delta h$ ที่ $L/G = 0.527$ ตามวิธีของเขบายเซฟฟ์

อุณหภูมิของน้ำ (°C)	h_w , เอนทัลปีของอากาศอิ่มตัว (kJ/kg dry air)	h , เอนทัลปีของอากาศชื้น (kJ/kg dry air)	$\Delta h = h_w - h$	$1/\Delta h$
$T_2 = 35 \text{ }^\circ\text{C}$	-	ที่ $(T_{wb})_{ai} = 25.5 \text{ }^\circ\text{C}$, $h_1 = 78.42$	-	-
$T_A = T_2 + 0.1(T_1 - T_2) = 35.5 \text{ }^\circ\text{C}$	132.360	$h_A = h_1 + 0.1C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 79.52$	52.84	0.0189
$T_B = T_2 + 0.4(T_1 - T_2) = 37 \text{ }^\circ\text{C}$	142.770	$h_B = h_1 + 0.4C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 82.83$	59.94	0.0167
$T_C = T_2 + 0.6(T_1 - T_2) = 38 \text{ }^\circ\text{C}$	150.150	$h_C = h_1 + 0.6C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 85.03$	65.12	0.0154
$T_D = T_2 + 0.9(T_1 - T_2) = 39.5 \text{ }^\circ\text{C}$	161.965	$h_D = h_1 + 0.9C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 88.33$	73.64	0.0136
$T_1 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$	-	$h_2 = h_1 + C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 89.43$	-	-
				$\Sigma(1/\Delta h) = 0.0646$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้นให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้คัดแปดต้นหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{KaV}{L} = \frac{C_L(T_1 - T_2)}{4} \sum \left(\frac{1}{\Delta h}\right) = \frac{4.18(40 - 35)}{4} (0.0646)$$

$$\left(\frac{KaV}{L}\right)_{\frac{L}{G}=2.156} = 0.338$$

กำหนดค่า L/G ที่ 90% ของ $L/G = 0.479$ ได้ 0.431

$$90\% \rightarrow L/G = 0.431$$

ตารางที่ 3.5 การคำนวณค่า $1/\Delta h$ ที่ $L/G = 0.431$ ตามวิธีของเซบายเซฟฟ์

อุณหภูมิของน้ำ ($^{\circ}\text{C}$)	h_w , เอนทัลปีของอากาศอิ่มตัว (kJ/kg dry air)	h , เอนทัลปีของอากาศชื้น (kJ/kg dry air)	$\Delta h = h_w - h$	$1/\Delta h$
$T_2 = 35^{\circ}\text{C}$	-	ที่ $(T_{wb})_{ai} = 25.5^{\circ}\text{C}$, $h_1 = 78.42$	-	-
$T_A = T_2 + 0.1(T_1 - T_2) = 35.5^{\circ}\text{C}$	132.360	$h_A = h_1 + 0.1C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 79.32$	53.04	0.0189
$T_B = T_2 + 0.4(T_1 - T_2) = 37^{\circ}\text{C}$	142.770	$h_B = h_1 + 0.4C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 82.02$	60.75	0.0165
$T_C = T_2 + 0.6(T_1 - T_2) = 38^{\circ}\text{C}$	150.150	$h_C = h_1 + 0.6C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 83.82$	66.33	0.0151
$T_D = T_2 + 0.9(T_1 - T_2) = 39.5^{\circ}\text{C}$	161.965	$h_D = h_1 + 0.9C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 86.53$	75.44	0.0133
$T_1 = 40^{\circ}\text{C}$	-	$h_2 = h_1 + C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 87.43$	-	-
				$\Sigma(1/\Delta h) = 0.0638$

$$\frac{KaV}{L} = \frac{C_L(T_1 - T_2)}{4} \sum \left(\frac{1}{\Delta h}\right) = \frac{4.18(40 - 35)}{4} (0.0638)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left(\frac{KaV}{L}\right)_{\frac{L}{G}=1.764} = 0.333$$

กำหนดค่า L/G ที่ 80% ของ L/G = 0.479 ได้ 0.383

$$80\% \rightarrow L/G = 0.383$$

ตารางที่ 3.6 การคำนวณค่า $1/\Delta h$ ที่ L/G = 0.383 ตามวิธีของเซบายเซฟฟ์

อุณหภูมิของน้ำ (°C)	h_w , เอนทัลปีของอากาศอิ่มตัว (kJ/kg dry air)	h , เอนทัลปีของอากาศชื้น (kJ/kg dry air)	$\Delta h = h_w - h$	$1/\Delta h$
$T_2 = 35 \text{ }^\circ\text{C}$	-	ที่ $(T_{wb})_{ai} = 25.5 \text{ }^\circ\text{C}$, $h_1 = 78.42$	-	-
$T_A = T_2 + 0.1(T_1 - T_2) = 35.5 \text{ }^\circ\text{C}$	132.360	$h_A = h_1 + 0.1C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 79.22$	53.14	0.0188
$T_B = T_2 + 0.4(T_1 - T_2) = 37 \text{ }^\circ\text{C}$	142.770	$h_B = h_1 + 0.4C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 81.62$	61.15	0.0164
$T_C = T_2 + 0.6(T_1 - T_2) = 38 \text{ }^\circ\text{C}$	150.150	$h_C = h_1 + 0.6C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 83.22$	66.93	0.0149
$T_D = T_2 + 0.9(T_1 - T_2) = 39.5 \text{ }^\circ\text{C}$	161.965	$h_D = h_1 + 0.9C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 85.62$	76.35	0.0131
$T_1 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$	-	$h_2 = h_1 + C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 86.42$	-	-
				$\Sigma(1/\Delta h) = 0.0632$

$$\frac{KaV}{L} = \frac{C_L(T_1 - T_2)}{4} \sum \left(\frac{1}{\Delta h} \right) = \frac{4.18(40 - 35)}{4} (0.0632)$$

$$\left(\frac{KaV}{L} \right)_{L/G=0.383} = 0.331$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดค่า L/G ที่ 60% ของ L/G = 0.479 ได้ 0.287

$$60\% \rightarrow L/G = 0.287$$

ตารางที่ 3.7 การคำนวณค่า $1/\Delta h$ ที่ L/G = 0.287 ตามวิธีของเซบายเซฟท์

อุณหภูมิของน้ำ (°C)	h_w , เอนทัลปีของอากาศอิ่มตัว (kJ/kg dry air)	h , เอนทัลปีของอากาศชื้น (kJ/kg dry air)	$\Delta h = h_w - h$	$1/\Delta h$
$T_2 = 35 \text{ }^\circ\text{C}$	-	ที่ $(T_{wb})_{ai} = 25.5 \text{ }^\circ\text{C}$, $h_1 = 78.42$	-	-
$T_A = T_2 + 0.1(T_1 - T_2) = 35.5 \text{ }^\circ\text{C}$	132.360	$h_A = h_1 + 0.1C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 79.02$	53.34	0.0187
$T_B = T_2 + 0.4(T_1 - T_2) = 37 \text{ }^\circ\text{C}$	142.770	$h_B = h_1 + 0.4C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 80.82$	61.95	0.0161
$T_C = T_2 + 0.6(T_1 - T_2) = 38 \text{ }^\circ\text{C}$	150.150	$h_C = h_1 + 0.6C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 82.02$	68.13	0.0147
$T_D = T_2 + 0.9(T_1 - T_2) = 39.5 \text{ }^\circ\text{C}$	161.965	$h_D = h_1 + 0.9C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 83.82$	78.15	0.0128
$T_1 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$	-	$h_2 = h_1 + C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 84.42$	-	-
				$\Sigma(1/\Delta h) = 0.0623$

$$\frac{KaV}{L} = \frac{C_L(T_1 - T_2)}{4} \sum \left(\frac{1}{\Delta h} \right) = \frac{4.18(40 - 35)}{4} (0.0623)$$

$$\left(\frac{KaV}{L} \right)_{L/G=0.287} = 0.326$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดค่า L/G ที่ 40% ของ L/G = 0.479 ได้ 0.192

40% → L/G = 0.192

ตารางที่ 3.8 การคำนวณค่า $1/\Delta h$ ที่ L/G = 0.192 ตามวิธีของเซบายเซฟฟ์

อุณหภูมิของน้ำ (°C)	h_w , เอนทัลปีของ อากาศอิ่มตัว (kJ/kg dry air)	h , เอนทัลปีของอากาศชื้น (kJ/kg dry air)	Δh = h_w-h	$1/\Delta h$
$T_2 = 35 \text{ }^\circ\text{C}$	-	ที่ $(T_{wb})_{ai} = 25.5 \text{ }^\circ\text{C}$, $h_1 = 78.42$	-	-
$T_A = T_2 + 0.1(T_1 - T_2) =$ $35.5 \text{ }^\circ\text{C}$	132.360	$h_A = h_1 + 0.1C_L(L/G)(T_1 - T_2)$ $= 78.82$	53.54	0.0187
$T_B = T_2 + 0.4(T_1 - T_2) =$ $37 \text{ }^\circ\text{C}$	142.770	$h_B = h_1 + 0.4C_L(L/G)(T_1 - T_2)$ $= 80.03$	62.74	0.0159
$T_C = T_2 + 0.6(T_1 - T_2) =$ $38 \text{ }^\circ\text{C}$	150.150	$h_C = h_1 + 0.6C_L(L/G)(T_1 - T_2)$ $= 80.83$	69.32	0.0144
$T_D = T_2 + 0.9(T_1 - T_2) =$ $39.5 \text{ }^\circ\text{C}$	161.965	$h_D = h_1 + 0.9C_L(L/G)(T_1 - T_2)$ $= 82.03$	79.94	0.0125
$T_1 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$	-	$h_2 = h_1 + C_L(L/G)(T_1 - T_2)$ $= 82.43$	-	-
				$\Sigma(1/\Delta h) =$ 0.0615

$$\frac{KaV}{L} = \frac{C_L(T_1 - T_2)}{4} \sum \left(\frac{1}{\Delta h} \right) = \frac{4.18(40 - 35)}{4} (0.0615)$$

$$\left(\frac{KaV}{L} \right)_{L=0.192} = 0.322$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดค่า L/G ที่ 20% ของ L/G = 0.479 ได้ 0.096

$$20\% \rightarrow L/G = 0.096$$

ตารางที่ 3.9 การคำนวณค่า $1/\Delta h$ ที่ $L/G = 0.096$ ตามวิธีของเขบายเซฟฟ์

อุณหภูมิของน้ำ (°C)	h_w , เอนทัลปีของอากาศอิ่มตัว (kJ/kg dry air)	h , เอนทัลปีของอากาศชื้น (kJ/kg dry air)	$\Delta h = h_w - h$	$1/\Delta h$
$T_2 = 35 \text{ }^\circ\text{C}$	-	ที่ $(T_{wb})_{ai} = 25.5 \text{ }^\circ\text{C}$, $h_1 = 78.42$	-	-
$T_A = T_2 + 0.1(T_1 - T_2) = 35.5 \text{ }^\circ\text{C}$	132.360	$h_A = h_1 + 0.1C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 78.62$	53.74	0.0186
$T_B = T_2 + 0.4(T_1 - T_2) = 37 \text{ }^\circ\text{C}$	142.770	$h_B = h_1 + 0.4C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 79.22$	63.55	0.0157
$T_C = T_2 + 0.6(T_1 - T_2) = 38 \text{ }^\circ\text{C}$	150.150	$h_C = h_1 + 0.6C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 79.62$	70.53	0.0142
$T_D = T_2 + 0.9(T_1 - T_2) = 39.5 \text{ }^\circ\text{C}$	161.965	$h_D = h_1 + 0.9C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 80.23$	81.74	0.0122
$T_1 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$	-	$h_2 = h_1 + 0.1C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 80.42$	-	-
				$\Sigma(1/\Delta h) = 0.0607$

$$\frac{KaV}{L} = \frac{C_L(T_1 - T_2)}{4} \sum \left(\frac{1}{\Delta h} \right) = \frac{4.18(40 - 35)}{4} (0.0607)$$

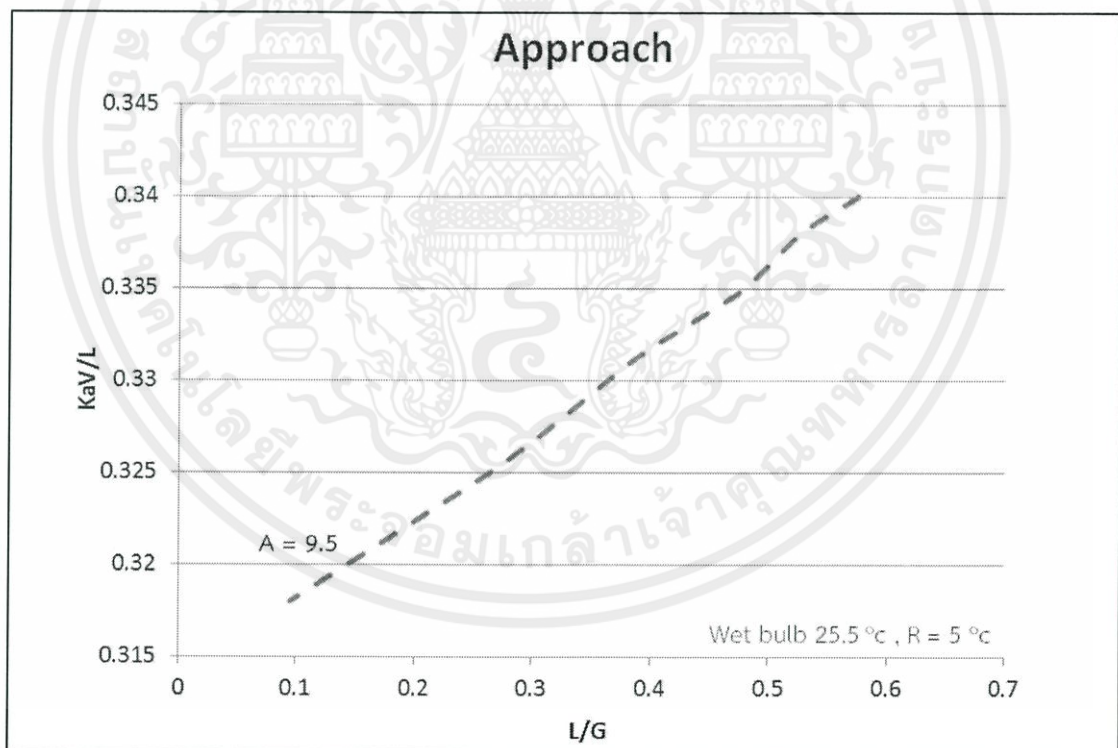
$$\left(\frac{KaV}{L} \right)_{L/G=0.096} = 0.317$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.10 ค่า KaV/L ที่ L/G ตั้งแต่ 20-120% โดยวิธีเซบายเซฟฟ์

% ของอัตราส่วนการไหลของ ค่าออกแบบ ($L/G=0.479$)	ค่า L/G ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ	KaV/L ที่คำนวณจากวิธี เซบายเซฟฟ์
120	0.575	0.340
110	0.527	0.338
100	0.479	0.335
90	0.431	0.333
80	0.383	0.331
60	0.287	0.326
40	0.192	0.322
20	0.096	0.318

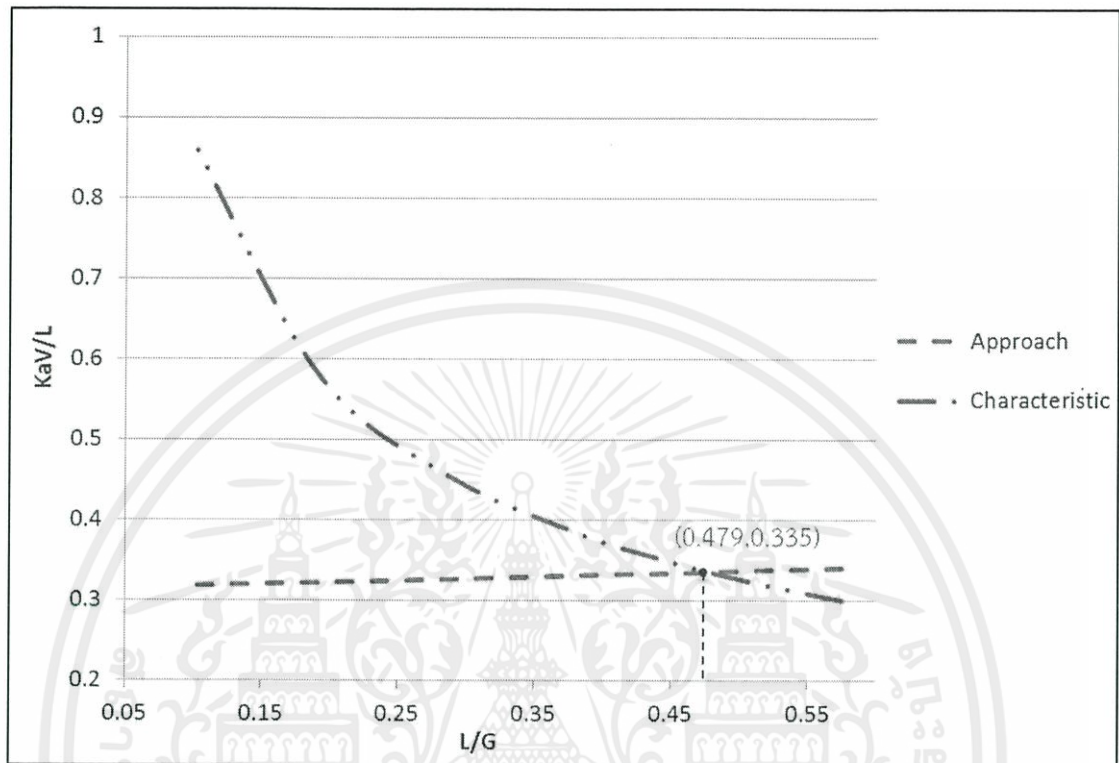
นำข้อมูลจากตารางที่ 3.10 มาสร้างเส้นกราฟแอฟโพรช



รูปที่ 3.6 เส้นแอฟโพรช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำกราฟลักษณะเฉพาะ (Characteristic curve) มาเขียนรวมกันกราฟแอฟโพรช (Approach curve) เพื่อหาจุดตัด



รูปที่ 3.7 เส้นการหาจุดออกแบบ (design point) ของหอบายความร้อน

จุดตัดของเส้นคุณลักษณะเฉพาะ (Characteristic curve) และ เส้นแอฟโพรช (Approach curve) คือค่าออกแบบ $(L/G)_{\text{design}}$

สร้างเส้นลักษณะเฉพาะของค่าทดสอบ

สร้างเส้นลักษณะเฉพาะของค่าทดสอบจากการนำผลการทดสอบจากบทที่ 4 ไปสร้างโดยการนำผลที่ได้มาคำนวณหาค่า $(KaV/L)_{\text{test}}$ แล้วนำค่าไปสร้างสมการบ่งลักษณะเฉพาะแล้วสร้างเส้นลักษณะเฉพาะของค่าทดสอบ เพื่อหาจุดทดสอบ $(L/G)_{\text{test}}$ ซึ่งได้จากจุดตัดของเส้นลักษณะเฉพาะของค่าทดสอบกับเส้นแอฟโพรช จากนั้นนำ จุดออกแบบ $(L/G)_{\text{design}}$ และจุดทดสอบ $(L/G)_{\text{test}}$ ที่ได้มาคำนวณหาขีดความสามารถของหอบายความร้อนจากสมการ

$$\text{ขีดความสามารถของหอบายความร้อน} = \frac{(L/G)_{\text{test}}}{(L/G)_{\text{design}}} \times 100\% \quad (3.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

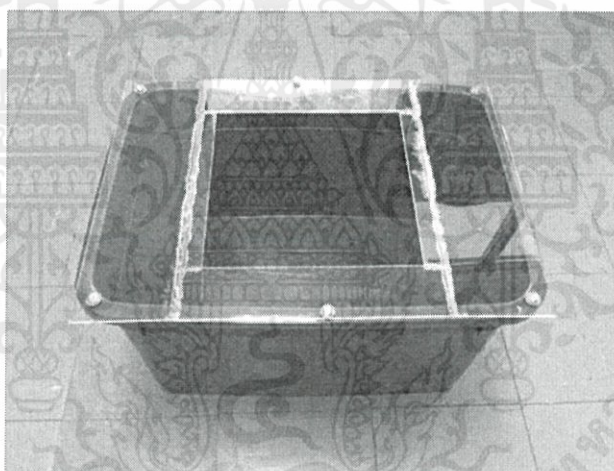
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการนี้บอกให้ทราบถึง ผลการทดสอบแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ของขีดความสามารถของหอบายความร้อน ตัวเลขเปอร์เซ็นต์ที่ได้จะบ่งบอกถึง ปริมาณของอัตราการไหลของน้ำที่จุดทดสอบ

หน้านางนั้น คิดเป็นก็เท่าของอัตราการใช้ค่าออกแบบ ภายใต้แอปโพรช เรนจ์ และภาวะอากาศทางเข้าเดียวกัน เช่น จากขีดความสามารถของหอบระบายความร้อนเท่ากับ 101.14% แสดงว่าหอบระบายความร้อนนี้จะสามารถทำให้น้ำเย็นลงตามเงื่อนไขการทำงานดังกล่าว ด้วยอัตราการใช้ของน้ำเท่ากับ 101.14% ของอัตราการใช้ค่าออกแบบภายใต้ แอปโพรช เรนจ์ และสภาวะอากาศทางเข้าที่กำหนดออกแบบไว้

3.3. เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง

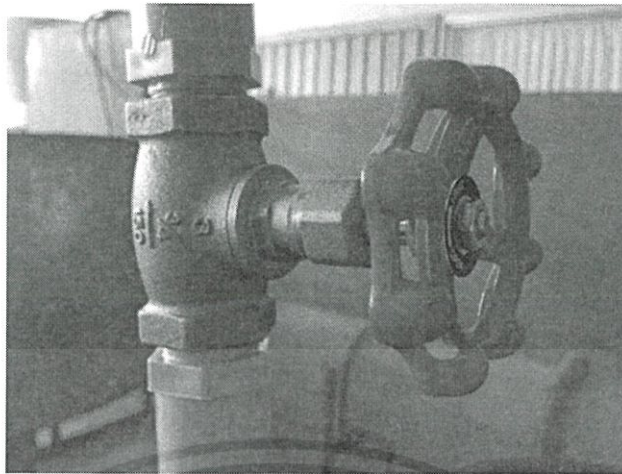
- 1) ถังร่อนน้ำถังร่อนน้ำเย็นจะอยู่ส่วนล่างสุดของหอบระบายความร้อน ซึ่งน้ำที่ถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศแล้ว สุดท้ายจะตกลงสู่ถังร่อนน้ำ ถังร่อนน้ำจะกักเก็บน้ำเพื่อนำน้ำไปใช้งานในระบบต่อไปความจุของถังร่อนน้ำต้องมีปริมาณเพียงพอที่จะเก็บน้ำไว้ใช้ในระบบ ในชุดทดลองนี้หอบระบายความร้อนจะต้องทำงานแบบต่อเนื่อง อาจจะต้องต่อระบบระบายน้ำต่อไป



รูปที่ 3.8 ถังร่อนน้ำ

- 2) วาล์วปรับอัตราการใช้วาล์วชนิด Globe Valve ทองเหลือง เป็นวาล์วที่สามารถปรับอัตราการใช้ได้ มีหน้าที่ควบคุมปริมาณอัตราการใช้ของน้ำทางเข้าหอบระบายความร้อน ตามปริมาณอัตราการใช้ที่ต่าง ๆ ที่กำหนดไว้ใน การทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



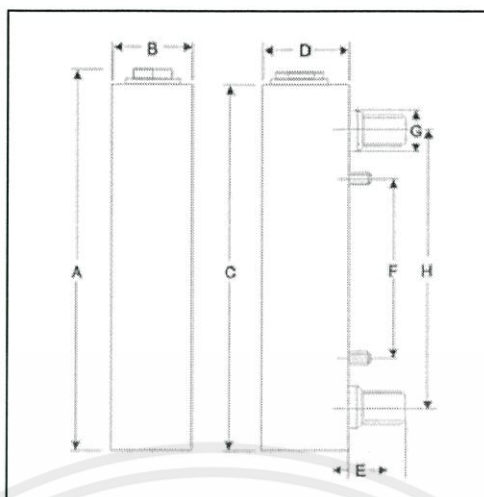
รูปที่ 3.9 วาล์วปรับอัตราการไหล

- 3) โรตاميเตอร์เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับวัดอัตราการไหลของน้ำ สามารถวัดอัตราการไหลได้ตั้งแต่ 2 l/min ถึง 18 l/min ในชุดทดสอบระบายความร้อนนี้มีหน้าที่วัดและแสดงค่าอัตราการไหลของน้ำทางเข้าหอรบายความร้อน โดยค่าจะเปลี่ยนแปลงขึ้นลงตามการปรับอัตราการไหลของวาล์วปรับอัตราการไหล



รูปที่ 3.10 โรตاميเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 ขนาดของโรตاميเตอร์

ตารางที่ 3.11 The Installation Size of LZM Series[13]

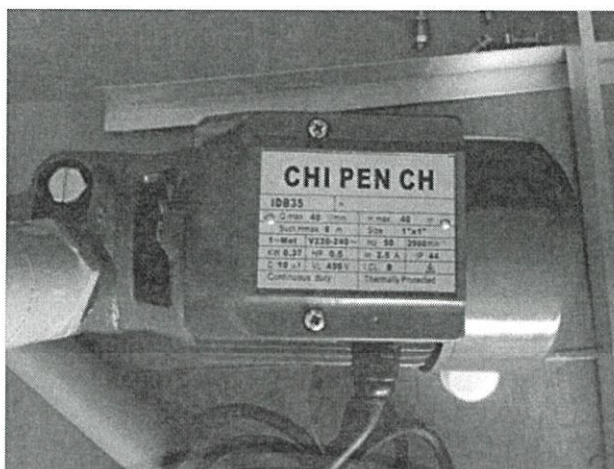
Model	Size (mm)							
	A	B	C	D	E	F	G	H
LZM-15	216	32	206	37	36	100	28	165

ตารางที่ 3.12 Specification of LZM Series[13]

Model	Range LPM	Accuracy	Working Condition	
			Temp (Celcius)	Pressure (MPa)
LZM-15	2-18	4	0-60	Max 1

- 4) ป้อนน้ำเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สูบน้ำจากที่ต่ำขึ้นไปยังที่สูงเป็นแบบชนิดหอยโข่ง ในการชุดการทดสอบนี้จะนำป้อนน้ำมาใช้ในการสูบน้ำจากถังน้ำร้อนไปยังด้านบนของหอระบายความร้อน ซึ่งน้ำที่สูบไปจะเคลื่อนที่ผ่านวาล์วปรับอัตราการไหล โรตاميเตอร์ และหัวฉีด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

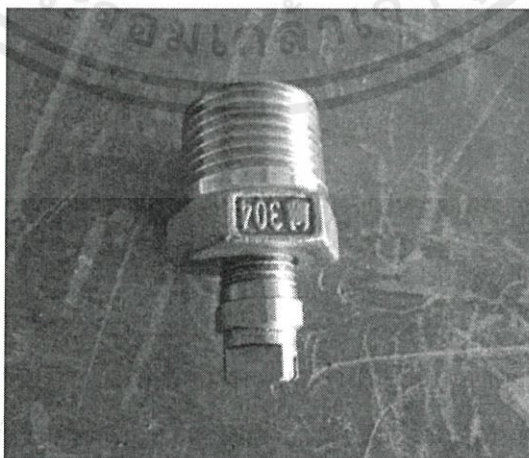


รูปที่ 3.12 ปั้มน้ำ

ตารางที่ 3.13 Specification of Pump

Q.max 40 l/min		H.max 40 m	
Suct.H.max 8 m		Size 1"x1"	
1~Mot	V220-240~	Hz 50	2900 min ⁻¹
KW 0.37	HP 0.5	In 2.5 A	IP 44
C 10 µf	VL 450 V	I.CL. B	-

- 5) หัวฉีด (Nozzle) เป็นอุปกรณ์กระจายน้ำที่อาศัยแรงดันของน้ำที่เข้ามา มีมุมฉีดของน้ำเท่ากับ 15° มีหน้าที่กระจายน้ำร้อนที่ปั้มน้ำสูบขึ้นมาจากถังน้ำร้อนเข้าสู่หอระบายความร้อน ให้น้ำร้อนที่เข้าหอระบายความร้อนกระจายทั่วแผงขยายฟิล์มน้ำ

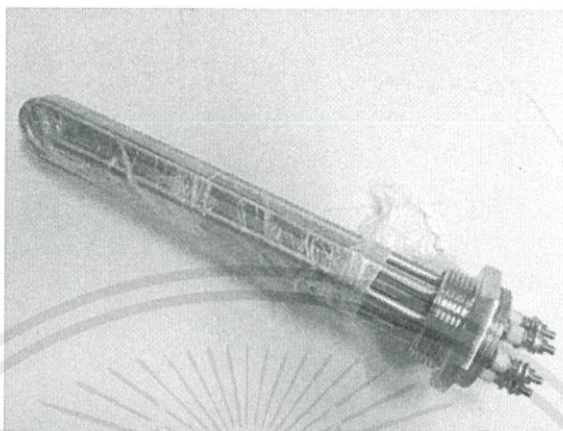


รูปที่ 3.13 หัวฉีด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้

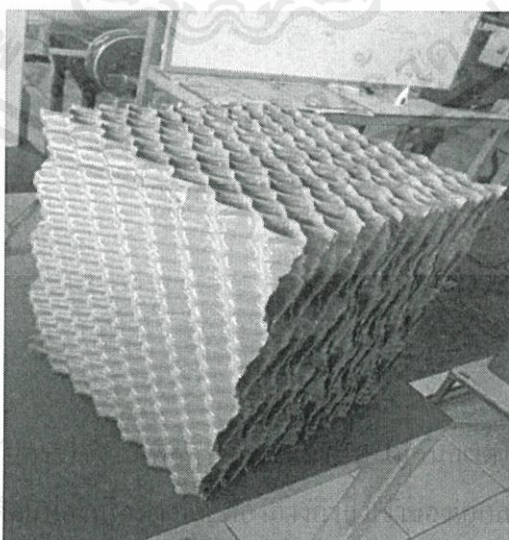
นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
หรือทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 6) ฮีตเตอร์ (Heater) ขนาด 2 kW เป็นอุปกรณ์ทำความร้อน มีหน้าที่ทำความร้อนให้น้ำในถังน้ำร้อน เพื่ออุ่นน้ำให้ร้อนตามอุณหภูมิที่กำหนดไว้



รูปที่ 3.14 ฮีตเตอร์

- 7) แผงขยายฟิล์มน้ำ (Fill) เป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่สุดของหอระบายความร้อน เนื่องจากเป็นส่วนที่ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนจากน้ำสู่อากาศ โดยแผงขยายฟิล์มน้ำมีหน้าที่สองส่วน ส่วนแรกคือเพิ่มพื้นที่และเวลาที่สัมผัสกันระหว่างน้ำกับอากาศ ส่วนที่สองคือทำให้น้ำที่ไหลผ่านเกิดฟิล์มน้ำบางๆ เคลือบอยู่บนแผงขยายฟิล์มน้ำ โดยแผงขยายฟิล์มน้ำนี้จะทำงานอย่างมีประสิทธิภาพก็ต่อเมื่อระบบการกระจายน้ำกระจายน้ำได้ทั่วพื้นที่หน้าตัดของแผงขยายฟิล์มน้ำ และอากาศที่ไหลผ่านต้องไหลสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดของแผงขยายฟิล์มน้ำ โดยแผงขยายฟิล์มน้ำที่ใช้เป็นรุ่น CF-1900 ชนิดไหลสวนทาง

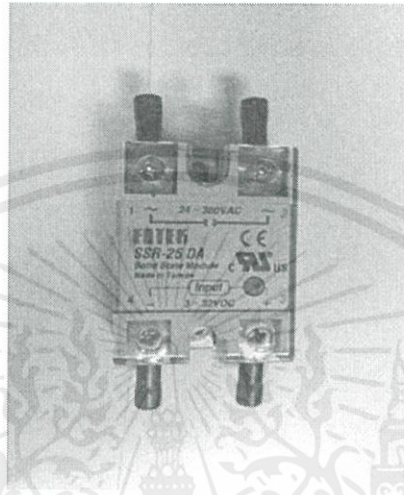


รูปที่ 3.15 แผงขยายฟิล์มน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้

ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
การทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 8) โซลิดสเตทรีเลย์ (Solid State Relay) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เชื่อมต่อระหว่างภาคควบคุมซึ่งเป็นส่วนวงจรอิเล็กทรอนิกส์ กับวงจรภาคไฟฟ้ากำลัง โดยที่ภาคทั้งสองจะมีระบบกราวด์ที่แยกออกจากกันทำให้สามารถป้องกันการลัดวงจรและการรบกวนซึ่งกันและกันได้



รูปที่ 3.16 โซลิดสเตทรีเลย์

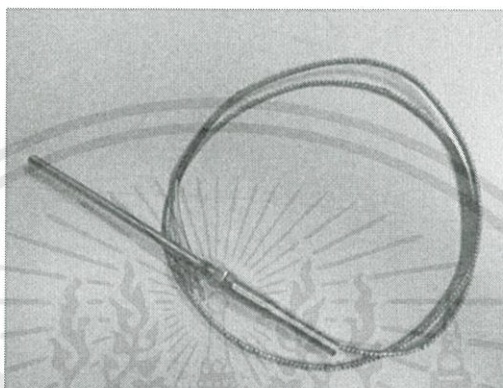
- 9) เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller) เป็นตัวควบคุมอุณหภูมิ โดยมีหัววัดอุณหภูมิ ทำหน้าที่วัดอุณหภูมิส่งมาที่เครื่องควบคุมอุณหภูมิหากอุณหภูมิไม่ได้ตามที่ตั้งไว้เครื่องควบคุมอุณหภูมิจะจ่ายแรงดันไปให้ฮีตเตอร์เพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้ได้ตามที่ต้องการ



รูปที่ 3.17 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูอาจารย์เท่านั้น หากท่านนำออกไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 10) PT100 Temperature Sensor RTD เป็นอุปกรณ์ที่ตรวจจับอุณหภูมิ โดยใช้ตัวต้านทาน ซึ่งเป็นหนึ่งในประเภทของ RTD (Resistance Temperature Detector) โดยที่ PT100 จะมีความต้านทานที่ 100 โอห์ม ที่ 0 °C และมีความต้านทานเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ในที่นี่เราจะใช้ในการวัดอุณหภูมิของน้ำทางเข้าและทางออก อุณหภูมิของอากาศทางเข้าและทางออก



รูปที่ 3.18 PT100 Temperature Sensor RTD

ตารางที่ 3.14 Specification of PT100 Temperature Sensor RTD[14]

Model	Type	Probe material	Probe length	Probe diameter	Cable length	Temperature range
SN-WZPT03	PT100	Stainless steel	10cm	5mm	2m	0~400 °C

- 11) Automatic switching function of 5 point temperature indicator เป็นเครื่องที่ใช้แสดงค่าอุณหภูมิที่วัดได้จาก RTD แต่ละอัน ในเครื่องนี้สามารถรับสัญญาณจาก RTD ได้ 5 อัน การแสดงค่า 5 จุด โดยจุดที่ 1 แสดงค่าอุณหภูมิของน้ำทางออก จุดที่ 2 แสดงค่าอุณหภูมิของกระเปาะแห้งของอากาศทางเข้า จุดที่ 3 แสดงค่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศทางเข้า จุดที่ 4 แสดงค่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศทางออก และจุดที่ 5 แสดงค่าอุณหภูมิของกระเปาะเปียกของอากาศทางออก

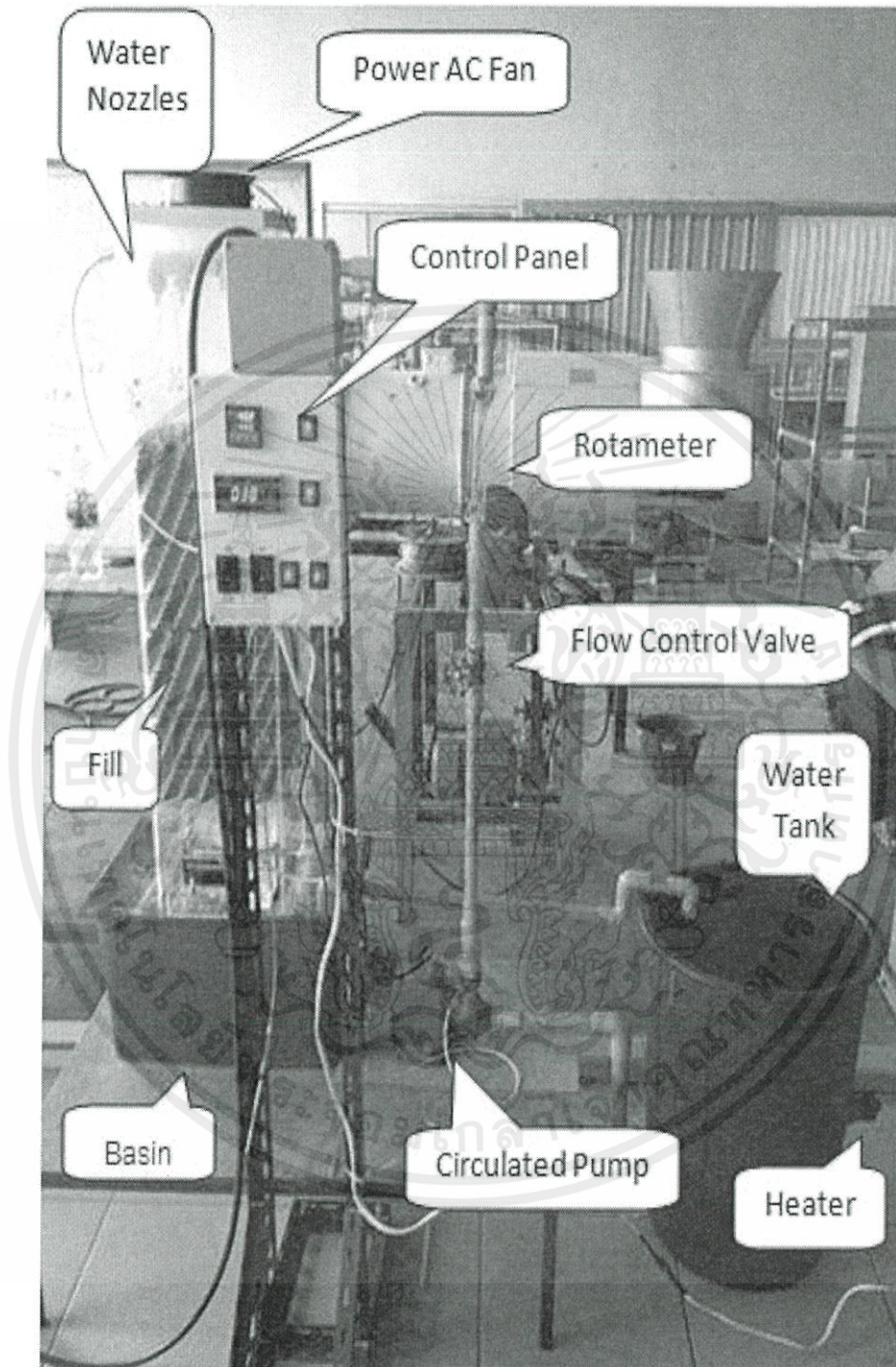
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 Automatic switching function of 5 point temperature indicator

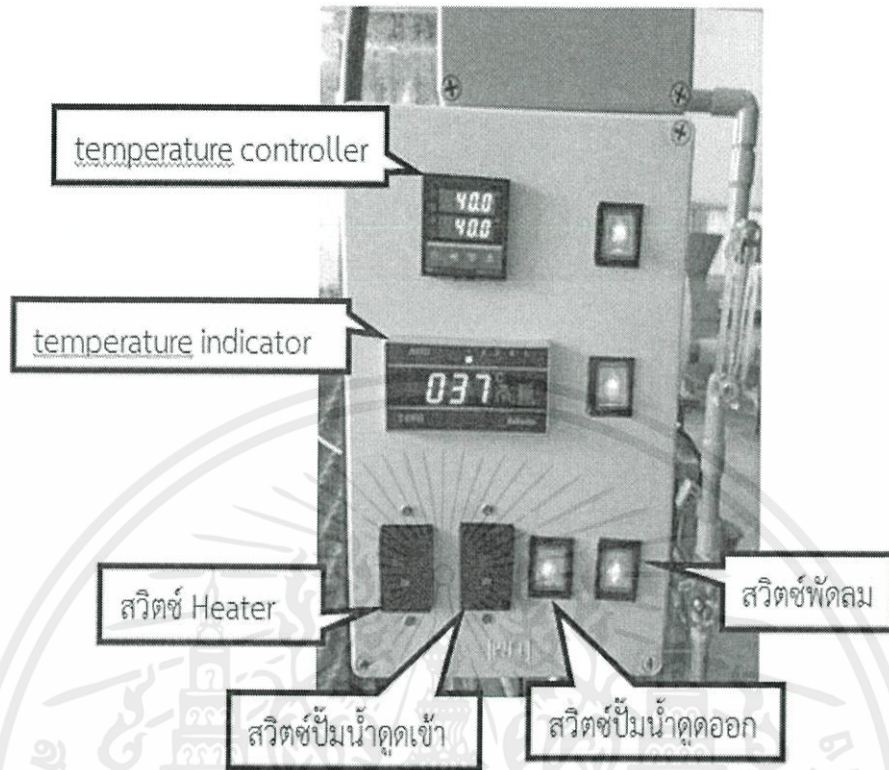
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 ชุดทดลอง



รูปที่ 3.20 ชุดทดลองจำลองการทำงานของหอระบายความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



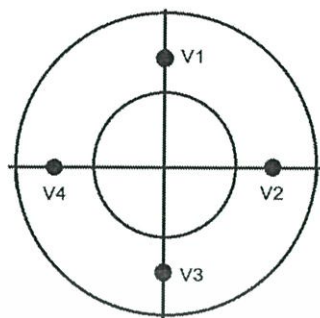
รูปที่ 3.21 ชุดอุปกรณ์ควบคุม

3.5 ขั้นตอนการทดลอง

1. เปิดสวิตซ์ที่ควบคุมการทำงานของฮีตเตอร์เพื่อเริ่มการทำงานของฮีตเตอร์และตั้งค่าอุณหภูมิของน้ำที่เครื่องควบคุมอุณหภูมิไปที่ 40 °C รอจนน้ำในถังมีอุณหภูมิเพิ่มจนถึง 40 °C โดยดูค่าจากเครื่องควบคุมอุณหภูมิ
2. เปิดสวิตซ์ที่ควบคุมการทำงานของปั๊มเพื่อให้ปั๊มเริ่มสูบน้ำจากถังเก็บน้ำร้อนเข้าหอระบายความร้อน
3. ปรับอัตราการไหลของน้ำที่ทางเข้าหอระบายความร้อนที่วาล์วปรับอัตราการไหลไปที่ 2 l/min โดยดูค่าอัตราการไหลของน้ำที่โรตาริเตอร์ คำนวณอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำ, L (kg/s) (กำหนดความหนาแน่นของน้ำ, $\rho = 992.22 \text{ kg/m}^3$) และจดบันทึกค่าลงในตารางบันทึกข้อมูลผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ $L = \frac{(l/min) \times 10^{-3} \times \rho}{60}$ กรุณาอย่าให้นำไปใช้ประโยชน์ด้วยวิธีการอื่น (3.3) ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เปิดสวิตซ์พัดลมดูดอากาศ วัดอุณหภูมิกระเปาะแห้งและอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศทางเข้าและจดบันทึกค่าลงในตารางบันทึกข้อมูลผลการทดลอง



รูปที่ 3.22 แสดงตำแหน่งการวัดความเร็วของอากาศทางออก

$V_{เฉลี่ย} = (v_1 + v_2 + v_3 + v_4) / 4$ พื้นที่ทางออกพัดลมที่อากาศไหลออกเท่ากับ 0.0118 m^2

คำนวณหาอัตราการไหลเชิงปริมาตร $V = V_{เฉลี่ย} \times A$ ในหน่วย (m^3/s)

คำนวณเปลี่ยนให้เป็นอัตราการไหลของอากาศเชิงมวล $G = V \times \rho$ (ความหนาแน่นของอากาศ, $\rho = 1.165 \text{ kg/m}^3$)

5. เดินเครื่องอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady state) ซึ่งสังเกตได้จากอุณหภูมิของน้ำทางเข้าและออกของหอระบายความร้อนเริ่มมีค่าที่คงที่ และจดบันทึกค่าอุณหภูมิ น้ำทางออกของหอระบายความร้อนลงในตารางบันทึกข้อมูลการทดลอง
6. นำค่าจากตารางบันทึกข้อมูลการทดลองมาหาสมการบ่งลักษณะเฉพาะ
7. ปรับอัตราการไหลของน้ำทางเข้าหอระบายความร้อนเท่ากับ 3.0, 4.0, 5.0 และ 6.0 L/min บันทึกค่าที่ได้ลงในตารางบันทึกข้อมูลผลการทดลองและทำการทดลองซ้ำในข้อ 5
8. นำค่าจากตารางบันทึกข้อมูลผลการทดลองแทนค่าลงในสมการบ่งลักษณะเฉพาะในข้อที่ 6
9. นำค่า KaV/L กับ L/G ที่ได้ทั้งหมดมาสร้างกราฟสมรรถนะการใช้งาน และคำนวณหาค่าขีดความสามารถของหอระบายความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางบันทึกข้อมูลการทดลอง

อุณหภูมิอากาศทางเข้า (°C)	
อุณหภูมิกระเปาะเปียกทางเข้า, T_{wb} (°C)	
ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)	

ตาราง บันทึกข้อมูลผลการทดลองครั้งที่ 1

อัตราการไหลของน้ำที่ 2 l/min	
รายละเอียดการทดลอง	ค่าที่ได้
อุณหภูมิน้ำทางเข้า, T_1 (°C)	40 °C
ความหนาแน่นของน้ำทางเข้า (kg/m^3)	992.22
อัตราการไหลของน้ำ (l/min)	2.0
อัตราการไหลโดยมวลของน้ำ, L (kg/s)	
อัตราการไหลโดยมวลของอากาศ, G (kg/s)	
อัตราส่วนอัตราการไหล, L/G	
อุณหภูมิน้ำทางออก, T_2 (°C)	

ตาราง บันทึกข้อมูลผลการทดลองครั้งที่ 2

อัตราการไหลของน้ำที่ 3.0 l/min	
รายละเอียดการทดลอง	ค่าที่ได้
อุณหภูมิน้ำทางเข้า, T_1 (°C)	40 °C
ความหนาแน่นของน้ำทางเข้า (kg/m^3)	992.22
อัตราการไหลของน้ำ (l/min)	3.0
อัตราการไหลโดยมวลของน้ำ, L (kg/s)	
อัตราการไหลโดยมวลของอากาศ, G (kg/s)	
อัตราส่วนอัตราการไหล, L/G	
อุณหภูมิน้ำทางออก, T_2 (°C)	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง บันทึกข้อมูลผลการทดลองครั้งที่ 3

อัตราการไหลของน้ำที่ 4.0 L/min	
รายละเอียดการทดลอง	ค่าที่ได้
อุณหภูมิน้ำทางเข้า, T_1 (°C)	40 °C
ความหนาแน่นของน้ำทางเข้า (kg/m^3)	992.22
อัตราการไหลของน้ำ (L/min)	4.0
อัตราการไหลโดยมวลของน้ำ, L (kg/s)	
อัตราการไหลโดยมวลของอากาศ, G (kg/s)	
อัตราส่วนอัตราการไหล, L/G	
อุณหภูมิน้ำทางออก, T_2 (°C)	

ตาราง บันทึกข้อมูลผลการทดลองครั้งที่ 4

อัตราการไหลของน้ำที่ 5.0 L/min	
รายละเอียดการทดลอง	ค่าที่ได้
อุณหภูมิน้ำทางเข้า, T_1 (°C)	40 °C
ความหนาแน่นของน้ำทางเข้า (kg/m^3)	992.22
อัตราการไหลของน้ำ (L/min)	5.0
อัตราการไหลโดยมวลของน้ำ, L (kg/s)	
อัตราการไหลโดยมวลของอากาศ, G (kg/s)	
อัตราส่วนอัตราการไหล, L/G	
อุณหภูมิน้ำทางออก, T_2 (°C)	

ตาราง บันทึกข้อมูลผลการทดลองครั้งที่ 5

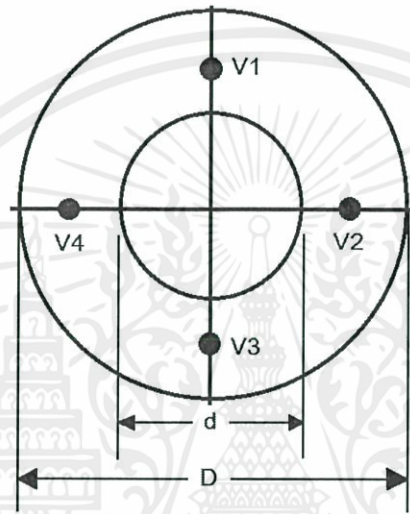
อัตราการไหลของน้ำที่ 6.0 L/min	
รายละเอียดการทดลอง	ค่าที่ได้
อุณหภูมิน้ำทางเข้า, T_1 (°C)	40 °C
ความหนาแน่นของน้ำทางเข้า (kg/m^3)	992.22
อัตราการไหลของน้ำ (L/min)	6.0
อัตราการไหลโดยมวลของน้ำ, L (kg/s)	
อัตราการไหลโดยมวลของอากาศ, G (kg/s)	
อัตราส่วนอัตราการไหล, L/G	
อุณหภูมิน้ำทางออก, T_2 (°C)	

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ข้อมูลผลการทดลอง

ทำการวัดหาอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ผ่านหอระบายความร้อน



รูปที่ 4.1 แสดงตำแหน่งการวัดความเร็วของอากาศทางออก

ความเร็วของอากาศ จุดที่ 1 = 4.00 m/s, จุดที่ 2 = 4.05 m/s, จุดที่ 3 = 4.40 m/s, จุดที่ 4 = 4.30 m/s

ความเร็วของอากาศเฉลี่ย = $(4.00 + 4.05 + 4.40 + 4.30)/4 = 4.1875$ m/s

พื้นที่ทางออกพัดลมที่อากาศไหลออก

กำหนด D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางขอบนอกของพัดลม = 0.1450 m

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางขอบในของพัดลม = 0.0775 m

$$A_{fan} = \left[(\pi) \left(\frac{D^2}{4} - \frac{d^2}{4} \right) \right] = \left[(\pi) \left(\frac{0.1450^2}{4} - \frac{0.0775^2}{4} \right) \right] = 0.0118 \text{ m}^2$$

$$V = v_{เฉลี่ย} \times A = (4.1875)(0.0118) = 0.0494 \text{ m}^3/\text{s}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ $\rho_{ao} = \frac{P_{atm}}{R \times T_{ao}} = \frac{101.3 \times 10^3}{287 \times 298.5} = 1.1536 \text{ kg/m}^3$ ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G_{test} = V \times \rho = (0.0494)(1.1536) = 0.057 \text{ kg/s}$$

ตารางที่ 4.1 ตารางบันทึกข้อมูลการทดลอง

อุณหภูมิอากาศทางเข้า (°C)	32
อุณหภูมิกระเปาะเปียกทางเข้า, T_{wb} (°C)	27
ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)	68

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลผลการทดลองครั้งที่ 1

อัตราการไหลของน้ำที่ 2 L/min	
รายละเอียดการทดลอง	ค่าที่ได้
อุณหภูมิน้ำทางเข้า, T_1 (°C)	40 °C
ความหนาแน่นของน้ำทางเข้า (kg/m^3)	992.22
อัตราการไหลของน้ำ (L/min)	2.0
อัตราการไหลโดยมวลของน้ำ, L (kg/s)	0.0331
อัตราการไหลโดยมวลของอากาศ, G (kg/s)	0.057
อัตราส่วนอัตราการไหล, L/G	0.581
อุณหภูมิน้ำทางออก, T_2 (°C)	37

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลผลการทดลองครั้งที่ 2

อัตราการไหลของน้ำที่ 3.0 L/min	
รายละเอียดการทดลอง	ค่าที่ได้
อุณหภูมิน้ำทางเข้า, T_1 (°C)	40 °C
ความหนาแน่นของน้ำทางเข้า (kg/m^3)	992.22
อัตราการไหลของน้ำ (L/min)	3.0
อัตราการไหลโดยมวลของน้ำ, L (kg/s)	0.0496
อัตราการไหลโดยมวลของอากาศ, G (kg/s)	0.057
อัตราส่วนอัตราการไหล, L/G	0.870
อุณหภูมิน้ำทางออก, T_2 (°C)	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ข้อมูลผลการทดลองครั้งที่ 3

อัตราการไหลของน้ำที่ 4.0 L/min	
รายละเอียดการทดลอง	ค่าที่ได้
อุณหภูมิน้ำทางเข้า, T_1 (°C)	40 °C
ความหนาแน่นของน้ำทางเข้า (kg/m^3)	992.22
อัตราการไหลของน้ำ (L/min)	4.0
อัตราการไหลโดยมวลของน้ำ, L (kg/s)	0.0661
อัตราการไหลโดยมวลของอากาศ, G (kg/s)	0.057
อัตราส่วนอัตราการไหล, L/G	1.160
อุณหภูมิน้ำทางออก, T_2 (°C)	37.5

ตารางที่ 4.5 ข้อมูลผลการทดลองครั้งที่ 4

อัตราการไหลของน้ำที่ 5.0 L/min	
รายละเอียดการทดลอง	ค่าที่ได้
อุณหภูมิน้ำทางเข้า, T_1 (°C)	40 °C
ความหนาแน่นของน้ำทางเข้า (kg/m^3)	992.22
อัตราการไหลของน้ำ (L/min)	5.0
อัตราการไหลโดยมวลของน้ำ, L (kg/s)	0.0827
อัตราการไหลโดยมวลของอากาศ, G (kg/s)	0.057
อัตราส่วนอัตราการไหล, L/G	1.451
อุณหภูมิน้ำทางออก, T_2 (°C)	37.5

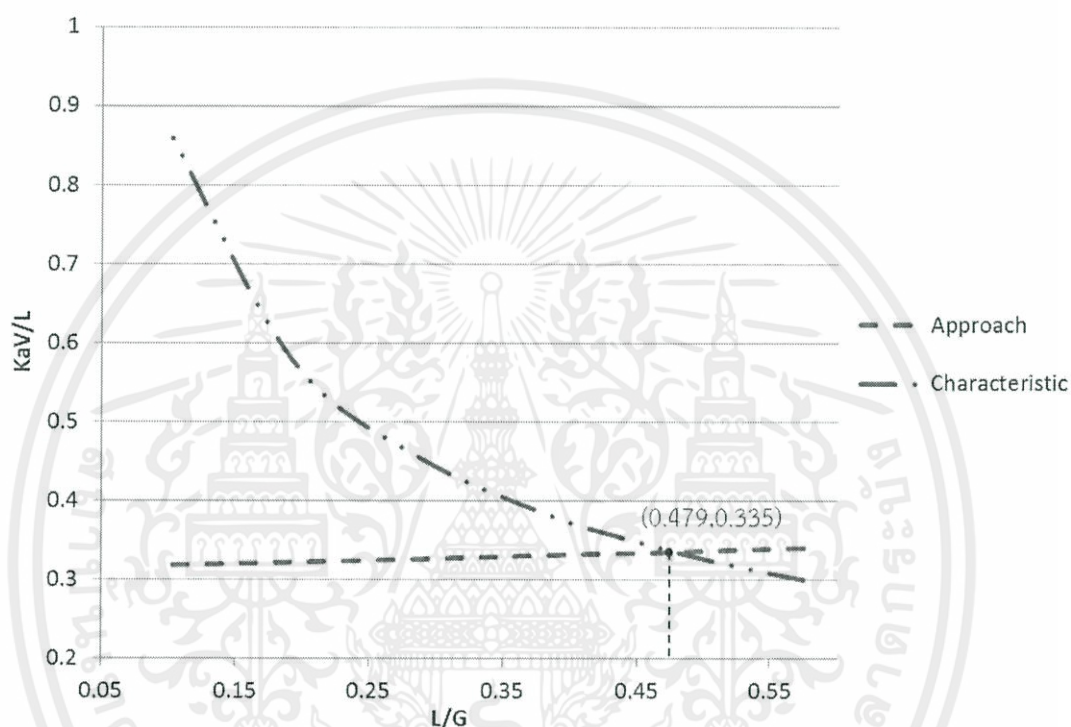
ตารางที่ 4.6 ข้อมูลผลการทดลองครั้งที่ 5

อัตราการไหลของน้ำที่ 6.0 L/min	
รายละเอียดการทดลอง	ค่าที่ได้
อุณหภูมิน้ำทางเข้า, T_1 (°C)	40 °C
ความหนาแน่นของน้ำทางเข้า (kg/m^3)	992.22
อัตราการไหลของน้ำ (L/min)	6.0
อัตราการไหลโดยมวลของน้ำ, L (kg/s)	0.0992
อัตราการไหลโดยมวลของอากาศ, G (kg/s)	0.057
อัตราส่วนอัตราการไหล, L/G	1.740
อุณหภูมิน้ำทางออก, T_2 (°C)	38

4.2 คำนวณหาสมรรถนะของหอบายความร้อนของแต่ละอัตราการไหลของน้ำ

สร้างเส้นลักษณะเฉพาะของค่าทดสอบ

นำผลที่ได้มาคำนวณหาค่า $(KaV/L)_{test}$ ของแต่ละอัตราการไหลแล้วนำค่าไปสร้างสมการบ่งลักษณะเฉพาะแล้วสร้างเส้นลักษณะเฉพาะของค่าทดสอบของแต่ละอัตราการไหลแล้วนำไปพล็อตลงในกราฟลักษณะเฉพาะและกราฟแอฟโพรชของค่าออกแบบ



รูปที่ 4.2 กราฟลักษณะเฉพาะและกราฟแอฟโพรชของค่าออกแบบ

เพื่อหาจุดทดสอบ $(L/G)_{test}$ ซึ่งได้จากจุดตัดของเส้นลักษณะเฉพาะของค่าทดสอบกับเส้นแอฟโพรช จากนั้นนำ จุดออกแบบ $(L/G)_{design}$ และจุดทดสอบ $(L/G)_{test}$ ที่ได้มาคำนวณหาขีดความสามารถของหอบายความร้อนของแต่ละอัตราการไหลจากสมการ (3.2)

$$\text{ขีดความสามารถของหอบายความร้อน} = \frac{(L/G)_{test}}{(L/G)_{design}} \times 100\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่อัตราการไหลของน้ำ, $\bar{L} = 2 \text{ V/min}$

คำนวณหาค่า $(KaV/L)_{\text{test}}$ ที่ $\bar{L} = 2 \text{ V/min}$

อัตราการไหลของน้ำ, $L = 0.0331 \text{ kg/s}$

อัตราการไหลของอากาศ, $G = 0.057 \text{ kg/s}$

อัตราส่วนอัตราการไหล, $L/G = 0.581$

อุณหภูมิน้ำทางเข้า, $T_1 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$

อุณหภูมิน้ำทางออก, $T_2 = 37 \text{ }^\circ\text{C}$

ตารางที่ 4.7 คำนวณค่า $1/\Delta h$ ตามวิธีของเขบายเชฟฟ์ เมื่ออัตราการไหลของน้ำ 2 V/min

อุณหภูมิของน้ำ ($^\circ\text{C}$)	h_w , เอนทัลปีของอากาศอิ่มตัว (kJ/kg dry air)	h , เอนทัลปีของอากาศชื้น (kJ/kg dry air)	$\Delta h = h_w - h$	$1/\Delta h$
$T_2 = 37 \text{ }^\circ\text{C}$	-	ที่ $(T_{wb})_{ai} = 27 \text{ }^\circ\text{C}$, $h_1 = 85.03w$	-	-
$T_A = T_2 + 0.1(T_1 - T_2) = 37.3 \text{ }^\circ\text{C}$	144.98	$h_A = h_1 + 0.1C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 85.76$	59.22	0.0169
$T_B = T_2 + 0.4(T_1 - T_2) = 38.2 \text{ }^\circ\text{C}$	151.70	$h_B = h_1 + 0.4C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 87.94$	63.76	0.0157
$T_C = T_2 + 0.6(T_1 - T_2) = 38.8 \text{ }^\circ\text{C}$	156.35	$h_C = h_1 + 0.6C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 89.40$	66.95	0.0149
$T_D = T_2 + 0.9(T_1 - T_2) = 39.7 \text{ }^\circ\text{C}$	163.59	$h_D = h_1 + 0.9C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 91.59$	72.00	0.0139
$T_1 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$	-	$h_2 = h_1 + C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 92.32$	-	-
				$\Sigma(1/\Delta h) = 0.0614$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในทางอื่น

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามนำไปใช้ต่อจากหน่วยงานและต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{KaV}{L} = \frac{C_L(T_1 - T_2)}{4} \sum \left(\frac{1}{\Delta h} \right) = \frac{4.18(40 - 37)}{4} (0.0614)$$

$$\left(\frac{KaV}{L}\right)_{\text{test}} \frac{L}{G}=0.581 = 0.193$$

สร้างสมการบ่งลักษณะเฉพาะ

$$\frac{KaV}{L} = C \left(\frac{L}{G}\right)^{-0.6} \quad (\text{กำหนด } n = -0.6)$$

แทนค่า $\left(\frac{KaV}{L}\right)_{\text{test}} = 0.193$ และ $\left(\frac{L}{G}\right)_{\text{test}} = 0.581$ ในสมการ

จะได้ $0.193 = C(0.581)^{-0.6}$

$$C = 0.1393$$

จะได้สมการบ่งลักษณะเฉพาะ

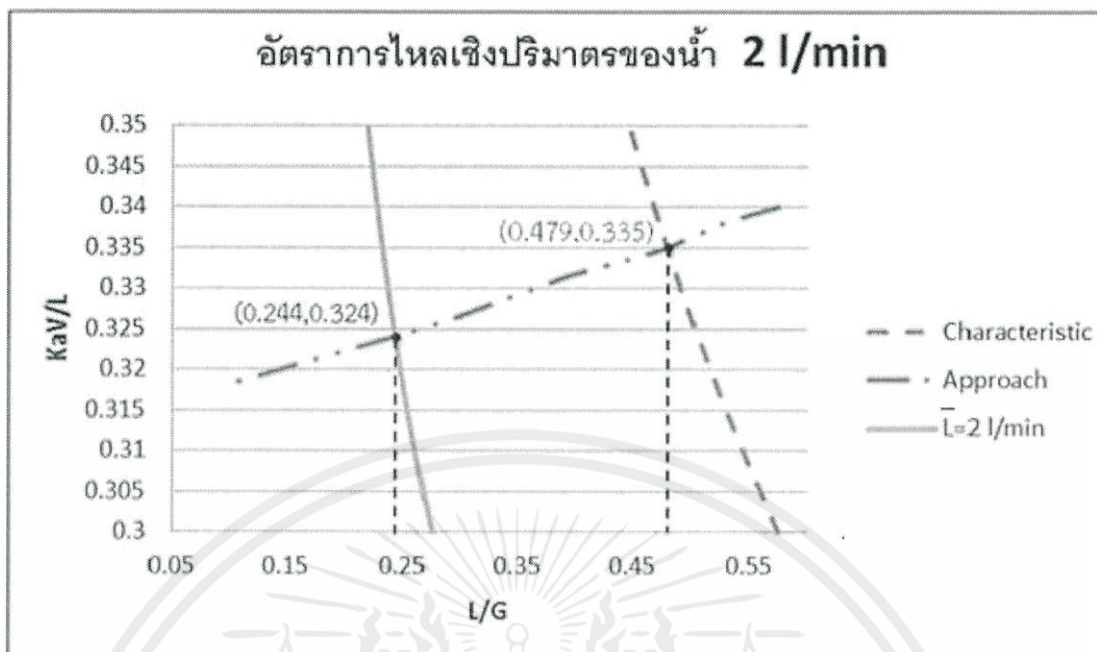
$$\frac{KaV}{L} = 0.1393 \left(\frac{L}{G}\right)^{-0.6} \quad (4.1)$$

ตารางที่ 4.8 ค่า $(KaV/L)_{\text{test}}$ ที่ $(L/G)_{\text{test}}$ ค่าต่างๆ

% ของอัตราส่วนการไหลของ ค่าทดสอบ ($L/G=0.581$)	ค่า L/G ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ	KaV/L จากสมการ (4.1)
120	0.697	0.173
110	0.639	0.182
100	0.581	0.193
90	0.523	0.206
80	0.465	0.221
60	0.349	0.262
40	0.232	0.335
20	0.116	0.507

นำค่าในตารางไปสร้างเส้นลักษณะเฉพาะของค่าทดสอบในกราฟของเส้นลักษณะเฉพาะและเส้นแอฟโพรชของค่าออกแบบเพื่อค่าขีดจำกัดความสามารถของหอระบายความร้อนที่อัตราการไหลของน้ำทางเข้าเท่ากับ 2 U/min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จากกราฟจะได้

จุดตัดของเส้นลักษณะเฉพาะของค่าออกแบบกับเส้นแอฟโพรชของค่าออกแบบ, $(L/G)_{design}$

คือ 0.479

จุดตัดของเส้นลักษณะเฉพาะของค่าทดสอบกับเส้นแอฟโพรชของค่าออกแบบ, $(L/G)_{test}$ คือ

0.244

$$\text{ขีดความสามารถของหระบายความร้อน} = \frac{(L/G)_{test}}{(L/G)_{design}} \times 100\%$$

$$\text{ขีดความสามารถของหระบายความร้อน} = \frac{0.244}{0.479} \times 100\%$$

$$\text{ขีดความสามารถของหระบายความร้อน} = 50.94 \%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่อัตราการไหลของน้ำ, $\bar{L} = 3 \text{ L/min}$

คำนวณหาค่า $(KaV/L)_{\text{test}}$ ที่ $\bar{L} = 3 \text{ L/min}$

อัตราการไหลของน้ำ, $L = 0.0496 \text{ kg/s}$

อัตราการไหลของอากาศ, $G = 0.057 \text{ kg/s}$

อัตราส่วนอัตราการไหล, $L/G = 0.870$

อุณหภูมิน้ำทางเข้า, $T_1 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$

อุณหภูมิน้ำทางออก, $T_2 = 37 \text{ }^\circ\text{C}$

ตารางที่ 4.9 คำนวณค่า $1/\Delta h$ ตามวิธีของเขบายเชฟฟ์ เมื่ออัตราการไหลของน้ำ 3 L/min

อุณหภูมิของน้ำ ($^\circ\text{C}$)	h_w , เอนทัลปีของอากาศอิ่มตัว (kJ/kg dry air)	h , เอนทัลปีของอากาศชื้น (kJ/kg dry air)	$\Delta h = h_w - h$	$1/\Delta h$
$T_2 = 37 \text{ }^\circ\text{C}$	-	ที่ $(T_{wb})_{ai} = 27 \text{ }^\circ\text{C}$, $h_1 = 85.03$	-	-
$T_A = T_2 + 0.1(T_1 - T_2) = 37.3 \text{ }^\circ\text{C}$	144.98	$h_A = h_1 + 0.1C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 86.12$	58.86	0.0170
$T_B = T_2 + 0.4(T_1 - T_2) = 38.2 \text{ }^\circ\text{C}$	151.70	$h_B = h_1 + 0.4C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 89.39$	62.31	0.0160
$T_C = T_2 + 0.6(T_1 - T_2) = 38.8 \text{ }^\circ\text{C}$	156.35	$h_C = h_1 + 0.6C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 91.58$	64.77	0.0154
$T_D = T_2 + 0.9(T_1 - T_2) = 39.7 \text{ }^\circ\text{C}$	163.59	$h_D = h_1 + 0.9C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 94.85$	68.74	0.0145
$T_1 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$	-	$h_2 = h_1 + C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 95.94$	-	-
				$\Sigma(1/\Delta h) = 0.0629$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามนำไปตีพิมพ์ลงในสื่อออนไลน์และต้องอ้างอิงถึงชื่อเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{KaV}{L} = \frac{C_L(T_1 - T_2)}{4} \sum \left(\frac{1}{\Delta h} \right) = \frac{4.18(40 - 37)}{4} (0.0629)$$

$$\left(\frac{KaV}{L}\right)_{\text{test } \frac{L}{G}=0.870} = 0.198$$

สร้างสมการบ่งลักษณะเฉพาะ

$$\frac{KaV}{L} = C \left(\frac{L}{G}\right)^{-0.6} \quad (\text{กำหนด } n = -0.6)$$

แทนค่า $\left(\frac{KaV}{L}\right)_{\text{test}} = 0.198$ และ $\left(\frac{L}{G}\right)_{\text{test}} = 0.870$ ลงในสมการ

จะได้ $0.198 = C(0.870)^{-0.6}$

$$C = 0.1821$$

จะได้สมการบ่งลักษณะเฉพาะ

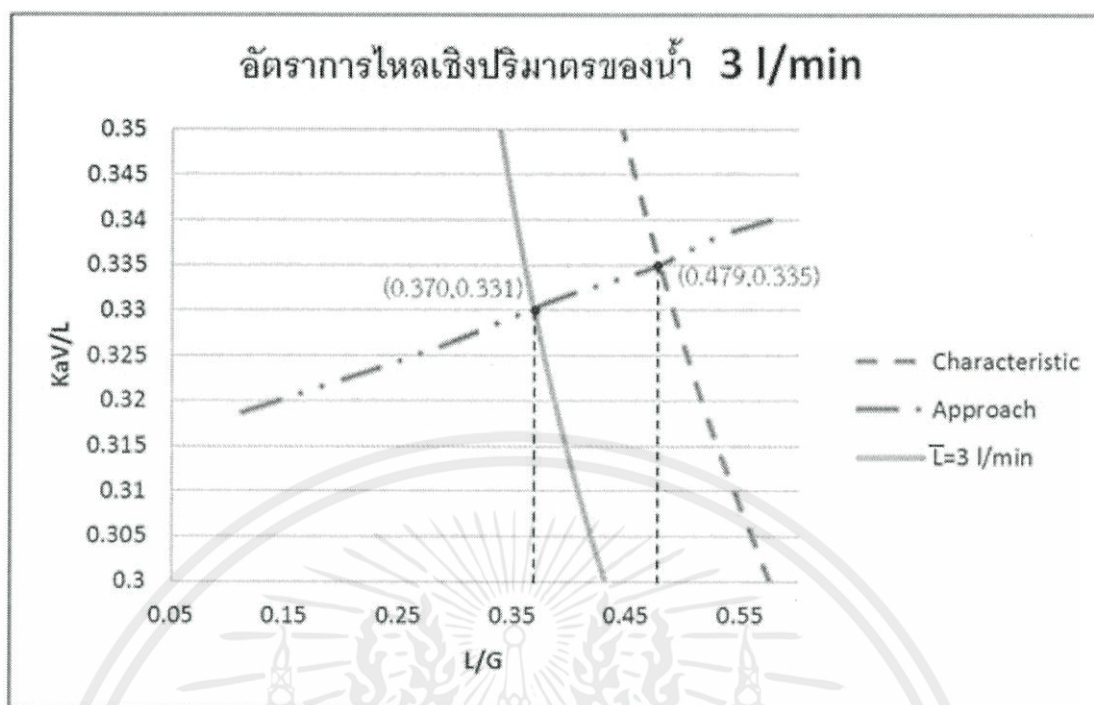
$$\frac{KaV}{L} = 0.1821 \left(\frac{L}{G}\right)^{-0.6} \quad (4.2)$$

ตารางที่ 4.10 ค่า $(KaV/L)_{\text{test}}$ ที่ $(L/G)_{\text{test}}$ ค่าต่างๆ

% ของอัตราส่วนการไหลของ ค่าทดสอบ ($L/G=0.870$)	ค่า L/G ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ	KaV/L จากสมการ (4.2)
120	1.044	0.177
110	0.957	0.187
100	0.870	0.198
90	0.783	0.211
80	0.696	0.226
60	0.522	0.269
40	0.348	0.343
20	0.174	0.520

นำค่าในตารางไปสร้างเส้นลักษณะเฉพาะของค่าทดสอบในกราฟของเส้นลักษณะเฉพาะและเส้นแอมไพโรซของค่าออกแบบเพื่อค่าขีดจำกัดความสามารถของหอระบายความร้อนที่อัตราการไหลของน้ำทางเข้าเท่ากับ 3 l/min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงจุด $(L/G)_{test}$ และ $(L/G)_{design}$ ที่ $\bar{L}=3$ l/min

จากกราฟจะได้

จุดตัดของเส้นลักษณะเฉพาะของค่าออกแบบกับเส้นแอฟไพร์ของค่าออกแบบ, $(L/G)_{design}$ คือ 0.479

จุดตัดของเส้นลักษณะเฉพาะของค่าทดสอบกับเส้นแอฟไพร์ของค่าออกแบบ, $(L/G)_{test}$ คือ 0.370

$$\text{ขีดความสามารถของหอระบายความร้อน} = \frac{(L/G)_{test}}{(L/G)_{design}} \times 100\%$$

$$\text{ขีดความสามารถของหอระบายความร้อน} = \frac{0.370}{0.479} \times 100\%$$

$$\text{ขีดความสามารถของหอระบายความร้อน} = 77.24 \%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่อัตราการไหลของน้ำ, $\bar{L} = 4 \text{ V/min}$

คำนวณหาค่า $(KaV/L)_{\text{test}}$ ที่ $\bar{L} = 4 \text{ V/min}$

อัตราการไหลของน้ำ, $L = 0.0661 \text{ kg/s}$

อัตราการไหลของอากาศ, $G = 0.057 \text{ kg/s}$

อัตราส่วนอัตราการไหล, $L/G = 1.160$

อุณหภูมิน้ำทางเข้า, $T_1 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$

อุณหภูมิน้ำทางออก, $T_2 = 37.5 \text{ }^\circ\text{C}$

ตารางที่ 4.11 คำนวณค่า $1/\Delta h$ ตามวิธีของเขบายเชฟฟ์ เมื่ออัตราการไหลของน้ำ 4 V/min

อุณหภูมิของน้ำ ($^\circ\text{C}$)	h_w , เอนทัลปีของอากาศอิ่มตัว (kJ/kg dry air)	h , เอนทัลปีของอากาศชื้น (kJ/kg dry air)	$\Delta h = h_w - h$	$1/\Delta h$
$T_2 = 37.5 \text{ }^\circ\text{C}$	-	ที่ $(T_{wb})_{ai} = 27 \text{ }^\circ\text{C}$, $h_1 = 85.03$	-	-
$T_A = T_2 + 0.1(T_1 - T_2) = 37.75 \text{ }^\circ\text{C}$	148.31	$h_A = h_1 + 0.1C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 86.24$	62.07	0.0161
$T_B = T_2 + 0.4(T_1 - T_2) = 38.50 \text{ }^\circ\text{C}$	153.84	$h_B = h_1 + 0.4C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 89.88$	63.96	0.0156
$T_C = T_2 + 0.6(T_1 - T_2) = 39.00 \text{ }^\circ\text{C}$	157.90	$h_C = h_1 + 0.6C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 92.30$	65.60	0.0152
$T_D = T_2 + 0.9(T_1 - T_2) = 39.75 \text{ }^\circ\text{C}$	164.00	$h_D = h_1 + 0.9C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 95.94$	68.06	0.0147
$T_1 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$	-	$h_2 = h_1 + C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 97.15$	-	-
				$\Sigma(1/\Delta h) = 0.0616$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{KaV}{L} = \frac{C_L(T_1 - T_2)}{4} \sum \left(\frac{1}{\Delta h} \right) = \frac{4.18(40 - 37.5)}{4} (0.0616)$$

$$\left(\frac{KaV}{L}\right)_{\text{test } \frac{L}{G}=1.160} = 0.161$$

สร้างสมการบ่งลักษณะเฉพาะ

$$\frac{KaV}{L} = C \left(\frac{L}{G}\right)^{-0.6} \quad (\text{กำหนด } n = -0.6)$$

แทนค่า $\left(\frac{KaV}{L}\right)_{\text{test}} = 0.161$ และ $\left(\frac{L}{G}\right)_{\text{test}} = 1.160$ ลงในสมการ

จะได้ $0.161 = C(1.160)^{-0.6}$

$$C = 0.1760$$

จะได้สมการบ่งลักษณะเฉพาะ

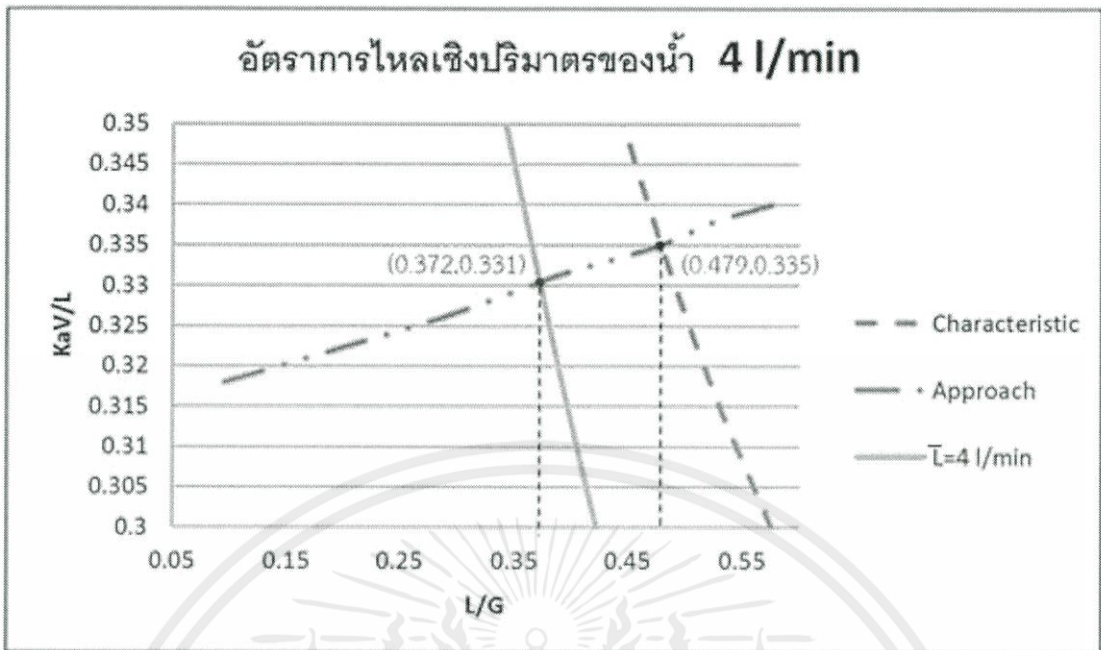
$$\frac{KaV}{L} = 0.1760 \left(\frac{L}{G}\right)^{-0.6} \quad (4.3)$$

ตารางที่ 4.12 แสดงค่า $(KaV/L)_{\text{test}}$ ที่ $(L/G)_{\text{test}}$ ค่าต่างๆ

% ของอัตราส่วนการไหลของ ค่าทดสอบ ($L/G=1.160$)	ค่า L/G ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ	KaV/L จากสมการ (4.3)
120	1.392	0.144
110	1.276	0.152
100	1.160	0.161
90	1.044	0.172
80	0.928	0.184
60	0.696	0.219
40	0.464	0.279
20	0.232	0.423

นำค่าในตารางไปสร้างเส้นลักษณะเฉพาะของค่าทดสอบในกราฟของเส้นลักษณะเฉพาะและเส้นแอฟโพรชของค่าออกแบบเพื่อค่าขีดจำกัดความสามารถของหอระบายความร้อนที่อัตราการไหลของน้ำทางเข้าเท่ากับ 4 L/min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงจุด $(L/G)_{test}$ และ $(L/G)_{design}$ ที่ $\bar{L} = 4$ l/min

จากกราฟจะได้

จุดตัดของเส้นลักษณะเฉพาะของค่าออกแบบกับเส้นแอฟไพร์ของค่าออกแบบ, $(L/G)_{design}$

คือ 0.479

จุดตัดของเส้นลักษณะเฉพาะของค่าทดสอบกับเส้นแอฟไพร์ของค่าออกแบบ, $(L/G)_{test}$ คือ

0.372

$$\text{ขีดความสามารถของหอระบายความร้อน} = \frac{(L/G)_{test}}{(L/G)_{design}} \times 100\%$$

$$\text{ขีดความสามารถของหอระบายความร้อน} = \frac{0.372}{0.479} \times 100\%$$

$$\text{ขีดความสามารถของหอระบายความร้อน} = 77.66 \%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่อัตราการไหลของน้ำ, $\bar{L} = 5 \text{ V/min}$

คำนวณหาค่า $(KaV/L)_{\text{test}}$ ที่ $\bar{L} = 5 \text{ V/min}$

อัตราการไหลของน้ำ, $L = 0.0827 \text{ kg/s}$

อัตราการไหลของอากาศ, $G = 0.0484 \text{ kg/s}$

อัตราส่วนอัตราการไหล, $L/G = 1.451$

อุณหภูมิน้ำทางเข้า, $T_1 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$

อุณหภูมิน้ำทางออก, $T_2 = 37.5 \text{ }^\circ\text{C}$

ตารางที่ 4.13 คำนวณค่า $1/\Delta h$ ตามวิธีของเชบายเชฟฟ์ เมื่ออัตราการไหลของน้ำ 5 V/min

อุณหภูมิของน้ำ ($^\circ\text{C}$)	h_w , เอนทัลปีของอากาศอิ่มตัว (kJ/kg dry air)	h , เอนทัลปีของอากาศชื้น (kJ/kg dry air)	$\Delta h = h_w - h$	$1/\Delta h$
$T_2 = 37.5 \text{ }^\circ\text{C}$	-	ที่ $(T_{wb})_{ai} = 27 \text{ }^\circ\text{C}$, $h_1 = 85.03$	-	-
$T_A = T_2 + 0.1(T_1 - T_2) = 37.75 \text{ }^\circ\text{C}$	148.31	$h_A = h_1 + 0.1C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 86.55$	61.76	0.0162
$T_B = T_2 + 0.4(T_1 - T_2) = 38.50 \text{ }^\circ\text{C}$	153.84	$h_B = h_1 + 0.4C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 91.10$	62.74	0.0159
$T_C = T_2 + 0.6(T_1 - T_2) = 39.00 \text{ }^\circ\text{C}$	157.90	$h_C = h_1 + 0.6C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 94.13$	63.77	0.0157
$T_D = T_2 + 0.9(T_1 - T_2) = 39.75 \text{ }^\circ\text{C}$	164.00	$h_D = h_1 + 0.9C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 98.68$	65.32	0.0153
$T_1 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$	-	$h_2 = h_1 + C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 100.19$	-	-
				$\Sigma(1/\Delta h) = 0.0631$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ศึกษาเท่านั้นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คัดแปลงเนื้อหาเอกสารให้อ่านง่ายและเข้าใจของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left(\frac{KaV}{L}\right)_{\text{test}} \frac{L}{G}=1.451 = 0.165$$

สร้างสมการบ่งลักษณะเฉพาะ

$$\frac{KaV}{L} = C \left(\frac{L}{G}\right)^{-0.6} \quad (\text{กำหนด } n = -0.6)$$

แทนค่า $\left(\frac{KaV}{L}\right)_{\text{test}} = 0.165$ และ $\left(\frac{L}{G}\right)_{\text{test}} = 1.451$ ลงในสมการ

จะได้ $0.165 = C(1.451)^{-0.6}$

$$C = 0.2063$$

จะได้สมการบ่งลักษณะเฉพาะ

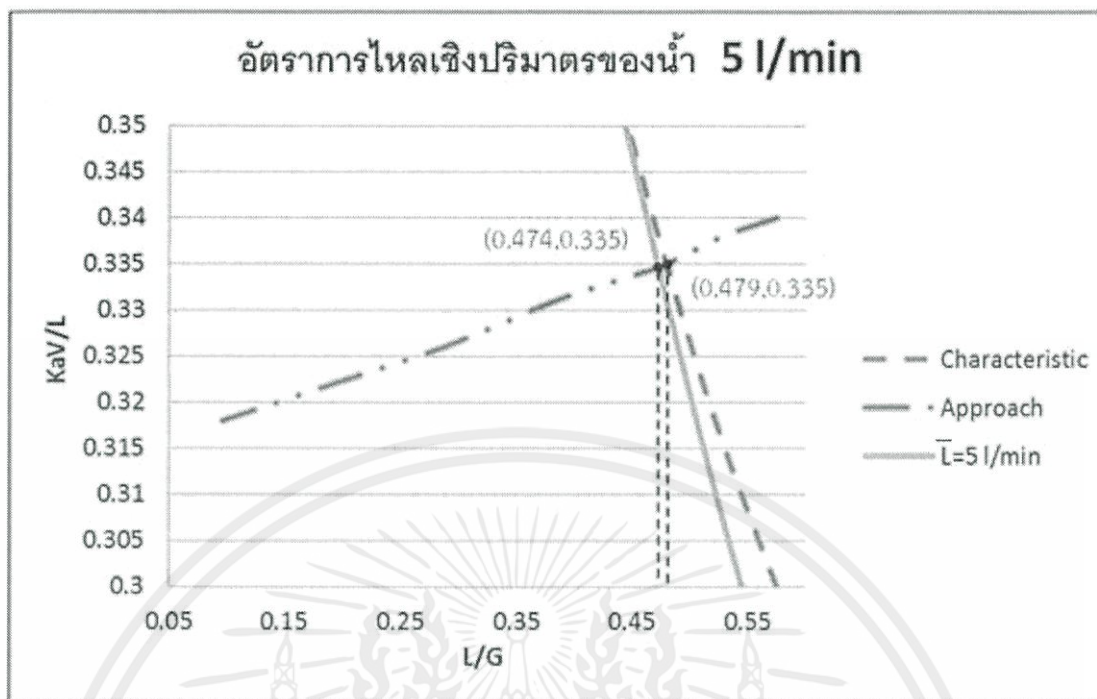
$$\frac{KaV}{L} = 0.2063 \left(\frac{L}{G}\right)^{-0.6} \quad (4.4)$$

ตารางที่ 4.14 ค่า $(KaV/L)_{\text{test}}$ ที่ $(L/G)_{\text{test}}$ ค่าต่างๆ

% ของอัตราส่วนการไหลของ ค่าทดสอบ ($L/G=1.451$)	ค่า L/G ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ	KaV/L จากสมการ (4.4)
120	1.741	0.148
110	1.596	0.156
100	1.451	0.165
90	1.306	0.176
80	1.161	0.189
60	0.871	0.224
40	0.580	0.286
20	0.290	0.434

นำค่าในตารางไปสร้างเส้นลักษณะเฉพาะของค่าทดสอบในกราฟของเส้นลักษณะเฉพาะและ
เส้นแอฟโพรชของค่าออกแบบเพื่อค่าขีดจำกัดความสามารถของหระบายความร้อนที่อัตราการไหล
ของน้ำทางเข้าเท่ากับ 5 l/min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จากกราฟจะได้

จุดตัดของเส้นลักษณะเฉพาะของค่าออกแบบกับเส้นแอฟโทรของค่าออกแบบ, $(L/G)_{design}$ คือ 0.479

จุดตัดของเส้นลักษณะเฉพาะของค่าทดสอบกับเส้นแอฟโทรของค่าออกแบบ, $(L/G)_{test}$ คือ 0.474

$$\text{ขีดความสามารถของหอระบายความร้อน} = \frac{(L/G)_{test}}{(L/G)_{design}} \times 100\%$$

$$\text{ขีดความสามารถของหอระบายความร้อน} = \frac{0.474}{0.479} \times 100\%$$

$$\text{ขีดความสามารถของหอระบายความร้อน} = 98.95 \%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่อัตราการไหลของน้ำ, $\bar{L} = 6 \text{ L/min}$

คำนวณค่า $(KaV/L)_{\text{test}}$ ที่ $\bar{L} = 6 \text{ L/min}$

อัตราการไหลของน้ำ, $L = 0.0992 \text{ kg/s}$

อัตราการไหลของอากาศ, $G = 0.0484 \text{ kg/s}$

อัตราส่วนอัตราการไหล, $L/G = 1.740$

อุณหภูมิน้ำทางเข้า, $T_1 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$

อุณหภูมิน้ำทางออก, $T_2 = 38 \text{ }^\circ\text{C}$

ตารางที่ 4.15 คำนวณค่า $1/\Delta h$ ตามวิธีของเขบายเซฟฟ์ เมื่ออัตราการไหลของน้ำ 6 L/min

อุณหภูมิของน้ำ ($^\circ\text{C}$)	h_w , เอนทัลปีของอากาศอิ่มตัว (kJ/kg dry air)	h , เอนทัลปีของอากาศชื้น (kJ/kg dry air)	$\Delta h = h_w - h$	$1/\Delta h$
$T_2 = 38 \text{ }^\circ\text{C}$	-	ที่ $(T_{wb})_{ai} = 27 \text{ }^\circ\text{C}$, $h_1 = 85.03$	-	-
$T_A = T_2 + 0.1(T_1 - T_2) = 38.2 \text{ }^\circ\text{C}$	151.70	$h_A = h_1 + 0.1C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 86.48$	65.22	0.0153
$T_B = T_2 + 0.4(T_1 - T_2) = 38.8 \text{ }^\circ\text{C}$	156.35	$h_B = h_1 + 0.4C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 90.85$	65.50	0.0153
$T_C = T_2 + 0.6(T_1 - T_2) = 39.2 \text{ }^\circ\text{C}$	159.53	$h_C = h_1 + 0.6C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 95.76$	65.77	0.0152
$T_D = T_2 + 0.9(T_1 - T_2) = 39.8 \text{ }^\circ\text{C}$	164.40	$h_D = h_1 + 0.9C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 98.12$	66.28	0.0151
$T_1 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$	-	$h_2 = h_1 + C_L(L/G)(T_1 - T_2) = 99.58$	-	-
				$\Sigma(1/\Delta h) = 0.0609$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่น ๆ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{KaV}{L} = \frac{C_L(T_1 - T_2)}{4} \sum \left(\frac{1}{\Delta h} \right) = \frac{4.18(40 - 38)}{4} (0.0609)$$

$$\left(\frac{KaV}{L}\right)_{\text{test}} \frac{L}{G}=1.740 = 0.127$$

สร้างสมการบ่งลักษณะเฉพาะ

$$\frac{KaV}{L} = C \left(\frac{L}{G}\right)^{-0.6} \quad (\text{กำหนด } n = -0.6)$$

แทนค่า $\left(\frac{KaV}{L}\right)_{\text{test}} = 0.127$ และ $\left(\frac{L}{G}\right)_{\text{test}} = 1.740$ ลงในสมการ

จะได้ $0.127 = C(1.740)^{-0.6}$

$$C = 0.1771$$

จะได้สมการบ่งลักษณะเฉพาะ

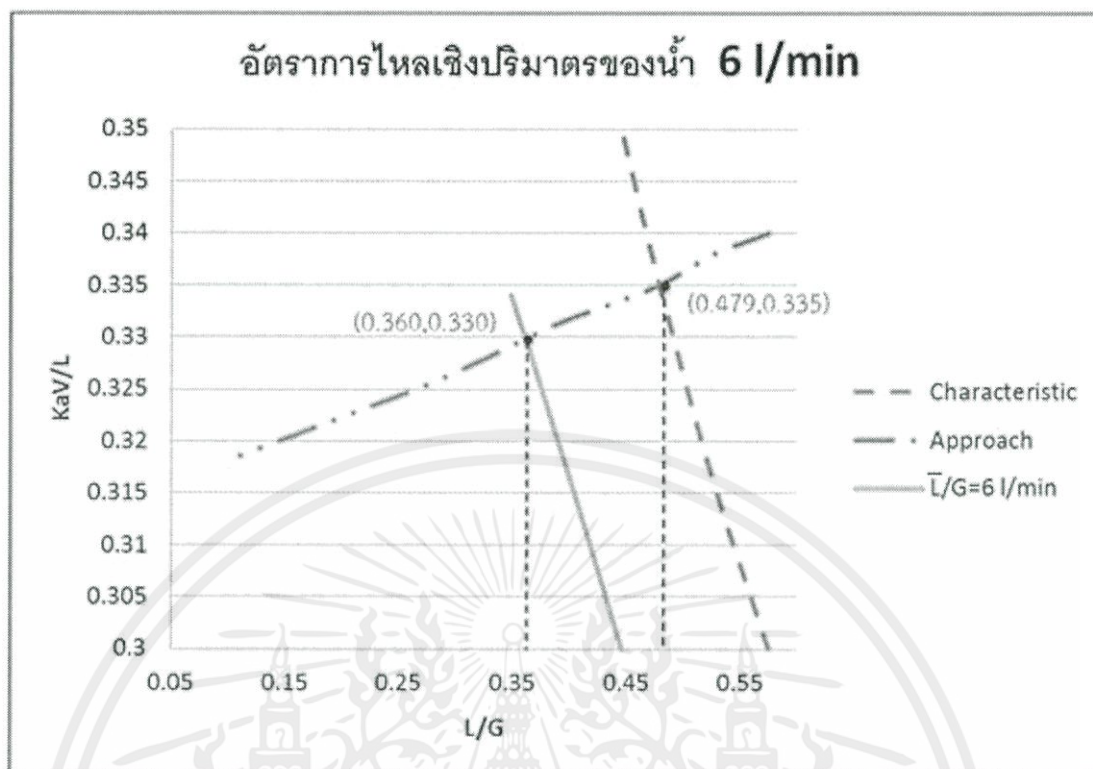
$$\frac{KaV}{L} = 0.1771 \left(\frac{L}{G}\right)^{-0.6} \quad (4.5)$$

ตารางที่ 4.16 ค่า $(KaV/L)_{\text{test}}$ ที่ $(L/G)_{\text{test}}$ ค่าต่างๆ

% ของอัตราส่วนการไหลของ ค่าทดสอบ ($L/G=1.740$)	ค่า L/G ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ	KaV/L จากสมการ (4.5)
120	2.088	0.114
110	1.914	0.120
100	1.740	0.127
90	1.566	0.135
80	1.392	0.145
60	1.044	0.173
40	0.696	0.220
20	0.348	0.334

นำค่าในตารางไปสร้างเส้นลักษณะเฉพาะของค่าทดสอบในกราฟของเส้นลักษณะเฉพาะและเส้นแอฟไพร์ชของค่าออกแบบเพื่อค่าขีดจำกัดความสามารถของหอระบายความร้อนที่อัตราการไหลของน้ำทางเข้าเท่ากับ 6 L/min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงจุด $(L/G)_{test}$ และ $(L/G)_{design}$ ที่ $\bar{L} = 6$ l/min

จากกราฟจะได้

จุดตัดของเส้นลักษณะเฉพาะของค่าออกแบบกับเส้นแอฟไพร์ของค่าออกแบบ, $(L/G)_{design}$ คือ 0.479

จุดตัดของเส้นลักษณะเฉพาะของค่าทดสอบกับเส้นแอฟไพร์ของค่าออกแบบ, $(L/G)_{test}$ คือ 0.360

$$\text{ขีดความสามารถของหอระบายความร้อน} = \frac{(L/G)_{test}}{(L/G)_{design}} \times 100\%$$

$$\text{ขีดความสามารถของหอระบายความร้อน} = \frac{0.360}{0.479} \times 100\%$$

$$\text{ขีดความสามารถของหอระบายความร้อน} = 75.16\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง

ในการทดสอบเราใช้พัดลมที่มีอัตราการไหลเชิงมวล G_{test} ที่ 0.057 kg/s ดังนั้น ถ้าจะทำให้มีค่า $L/G=0.479$ เท่าของที่ออกแบบไว้ จะต้องใช้อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำเท่ากับ 0.0273 kg/s ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 2 l/min ซึ่งไม่สามารถใช้โรตาริเตอร์วัดได้ จึงใช้อัตราการไหลของน้ำที่ 2 l/min หรือ 0.0331 kg/s เป็นค่าที่ใกล้เคียงที่สุด จะได้ค่า $L/G=0.581$ จากการทดสอบสามารถลดอุณหภูมิของน้ำได้ 3 องศาเซลเซียส และเมื่อคำนวณขีดความสามารถในการระบายความร้อนได้ 50.94% ดังนั้นหมายความว่าถ้าต้องการให้หอระบายความร้อนนี้ทำงานได้ตามสภาวะที่ออกแบบ จะต้องทำให้ค่า L/G มีค่าเป็น 0.5094 เท่าของ L/G ที่ออกแบบไว้ ซึ่งจะได้เท่ากับ 0.244 และเมื่ออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ค่าทดสอบวัดได้, G เท่ากับ 0.057 kg/s ดังนั้นแสดงว่าเราต้องปรับอัตราการไหลของน้ำเป็น 0.0139 kg/s

ความคลาดเคลื่อนของสมรรถนะนี้เป็นผลมาจาก

1. การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศทางเข้า เนื่องจากอุณหภูมิกระเปาะเปียก ณ สภาวะทดสอบ มีค่าสูงกว่าค่าที่ออกแบบไว้ จึงเป็นตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ การที่อากาศมีอุณหภูมิกระเปาะเปียกมากขึ้น การถ่ายเทความร้อนจะทำได้ยากขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิของน้ำทางออกลดลงได้น้อย อุณหภูมิของน้ำทางออกที่สูงกว่าที่ออกแบบ จะทำให้ผลต่างของอุณหภูมิน้ำทางเข้าและทางออกน้อยลง ซึ่งมีผลกระทบต่อค่าสมรรถนะในการระบายความร้อน (KaV/L) และส่งผลโดยตรงต่อค่าขีดความสามารถในการระบายความร้อนของหอระบายความร้อน
2. การเลือกใช้พัดลมในการระบายความร้อนที่มีอัตราการไหลของอากาศต่ำกว่าที่ออกแบบไว้ จะทำให้การถ่ายเทความร้อนในหอระบายความร้อนเกิดขึ้นได้น้อยกว่าที่ออกแบบ ส่งผลต่ออุณหภูมิของน้ำทางออกที่ลดได้น้อยลง ทำให้ผลต่างของอุณหภูมิน้ำทางเข้าและทางออกน้อยลงซึ่งมีผลกระทบต่อค่าสมรรถนะในการระบายความร้อน (KaV/L) และส่งผลโดยตรงต่อค่าขีดความสามารถในการระบายความร้อนของหอระบายความร้อน

เมื่อปรับอัตราการไหลของน้ำเป็น 3 l/min หรือ 0.0496 kg/s โดยกำหนดให้อัตราการไหลของอากาศมีค่าเท่าเดิม ค่า L/G เพิ่มขึ้นเป็น 0.870 จากการทดสอบสามารถลดอุณหภูมิของน้ำได้เท่าเดิมคือ 3 องศาเซลเซียส หากสังเกตสมรรถนะในการระบายความร้อน (KaV/L) ที่อัตราการไหลของน้ำ 2 l/min กับที่ 3 l/min จะมีค่าที่ใกล้เคียงกันมากหรือแทบจะเทียบได้ว่ามีค่าเท่ากัน แต่เนื่องจากที่อัตราการไหลของน้ำ 3 l/min มีอัตราการไหลที่มากกว่า จึงมีอัตราการถ่ายเทความร้อนได้มากกว่า ส่งผลให้มีขีดความสามารถที่สูงกว่า คือ 77.24%

เมื่อปรับอัตราการไหลของน้ำเป็น 4 L/min หรือ 0.0661 kg/s โดยกำหนดให้อัตราการไหลของอากาศมีค่าเท่าเดิม ค่า L/G เพิ่มขึ้นเป็น 1.160 จากการทดสอบสามารถลดอุณหภูมิของน้ำได้ 2.5 องศาเซลเซียส ซึ่งลดอุณหภูมิได้น้อยกว่าที่อัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 2 กับ 3 L/min แต่เมื่อเปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อนที่อัตราการไหลของน้ำที่เพิ่มมากขึ้น พบว่าจะได้อัตราการถ่ายเทความร้อนที่มากกว่า ฉะนั้นที่อัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 4 L/min จะมีอัตราการความร้อนได้มากกว่าที่ 2 และ 3 L/min จากผลการคำนวณขีดความสามารถในการระบายความร้อนได้ 77.66% ซึ่งมีค่าสูงกว่าเพียงเล็กน้อย เนื่องจากผลต่างระหว่างอุณหภูมิน้ำทางเข้าและทางออกมีค่าลดลง

เมื่อปรับอัตราการไหลของน้ำเป็น 5 L/min หรือ 0.0827 kg/s โดยกำหนดให้อัตราการไหลของอากาศมีค่าเท่าเดิม ค่า L/G เพิ่มขึ้นเป็น 1.451 จากการทดสอบสามารถลดอุณหภูมิของน้ำได้เท่ากับที่อัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 4 L/min คือ 2.5 องศาเซลเซียส แต่สามารถระบายความร้อนได้ที่อัตราการไหลของน้ำที่มากกว่า จึงทำให้มีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่า เมื่อคำนวณขีดความสามารถในการระบายความร้อนได้เท่ากับ 98.95% ซึ่งมากกว่าที่ 4 L/min

และเมื่อปรับอัตราการไหลของน้ำเป็น 6 L/min หรือ 0.0992 kg/s โดยกำหนดให้อัตราการไหลของอากาศมีค่าเท่าเดิม ค่า L/G เพิ่มขึ้นเป็น 1.740 จากการทดสอบสามารถลดอุณหภูมิของน้ำได้ 2 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถลดอุณหภูมิของน้ำได้น้อยกว่าที่อัตราการไหลของน้ำที่ผ่านมา ถึงแม้ว่าการระบายความร้อนที่อัตราการไหล 6 L/min นี้จะได้ปริมาณของน้ำเพิ่มมากขึ้น แต่ค่าสมรรถนะในการถ่ายเทความร้อน (KaV/L) ที่น้อยลงนั้น มีอิทธิพลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนมากกว่า จึงทำให้ที่อัตราการไหลที่ 6 L/min มีขีดความสามารถในการระบายความร้อนลดลง จากผลคำนวณขีดความสามารถในการระบายความร้อนได้เท่ากับ 75.16% ซึ่งมีค่าลดลงจากที่อัตราการไหลของน้ำ 5 L/min

จากการทดสอบทั้ง 5 ค่าอัตราการไหลของน้ำที่กำหนด พบว่าที่อัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 5 L/min มีค่าขีดความสามารถในการระบายความร้อนสูงที่สุด แต่อุณหภูมิของน้ำทางออกก็ยังคงสูงกว่าค่าที่ออกแบบไว้ การที่จะลดอุณหภูมิของน้ำทางออกให้ได้เท่ากับที่ออกแบบ คือต้องทำการลดค่า L/G ซึ่งการจะลดค่า L/G นั้นมี 2 วิธี คือ ลดอัตราการไหลของน้ำและการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ โดยถ้าลดอัตราการไหลของน้ำก็จะมีผลทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนลดลงด้วยอาจจะส่งผลต่ออัตราการผลิต แต่ถ้าเพิ่มอัตราการไหลของอากาศจะไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนแต่ก็จะต้องเพิ่มขนาดของพัดลม ซึ่งจะต้องมีค่าใช้จ่ายที่เพิ่มมากขึ้น

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 โครงการนี้ทำการศึกษาศึกษาการทำงานของหอระบายความร้อนแบบอากาศหมุนเวียนด้วยแรงกล พบว่า การระบายความร้อนที่เกิดขึ้นเกิดจากความร้อนแฝงที่น้ำร้อนถ่ายเทให้กับอากาศเป็นสำคัญ ทำให้อากาศที่ออกจากหอระบายความร้อนมีความชื้นสูงขึ้น

5.1.2 ได้ทำการพัฒนาและออกแบบชุดทดลองหอระบายความร้อนแบบเหนียวอากาศชนิดอากาศและน้ำไหลสวนทางขนาด 2 kW ซึ่งสามารถปรับอัตราการไหลของน้ำได้จาก 2 l/min ถึง 6 l/min จากผลการทดลองพบว่าหอระบายความร้อนสามารถระบายความร้อนได้สูงสุด 98.95% แสดงว่าหอระบายความร้อนนี้จะสามารถทำให้น้ำเย็นลงตามเงื่อนไขการทำงานดังกล่าว ด้วยอัตราการไหลของน้ำที่กำหนดเท่ากับ 98.95% ของอัตราการไหลค่าออกแบบ ($L=0.0957 \text{ kg/s}$) ภายใต้ เรนจ์ แอปโพรช และสภาวะอากาศทางเข้าที่กำหนด ออกแบบไว้ คือ $(98.95/100)(0.0957) = 0.0947 \text{ kg/s}$

5.1.3 จากการศึกษาและออกแบบชุดทดลองของหอระบายความร้อน รวมทั้งได้ทำการทดสอบชุดทดลองข้างต้น จึงได้จัดทำเอกสารประกอบการทดลองขึ้น โดยในเอกสารจะประกอบไปด้วยทฤษฎีเกี่ยวกับการทำงานและวิธีการคำนวณหาขีดจำกัดความสามารถของหอระบายความร้อน เพื่อให้ผู้เรียนได้ศึกษาและทดลองเกี่ยวกับชุดทดลองหอระบายความร้อนนี้เพื่อให้เกิดความเข้าใจมากยิ่งขึ้น

5.1.4 การคำนวณค่า KaV/L ด้วยวิธีเซบายเซฟพื้นนั้นมีความซับซ้อนยุ่งยาก และใช้เวลามาก ทำให้ค่าที่ได้มีความคลาดเคลื่อน จึงได้มีการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการคำนวณค่านี้ โดยใช้ภาษา Visual Basic

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในโครงการนี้ใช้หัวฉีดชนิดรูปตัววี ซึ่งอาจจะทำให้น้ำกระจายได้ไม่ทั่วพื้นที่หน้าตัดของแผงขยายฟิล์ม ดังนั้นควรใช้หัวฉีดที่เป็นรูปวงกลมหรือสี่เหลี่ยมเพื่อให้น้ำกระจายได้ทั่วพื้นที่

ในการออกแบบนี้ใช้หัวฉีดสามารถกระจายน้ำได้ดีแต่ทำให้เกิดความดันสูญเสียมากเกินไปได้ทำการลองใช้การเจาะรูของท่อพีวีซีให้เป็นทางออกของหัวฉีด แทนการใช้หัวฉีด พบว่ากระจายน้ำได้ไม่ดีเนื่องจากมีแรงดันต่ำและมีขนาดหยดน้ำที่ใหญ่ขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการเลือกใช้ขนาดของพัสดุในโครงการนี้มีขนาดต่ำกว่าที่คำนวณและออกแบบไว้ จึงทำให้มีประสิทธิภาพลดลง ดังนั้นในการพัฒนาต่อไปจึงต้องทำการปรับเปลี่ยนขนาดของพัสดุให้เหมาะสม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] กัญจน์ ปัทมเมธิน , ธีระภพ รัตนเจียมรังสี & นนทพันธ์ ชัยคณารักษ์กุล. (2555). การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์สมรรถนะหน้างานของหอระบายความร้อนแบบอากาศหมุนเวียนด้วยแรงกล.ปริญญาานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต.สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [2] ทศพร วรกลม. (2550). การศึกษาถึงอิทธิพลของมุมใบพัดของพัดลมไหลแนวแกนที่มีต่อพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้กับพัดลมและสมรรถนะในการระบายความร้อนของหอหล่อเย็นแบบไหลสวนทาง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [3] มนตรี พิรุณเกษตร. (2547).การคำนวณหาสัมประสิทธิ์ การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร ของแผงขยายฟิล์มน้ำคูลลิ่งทาวเวอร์.วิศวกรรมสารมก.ฉบับที่ 52, หน้า 85-95
- [4] มนตรี พิรุณเกษตร. (2553).คูลลิ่งทาวเวอร์ ภาคคำนวณ(1). ระบบปรับอากาศ-ทำความเย็น ชุดที่ 4 (หน้า109-118).กรุงเทพฯ: เอ็มแอนด์ดี
- [5] มนตรี พิรุณเกษตร. (2553).คูลลิ่งทาวเวอร์ ภาคคำนวณ(2). ระบบปรับอากาศ-ทำความเย็น ชุดที่ 4 (หน้า119-131).กรุงเทพฯ: เอ็มแอนด์ดี
- [6] มนตรี พิรุณเกษตร. (2553).คูลลิ่งทาวเวอร์ ภาคคำนวณ(3). ระบบปรับอากาศ-ทำความเย็น ชุดที่ 4 (หน้า132-141).กรุงเทพฯ: เอ็มแอนด์ดี
- [7] อนันต์ พงษ์ลมูล. (2549).การออกแบบหอทำน้ำเย็นชนิดลมดูดแบบไหลสวนทางสำหรับงานอุตสาหกรรม.ทาง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [8] Basel A. Gouda etc. all. (2008). Cooling Tower Educational Stand, B. ScGraduation Project, Cairo, Cairo University.
- [9] Boumaza M., Bakhbaki Y. (2010). Optimal Water Conservation in a Mechanical Cooling Tower Operations.World Academy of Science,Engineering and Technology. Vol. 4.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ

[10] Cooling Tower Institute, Acceptance Test Code for Water Cooling Towers. CTI Code ATC- 105,1982.

[11] Yunus A. Cengel ,Michael A. Boles. (2007). Thermodynamics:An Engineering Approach Sixth Edition (SI Units). 6th ed. New York: McGraw-Hill.

[12] <http://www.co2gasplants.com/cooling-towers.html>

[13] <http://www.hydroproperty.com/index.php?tpid=0087&pgid=0017>

[14] <http://th.aliexpress.com/item/2PCS-Lot-Stainless-Steel-Shield-10cm-Probe-Tube-RTD-PT100-Temperature-Sensor-with-2m-3-Cable/1717273229.html>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 ตารางเอนทัลปีของอากาศ

Temp.(°C)	Interval (°C)										Temp (°C)
	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	
	Enthalpy (kJ/kg dry air)										
0	9.44	9.61	9.78	9.95	10.12	10.30	10.47	10.64	10.82	10.99	0
1	11.16	11.34	11.52	11.69	11.87	12.05	12.22	12.40	12.58	12.76	1
2	12.94	13.12	13.30	13.48	13.66	13.85	14.03	14.21	14.40	14.58	2
3	14.77	14.95	15.14	15.32	15.51	15.70	15.89	16.08	16.27	16.46	3
4	16.65	16.84	17.03	17.22	17.42	17.61	17.80	18.00	18.19	18.39	4
5	18.59	18.78	18.98	19.18	19.38	19.58	19.78	19.98	20.18	20.38	5
6	20.59	20.79	21.00	21.20	21.41	21.61	21.82	22.03	22.23	22.44	6
7	22.65	22.86	23.07	23.29	23.50	23.71	23.92	24.14	24.35	24.57	7
8	24.79	25.00	25.22	25.44	25.66	25.88	26.10	26.32	26.55	26.77	8
9	26.99	27.22	27.44	27.67	27.90	28.13	28.35	28.58	28.81	29.05	9
10	29.28	29.51	29.74	29.98	30.21	30.45	30.69	30.92	31.16	31.40	10
11	31.64	31.88	32.13	32.37	32.61	32.86	33.10	33.35	33.59	33.84	11
12	34.09	34.34	34.59	34.84	35.10	35.35	35.61	35.86	36.12	36.37	12
13	36.63	36.89	37.15	37.41	37.67	37.94	38.20	38.47	38.73	39.00	13
14	39.27	39.54	39.81	40.08	40.35	40.62	40.90	41.17	41.45	41.73	14
15	42.00	42.28	42.56	42.85	43.13	43.41	43.70	43.98	44.27	44.56	15
16	44.85	45.14	45.43	45.72	46.02	46.31	46.61	46.90	47.20	47.50	16
17	47.80	48.10	48.41	48.71	49.02	49.32	49.63	49.94	50.25	50.56	17
18	50.87	51.19	51.50	51.82	52.14	52.46	52.78	53.10	53.42	53.75	18
19	54.07	54.40	54.73	55.06	55.39	55.72	56.05	56.39	56.72	57.08	19
20	57.40	57.74	58.08	58.43	58.77	59.12	59.46	59.81	60.16	60.51	20
21	60.87	61.22	61.58	61.94	62.29	62.66	63.02	63.38	63.75	64.11	21
22	64.48	64.85	65.22	65.59	65.97	66.34	66.72	67.10	67.48	67.86	22
23	68.25	68.63	69.02	69.41	69.80	70.19	70.59	70.98	71.38	71.78	23
24	72.18	72.58	72.98	73.39	73.80	74.21	74.62	75.03	75.44	75.86	24
25	76.28	76.70	77.12	77.54	77.97	78.39	78.82	79.25	79.69	80.12	25
26	80.56	81.00	81.44	81.88	82.32	82.77	83.22	83.67	84.12	84.57	26
27	85.03	85.49	85.95	86.41	86.87	87.34	87.81	88.28	88.75	89.22	27
28	89.70	90.18	90.66	91.14	91.63	92.11	92.60	93.09	93.59	94.08	28
29	94.58	95.08	95.58	96.09	96.60	97.11	97.62	98.13	98.65	99.17	29
30	99.69	100.21	100.74	101.26	101.79	102.33	102.86	103.40	103.94	104.48	30
31	105.03	105.57	106.12	106.68	107.23	107.79	108.35	108.91	109.48	110.04	31
32	110.61	111.19	111.76	112.34	112.92	113.50	114.09	114.68	115.27	115.86	32
33	116.46	117.06	117.66	118.27	118.88	119.49	120.10	120.72	121.34	121.96	33
34	122.59	123.21	123.84	124.48	125.11	125.75	126.40	127.04	127.69	128.34	34
35	129.00	129.66	130.32	130.98	131.65	132.32	132.99	133.67	134.35	135.03	35
36	135.72	136.41	137.10	137.80	138.50	139.20	139.91	140.62	141.33	142.05	36
37	142.77	143.49	144.21	144.94	145.68	146.41	147.16	147.90	148.65	149.40	37
38	150.15	150.91	151.67	152.44	153.21	153.98	154.76	155.54	156.32	157.11	38
39	157.90	158.70	159.50	160.30	161.11	161.92	162.73	163.55	164.37	165.20	39
40	166.03	166.87	167.71	168.55	169.40	170.25	171.10	171.96	172.83	173.69	40
41	174.57	175.44	176.32	177.21	178.10	178.99	179.89	180.79	181.70	182.61	41
42	183.53	184.45	185.37	186.30	187.24	188.18	189.12	190.07	191.02	191.98	42
43	192.94	193.91	194.89	195.86	196.84	197.83	198.82	199.82	200.82	201.82	43
44	202.84	203.85	204.87	205.90	206.93	207.97	209.01	210.06	211.11	212.17	44
45	213.24	214.31	215.38	216.46	217.55	218.64	219.73	220.84	221.94	223.06	45
46	224.18	225.30	226.43	227.57	228.71	229.86	231.01	232.17	233.34	234.51	46
47	235.69	236.87	238.06	239.26	240.46	241.67	242.88	244.10	245.33	246.56	47
48	247.80	249.05	250.30	251.56	252.83	254.10	255.38	256.67	257.96	259.26	48
49	260.57	261.88	263.20	264.53	265.86	267.20	268.55	269.90	271.27	272.64	49

ตารางนี้มาจากมาตรฐาน BS4485 : Part 2 : 1988

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า (มาตรฐาน BS4485: Part 2 :1988) ไม่ว่าจะพิมพ์ขึ้น หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 ตารางคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำ

Physical Properties of Water (SI Units)^a

Temperature (°C)	Density, ρ (kg/m ³)	Specific Weight ^b , γ (kN/m ³)	Dynamic Viscosity, μ (N·s/m ²)	Kinematic Viscosity, ν (m ² /s)	Surface Tension ^c , σ (N/m)	Vapor Pressure, p_v [N/m ² (abs)]	Speed of Sound ^d , c (m/s)
0	999.9	9.806	1.787 E - 3	1.787 E - 6	7.56 E - 2	6.105 E + 2	1403
5	1000.0	9.807	1.519 E - 3	1.519 E - 6	7.49 E - 2	8.722 E + 2	1427
10	999.7	9.804	1.307 E - 3	1.307 E - 6	7.42 E - 2	1.228 E + 3	1447
20	998.2	9.789	1.002 E - 3	1.004 E - 6	7.28 E - 2	2.338 E + 3	1481
30	995.7	9.765	7.975 E - 4	8.009 E - 7	7.12 E - 2	4.243 E + 3	1507
40	992.2	9.731	6.529 E - 4	6.580 E - 7	6.96 E - 2	7.376 E + 3	1526
50	988.1	9.690	5.468 E - 4	5.534 E - 7	6.79 E - 2	1.233 E + 4	1541
60	983.2	9.642	4.665 E - 4	4.745 E - 7	6.62 E - 2	1.992 E + 4	1552
70	977.8	9.589	4.042 E - 4	4.134 E - 7	6.44 E - 2	3.116 E + 4	1555
80	971.8	9.530	3.547 E - 4	3.650 E - 7	6.26 E - 2	4.734 E + 4	1555
90	965.3	9.467	3.147 E - 4	3.260 E - 7	6.08 E - 2	7.010 E + 4	1550
100	958.4	9.399	2.818 E - 4	2.940 E - 7	5.89 E - 2	1.013 E + 5	1543

^aBased on data from *Handbook of Chemistry and Physics*, 69th Ed., CRC Press, 1988.

^bDensity and specific weight are related through the equation $\gamma = \rho g$. For this table, $g = 9.807 \text{ m/s}^2$.

^cIn contact with air.

^dFrom R. D. Blevins, *Applied Fluid Dynamics Handbook*, Van Nostrand Reinhold Co., Inc., New York, 1984.

(Munson, Young, Okiishi and Huebsch. *Fundamental of Fluid Mechanics*.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.3 ตารางคุณสมบัติทางกายภาพของอากาศ

Physical Properties of Air at Standard Atmospheric Pressure (SI Units)^a

Temperature (°C)	Density, ρ (kg/m ³)	Specific Weight ^b , γ (N/m ³)	Dynamic Viscosity, μ (N·s/m ²)	Kinematic Viscosity, ν (m ² /s)	Specific Heat Ratio, k (—)	Speed of Sound, c (m/s)
-40	1.514	14.85	1.57 E - 5	1.04 E - 5	1.401	306.2
-20	1.395	13.68	1.63 E - 5	1.17 E - 5	1.401	319.1
0	1.292	12.67	1.71 E - 5	1.32 E - 5	1.401	331.4
5	1.269	12.45	1.73 E - 5	1.36 E - 5	1.401	334.4
10	1.247	12.23	1.76 E - 5	1.41 E - 5	1.401	337.4
15	1.225	12.01	1.80 E - 5	1.47 E - 5	1.401	340.4
20	1.204	11.81	1.82 E - 5	1.51 E - 5	1.401	343.3
25	1.184	11.61	1.85 E - 5	1.56 E - 5	1.401	346.3
30	1.165	11.43	1.86 E - 5	1.60 E - 5	1.400	349.1
40	1.127	11.05	1.87 E - 5	1.66 E - 5	1.400	354.7
50	1.109	10.88	1.95 E - 5	1.76 E - 5	1.400	360.3
60	1.060	10.40	1.97 E - 5	1.86 E - 5	1.399	365.7
70	1.029	10.09	2.03 E - 5	1.97 E - 5	1.399	371.2
80	0.9996	9.803	2.07 E - 5	2.07 E - 5	1.399	376.6
90	0.9721	9.533	2.14 E - 5	2.20 E - 5	1.398	381.7
100	0.9461	9.278	2.17 E - 5	2.29 E - 5	1.397	386.9
200	0.7461	7.317	2.53 E - 5	3.39 E - 5	1.390	434.5
300	0.6159	6.040	2.98 E - 5	4.84 E - 5	1.379	476.3
400	0.5243	5.142	3.32 E - 5	6.34 E - 5	1.368	514.1
500	0.4565	4.477	3.64 E - 5	7.97 E - 5	1.357	548.8
1000	0.2772	2.719	5.04 E - 5	1.82 E - 4	1.321	694.8

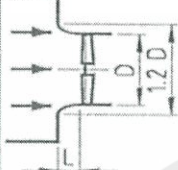
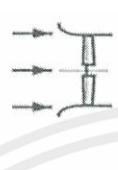
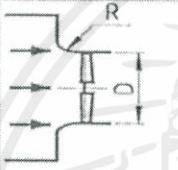
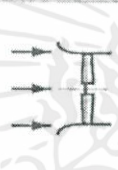
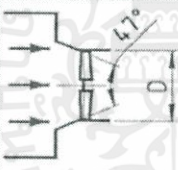
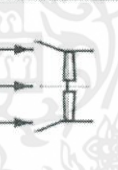
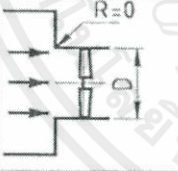
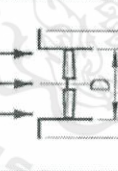
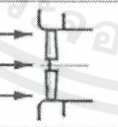
^aBased on data from R. D. Blevins, *Applied Fluid Dynamics Handbook*, Van Nostrand Reinhold Co., Inc., New York, 1984.

^bDensity and specific weight are related through the equation $\gamma = \rho g$. For this table $g = 9.807 \text{ m/s}^2$.

(Munson, Young, Okiishi and Huebsch. *Fundamental of Fluid Mechanics*.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.4 สัมประสิทธิ์การต้านทานการไหลตามรูปแบบทางเข้าของปากปล่องปล่อยลม

Inlet shape		Pressure loss factor k_i		Change in max. blade angle $\Delta \alpha$				Sound increase $\Delta L_{int.}$ (dB)	
ID	FD	ID	FD	ID	FD	ID	FD	ID	FD
				EN.	EL.	EN.	EL.		
		0	0	0	0	0	0	0	0
ELLIPS (E) 1:1.5 Axis ratio	L/D = 0.15								
		0 0.04 0.13	0 0.08 0.22	0 0 -2	0 0 -2	0 0 -5	0 0 -5	0 +0.5 +2	0 +1.5 +3
R/D = 0.15 = 0.1 = 0.05	R/D = 0.15 = 0.1 = 0.05								
		0.07 0.11 0.21	0.23 0.38 0.65	0 -2 -5	0 -2 -5	0 -5 -5	0 -5 -10	+1 +1.5 +2	+2 +2.5 +4
L/D = 0.15 = 0.1 = 0.05	L/D = 0.15 = 0.1 = 0.05								
		0.4	0.5	-5	-15	-5	-15	+3	+3
R=0	1:1D								
		-	0.9	-5	-15	-5	-15	-	+3
Tolerance		±30%		---				---	
benamng Influence of inlet shape									

(อนันต์ พงษ์มุล. (2549).การออกแบบหอทำน้ำเย็นชนิดลมดูดแบบไหลสวนทางสำหรับ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
งานอุตสาหกรรม หน้า 79)
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

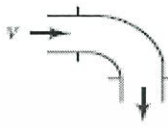




ตารางที่ ก.5 ตารางแสดงค่าความขรุขระของผิววัสดุ

Pipe	Equivalent Roughness, ϵ
	Millimeters
Riveted steel	0.9–9.0
Concrete	0.3–3.0
Wood stave	0.18–0.9
Cast iron	0.26
Galvanized iron	0.15
Commercial steel or wrought iron	0.045
Drawn tubing	0.0015
Plastic, glass	0.0 (smooth)

(Munson, Young, Okiishi and Huebsch. Fundamental of Fluid Mechanics.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

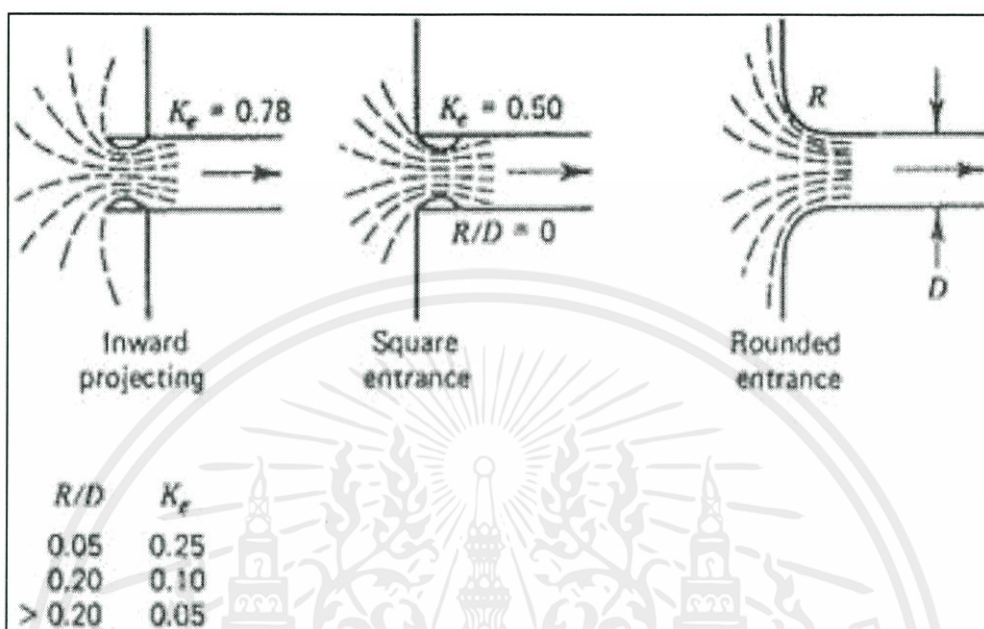
ตารางที่ ก.6 Loss coefficient for pipe fittings

Component	K_L	
a. Elbows		
Regular 90°, flanged	0.3	
Regular 90°, threaded	1.5	
Long radius 90°, flanged	0.2	
Long radius 90°, threaded	0.7	
Long radius 45°, flanged	0.2	
Regular 45°, threaded	0.4	
b. 180° return bends		
180° return bend, flanged	0.2	
180° return bend, threaded	1.5	
c. Tees		
Line flow, flanged	0.2	
Line flow, threaded	0.9	
Branch flow, flanged	1.0	
Branch flow, threaded	2.0	
d. Union, threaded		
	0.08	
e. Valves		
Globe, fully open	10	
Angle, fully open	2	
Gate, fully open	0.15	
Gate, $\frac{1}{2}$ closed	0.26	
Gate, $\frac{1}{4}$ closed	2.1	
Gate, $\frac{3}{8}$ closed	17	
Swing check, forward flow	2	
Swing check, backward flow	∞	
Ball valve, fully open	0.05	
Ball valve, $\frac{1}{2}$ closed	5.5	
Ball valve, $\frac{2}{3}$ closed	210	

(Munson, Young, Okiishi and Huebsch. Fundamental of Fluid Mechanics.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

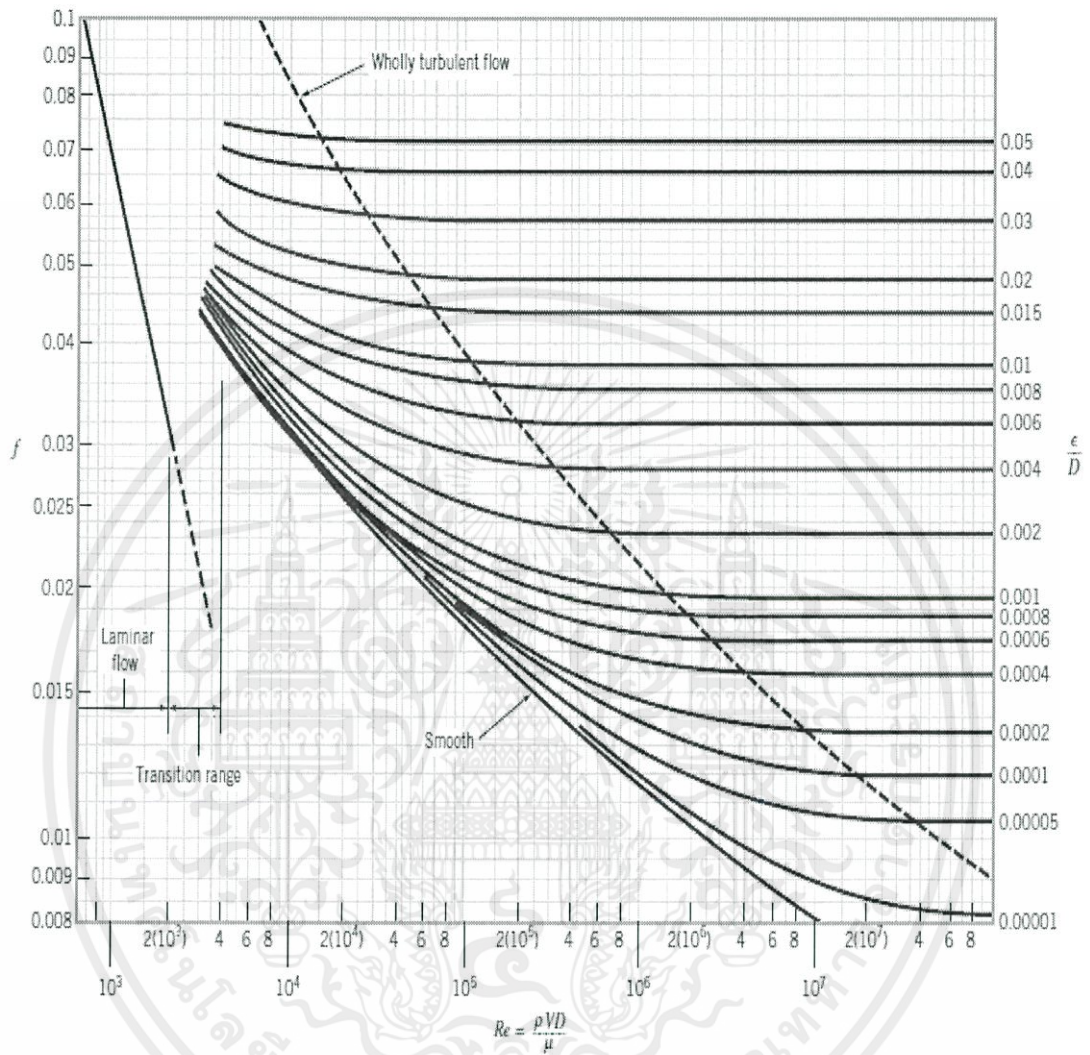
รูปที่ ก.1 Loss coefficient of components.



(อนันต์ พงษ์มูล. (2549).การออกแบบหอทำน้ำเย็นชนิดลมดูดแบบไหลสวนทางสำหรับงานอุตสาหกรรม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

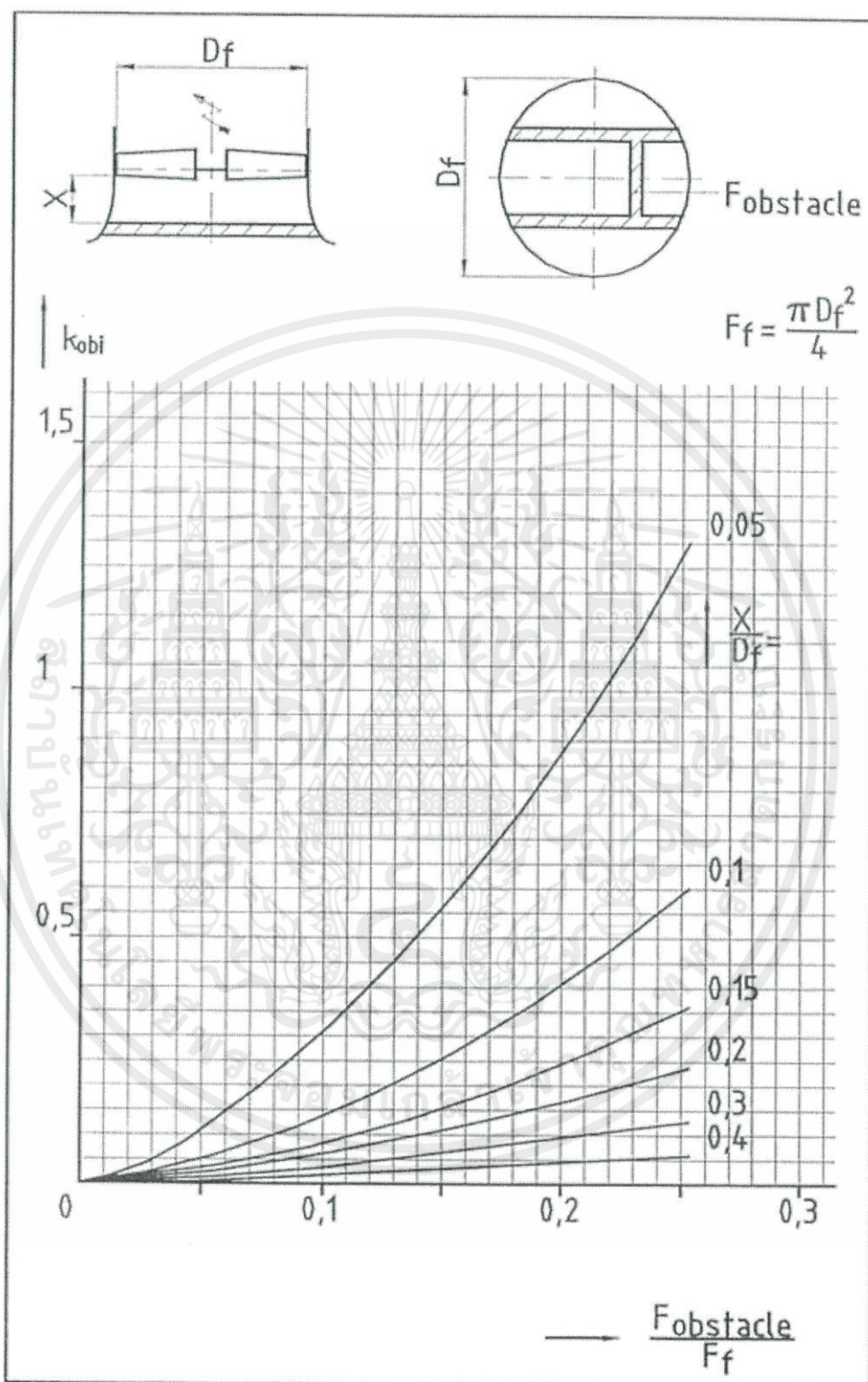
รูปที่ ก.2 แผนภาพมูดี้ (Moody Chart)



(Munson, Young, Okiishi and Huebsch. Fundamental of Fluid Mechanics.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ก.3 สัมประสิทธิ์ต้านทานการไหลผ่านสิ่งกีดขวางปล่อยปลอยลม



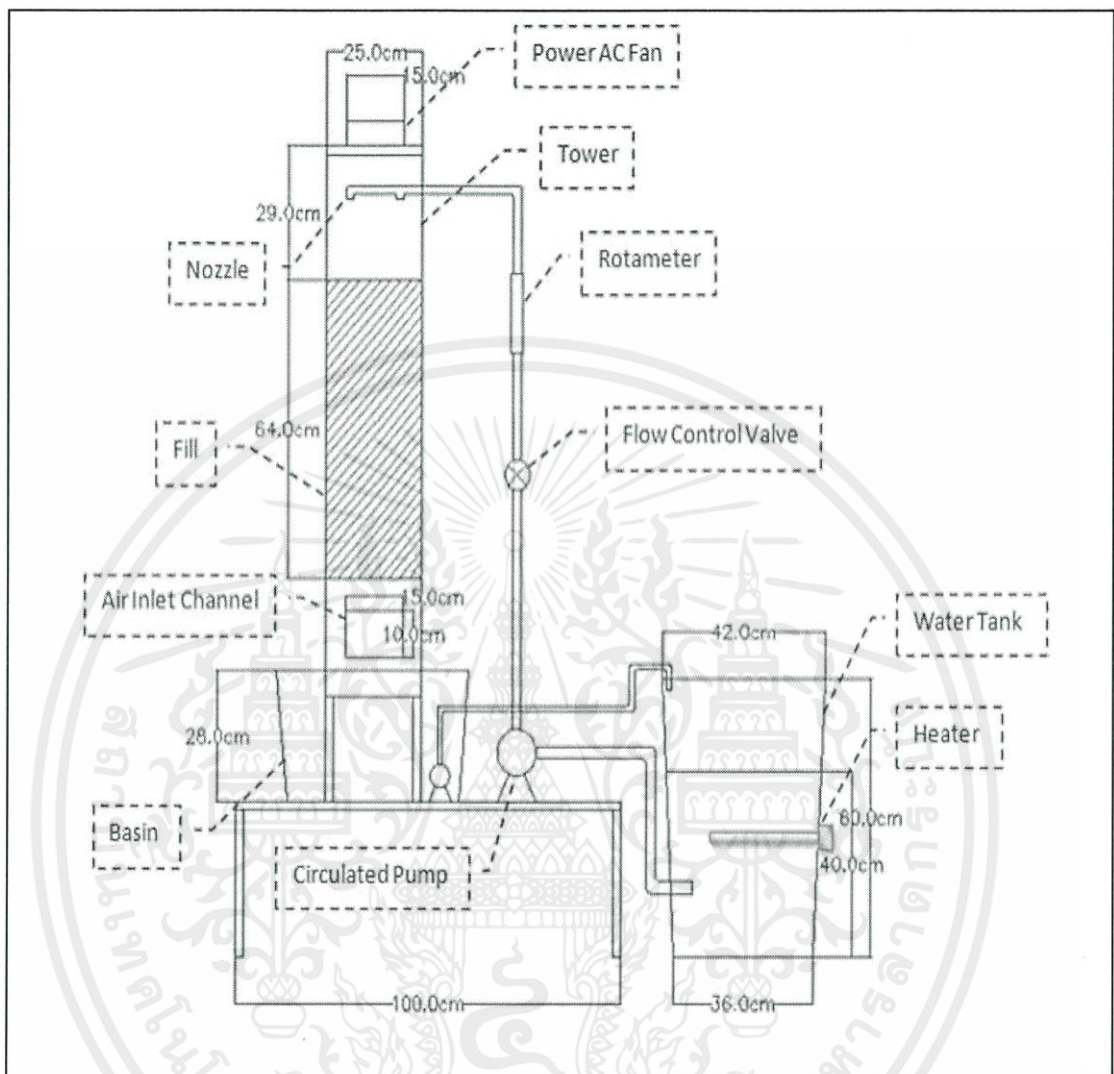
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณี (อนันต์ พงษ์มุล. (2549). การออกแบบหอทำน้ำเย็นชนิดลมดูดแบบไหลสวนทางสำหรับโรงงาน นำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพถ่ายและการกำหนดขนาดของหอระบายความร้อน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Public Class Form1
    Dim H(0 To 250)
    Dim T(0 To 250)

    Dim T1 As Double
    Dim T2 As Double
    Dim TWB, N, A, B, C, D, TA, TB, TC, TD, W, X, Y, Z, CP, F, H1, H2, HA, HB,
    HC, HD, DHA, DHB, DHC, DHD, S, K, V, R, VA, VW
    Dim I As Integer, J As Integer
    Private Sub Form1_Load(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
    System.EventArgs) Handles MyBase.Load

        End Sub

        Private Sub CmdCancel1_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
    System.EventArgs) Handles CmdCancel1.Click
            TxtT1.Text = ""
            TxtT2.Text = ""
            TxtTWB.Text = ""
            TxtN.Text = ""
            TxtK.Text = ""
        End Sub

        Private Sub CmdCalculate_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
    System.EventArgs) Handles CmdCalculate.Click
            T1 = TxtT1.Text
            T2 = TxtT2.Text
            TWB = TxtTWB.Text
            N = TxtN.Text
            CP = 4.1868
            TA = T2 + 0.1 * (T1 - T2)
            TB = T2 + 0.4 * (T1 - T2)
            TC = T1 - 0.4 * (T1 - T2)
            TD = T1 - 0.1 * (T1 - T2)
            A = 0 : B = 0 : C = 0 : D = 0 : F = 0
            For J = 0 To 250
                W = 1 : X = 1 : Y = 1 : Z = 1 : V = 1
                H(0) = 42.0 : H(1) = 42.28 : H(2) = 42.56 : H(3) = 42.85 : H(4) =
    43.13 : H(5) = 43.41 : H(6) = 43.7 : H(7) = 43.98 : H(8) = 44.27 : H(9) = 44.56
    : H(10) = 44.85
                H(11) = 45.14 : H(12) = 45.43 : H(13) = 45.72 : H(14) = 46.02 :
    H(15) = 46.31 : H(16) = 46.61 : H(17) = 46.9 : H(18) = 47.2 : H(19) = 47.5 :
    H(20) = 47.8
                H(21) = 48.1 : H(22) = 48.41 : H(23) = 48.71 : H(24) = 49.02 :
    H(25) = 49.32 : H(26) = 49.63 : H(27) = 49.94 : H(28) = 50.25 : H(29) = 50.56 :
    H(30) = 50.87
                H(31) = 51.19 : H(32) = 51.5 : H(33) = 51.82 : H(34) = 52.14 :
    H(35) = 52.46 : H(36) = 52.78 : H(37) = 53.1 : H(38) = 53.42 : H(39) = 53.75 :
    H(40) = 54.07
                H(41) = 54.4 : H(42) = 54.73 : H(43) = 55.06 : H(44) = 55.39 :
    H(45) = 55.72 : H(46) = 56.05 : H(47) = 56.39 : H(48) = 56.72 : H(49) = 57.06
                H(50) = 57.4 : H(51) = 57.74 : H(52) = 58.08 : H(53) = 58.43 :
    H(54) = 58.77 : H(55) = 59.12 : H(56) = 59.46 : H(57) = 59.81 : H(58) = 60.16 :
    H(59) = 60.51 : H(60) = 60.87
                H(61) = 61.22 : H(62) = 61.58 : H(63) = 61.94 : H(64) = 62.29 :
    H(65) = 62.66 : H(66) = 63.02 : H(67) = 63.38 : H(68) = 63.75 : H(69) = 64.11 :
    H(70) = 64.48
                H(71) = 64.85 : H(72) = 65.22 : H(73) = 65.59 : H(74) = 65.97 :
    H(75) = 66.34 : H(76) = 66.72 : H(77) = 67.1 : H(78) = 67.48 : H(79) = 67.86 :
    H(80) = 68.25
            
```

$H(81) = 68.63 : H(82) = 69.02 : H(83) = 69.41 : H(84) = 69.8 :$
 $H(85) = 70.19 : H(86) = 70.59 : H(87) = 70.98 : H(88) = 71.38 : H(89) = 71.78$
 $H(90) = 72.18 : H(91) = 72.58 : H(92) = 72.98 : H(93) = 73.39 :$
 $H(94) = 73.8 : H(95) = 74.21 : H(96) = 74.62 : H(97) = 75.03 : H(98) = 75.44 :$
 $H(99) = 75.86 : H(100) = 76.28$
 $H(101) = 76.7 : H(102) = 77.12 : H(103) = 77.54 : H(104) = 77.97 :$
 $H(105) = 78.39 : H(106) = 78.82 : H(107) = 79.25 : H(108) = 79.69 : H(109) =$
 $80.12 : H(110) = 80.56 : H(111) = 81$
 $H(112) = 81.44 : H(113) = 81.88 : H(114) = 82.32 : H(115) = 82.77 :$
 $H(116) = 83.22 : H(117) = 83.67 : H(118) = 84.12 : H(119) = 84.57 : H(120) =$
 $85.03 : H(121) = 85.49 : H(122) = 85.95$
 $H(123) = 86.41 : H(124) = 86.87 : H(125) = 87.34 : H(126) = 87.81 :$
 $H(127) = 88.28 : H(128) = 88.75 : H(129) = 89.22 : H(130) = 89.7 : H(131) =$
 $90.18 : H(132) = 90.66 : H(133) = 91.14$
 $H(134) = 91.63 : H(135) = 92.11 : H(136) = 92.6 : H(137) = 93.09 :$
 $H(138) = 93.59 : H(139) = 94.08 : H(140) = 94.58 : H(141) = 95.08 : H(142) =$
 $95.58 : H(143) = 96.09 : H(144) = 96.6$
 $H(145) = 97.11 : H(146) = 97.62 : H(147) = 98.13 : H(148) = 98.65 :$
 $H(149) = 99.17 : H(150) = 99.69 : H(151) = 100.21 : H(152) = 100.74 : H(153) =$
 $101.26 : H(154) = 101.79$
 $H(155) = 102.33 : H(156) = 102.86 : H(157) = 103.4 : H(158) =$
 $103.94 : H(159) = 104.48 : H(160) = 105.03 : H(161) = 105.57 : H(162) = 106.12$
 $: H(163) = 106.68 : H(164) = 107.23$
 $H(165) = 107.79 : H(166) = 108.35 : H(167) = 108.91 : H(168) =$
 $109.48 : H(169) = 110.04 : H(170) = 110.61 : H(171) = 111.19 : H(172) = 111.76$
 $: H(173) = 112.34 : H(174) = 112.92$
 $H(175) = 113.5 : H(176) = 114.09 : H(177) = 114.68 : H(178) =$
 $115.27 : H(179) = 115.86 : H(180) = 116.46 : H(181) = 117.06 : H(182) = 117.66$
 $: H(183) = 118.27 : H(184) = 118.88$
 $H(185) = 119.49 : H(186) = 120.1 : H(187) = 120.72 : H(188) =$
 $121.34 : H(189) = 121.96 : H(190) = 122.59 : H(191) = 123.21 : H(192) = 123.84$
 $: H(193) = 124.48 : H(194) = 125.11$
 $H(195) = 125.75 : H(196) = 126.4 : H(197) = 127.04 : H(198) =$
 $127.69 : H(199) = 128.34 : H(200) = 129 : H(201) = 129.66 : H(202) = 130.32 :$
 $H(203) = 130.98 : H(204) = 131.65$
 $H(205) = 132.32 : H(206) = 132.99 : H(207) = 133.67 : H(208) =$
 $134.35 : H(209) = 135.03 : H(210) = 135.72 : H(211) = 136.41 : H(212) = 137.1 :$
 $H(213) = 137.8$
 $H(214) = 138.5 : H(215) = 139.2 : H(216) = 139.91 : H(217) = 140.62$
 $: H(218) = 141.33 : H(219) = 142.05 : H(220) = 142.77 : H(221) = 143.49 :$
 $H(222) = 144.21$
 $H(223) = 144.94 : H(224) = 145.68 : H(225) = 146.41 : H(226) =$
 $147.16 : H(227) = 147.9 : H(228) = 148.65 : H(229) = 149.4 : H(230) = 150.15 :$
 $H(231) = 150.91 : H(232) = 151.67$
 $H(233) = 152.44 : H(234) = 153.21 : H(235) = 153.98 : H(236) =$
 $154.76 : H(237) = 155.54 : H(238) = 156.32$
 $H(239) = 157.11 : H(240) = 157.9 : H(241) = 158.7 : H(242) = 159.5$
 $: H(243) = 160.3 : H(244) = 161.11 : H(245) = 161.92 : H(246) = 162.73$
 $H(247) = 163.55 : H(248) = 164.37 : H(249) = 165.2 : H(250) =$
 166.03

For I = 0 To 250

 If I = J Then

 Else

 T(0) = 15.0 : T(1) = 15.1 : T(2) = 15.2 : T(3) = 15.3 :

 T(4) = 15.4 : T(5) = 15.5 : T(6) = 15.6 : T(7) = 15.7 : T(8) = 15.8 : T(9) =

 15.9 : T(10) = 16.0 : T(11) = 16.1

 T(12) = 16.2 : T(13) = 16.3 : T(14) = 16.4 : T(15) = 16.5 :

 T(16) = 16.6 : T(17) = 16.7 : T(18) = 16.8 : T(19) = 16.9 : T(20) = 17.0 :

 T(21) = 17.1 : T(22) = 17.2

 T(23) = 17.3 : T(24) = 17.4 : T(25) = 17.5 : T(26) = 17.6 :

 T(27) = 17.7 : T(28) = 17.8 : T(29) = 17.9 : T(30) = 18.0 : T(31) = 18.1 :

 T(32) = 18.2 : T(33) = 18.3

$T(34) = 18.4 : T(35) = 18.5 : T(36) = 18.6 : T(37) = 18.7 :$
 $T(38) = 18.8 : T(39) = 18.9 : T(40) = 19.0 : T(41) = 19.1 : T(42) = 19.2 :$
 $T(43) = 19.3 : T(44) = 19.4$
 $T(45) = 19.5 : T(46) = 19.6 : T(47) = 19.7 : T(48) = 19.8 :$
 $T(49) = 19.9$
 $T(50) = 20.0 : T(51) = 20.1 : T(52) = 20.2 : T(53) = 20.3 :$
 $T(54) = 20.4 : T(55) = 20.5 : T(56) = 20.6 : T(57) = 20.7 : T(58) = 20.8 :$
 $T(59) = 20.9 : T(60) = 21.0 : T(61) = 21.1$
 $T(62) = 21.2 : T(63) = 21.3 : T(64) = 21.4 : T(65) = 21.5 :$
 $T(66) = 21.6 : T(67) = 21.7 : T(68) = 21.8 : T(69) = 21.9 : T(70) = 22.0 :$
 $T(71) = 22.1 : T(72) = 22.2$
 $T(73) = 22.3 : T(74) = 22.4 : T(75) = 22.5 : T(76) = 22.6 :$
 $T(77) = 22.7 : T(78) = 22.8 : T(79) = 22.9 : T(80) = 23.0 : T(81) = 23.1 :$
 $T(82) = 23.2 : T(83) = 23.3$
 $T(84) = 23.4 : T(85) = 23.5 : T(86) = 23.6 : T(87) = 23.7 :$
 $T(88) = 23.8 : T(89) = 23.9 : T(90) = 24.0 : T(91) = 24.1 : T(92) = 24.2 :$
 $T(93) = 24.3 : T(94) = 24.4$
 $T(95) = 24.5 : T(96) = 24.6 : T(97) = 24.7 : T(98) = 24.8 :$
 $T(99) = 24.9 : T(100) = 25.0 : T(101) = 25.1 : T(102) = 25.2 : T(103) = 25.3 :$
 $T(104) = 25.4 : T(105) = 25.5$
 $T(106) = 25.6 : T(107) = 25.7 : T(108) = 25.8 : T(109) =$
 $25.9 : T(110) = 26.0 : T(111) = 26.1 : T(112) = 26.2 : T(113) = 26.3 : T(114) =$
 $26.4 : T(115) = 26.5 : T(116) = 26.6$
 $T(117) = 26.7 : T(118) = 26.8 : T(119) = 26.9 : T(120) =$
 $27.0 : T(121) = 27.1 : T(122) = 27.2 : T(123) = 27.3 : T(124) = 27.4 : T(125) =$
 $27.5 : T(126) = 27.6 : T(127) = 27.7$
 $T(128) = 27.8 : T(129) = 27.9 : T(130) = 28.0 : T(131) =$
 $28.1 : T(132) = 28.2 : T(133) = 28.3 : T(134) = 28.4 : T(135) = 28.5 : T(136) =$
 $28.6 : T(137) = 28.7 : T(138) = 28.8$
 $T(139) = 28.9 : T(140) = 29.0 : T(141) = 29.1 : T(142) =$
 $29.2 : T(143) = 29.3 : T(144) = 29.4 : T(145) = 29.5 : T(146) = 29.6 : T(147) =$
 $29.7 : T(148) = 29.8 : T(149) = 29.9$
 $T(150) = 30.0 : T(151) = 30.1 : T(152) = 30.2 : T(153) =$
 $30.3 : T(154) = 30.4 : T(155) = 30.5 : T(156) = 30.6 : T(157) = 30.7 : T(158) =$
 $30.8 : T(159) = 30.9$
 $T(160) = 31.0 : T(161) = 31.1 : T(162) = 31.2 : T(163) =$
 $31.3 : T(164) = 31.4 : T(165) = 31.5 : T(166) = 31.6 : T(167) = 31.7 : T(168) =$
 $31.8 : T(169) = 31.9$
 $T(170) = 32.0 : T(171) = 32.1 : T(172) = 32.2 : T(173) =$
 $32.3 : T(174) = 32.4 : T(175) = 32.5 : T(176) = 32.6 : T(177) = 32.7 : T(178) =$
 $32.8 : T(179) = 32.9$
 $T(180) = 33.0 : T(181) = 33.1 : T(182) = 33.2 : T(183) =$
 $33.3 : T(184) = 33.4 : T(185) = 33.5 : T(186) = 33.6 : T(187) = 33.7 : T(188) =$
 $33.8 : T(189) = 33.9$
 $T(190) = 34.0 : T(191) = 34.1 : T(192) = 34.2 : T(193) =$
 $34.3 : T(194) = 34.4 : T(195) = 34.5 : T(196) = 34.6 : T(197) = 34.7 : T(198) =$
 $34.8 : T(199) = 34.9$
 $T(200) = 35.0 : T(201) = 35.1 : T(202) = 35.2 : T(203) =$
 $35.3 : T(204) = 35.4 : T(205) = 35.5 : T(206) = 35.6 : T(207) = 35.7 : T(208) =$
 $35.8 : T(209) = 35.9$
 $T(210) = 36.0 : T(211) = 36.1 : T(212) = 36.2 : T(213) =$
 $36.3 : T(214) = 36.4 : T(215) = 36.5 : T(216) = 36.6 : T(217) = 36.7 : T(218) =$
 $36.8 : T(219) = 36.9$
 $T(220) = 37.0 : T(221) = 37.1 : T(222) = 37.2 : T(223) =$
 $37.3 : T(224) = 37.4 : T(225) = 37.5 : T(226) = 37.6 : T(227) = 37.7 : T(228) =$
 $37.8 : T(229) = 37.9$
 $T(230) = 38.0 : T(231) = 38.1 : T(232) = 38.2 : T(233) =$
 $38.3 : T(234) = 38.4 : T(235) = 38.5 : T(236) = 38.6 : T(237) = 38.7 : T(238) =$
 $38.8 : T(239) = 38.9$
 $T(240) = 39.0 : T(241) = 39.1 : T(242) = 39.2 : T(243) =$
 $39.3 : T(244) = 39.4 : T(245) = 39.5 : T(246) = 39.6 : T(247) = 39.7 : T(248) =$
 $39.8 : T(249) = 39.9 : T(250) = 40.0$

```

W = W * (TA - T(I)) / (T(J) - T(I))
X = X * (TB - T(I)) / (T(J) - T(I))
Y = Y * (TC - T(I)) / (T(J) - T(I))
Z = Z * (TD - T(I)) / (T(J) - T(I))
V = V * (TWB - T(I)) / (T(J) - T(I))
End If
Next I
A = A + W * H(J)
B = B + X * H(J)
C = C + Y * H(J)
D = D + Z * H(J)
F = F + V * H(J)
Next J
H1 = F
H2 = H1 + CP * N * (T1 - T2)
HA = H1 + 0.1 * CP * N * (T1 - T2)
HB = H1 + 0.4 * CP * N * (T1 - T2)
HC = H2 - 0.4 * CP * N * (T1 - T2)
HD = H2 - 0.1 * CP * N * (T1 - T2)
DHA = A - HA
DHB = B - HB
DHC = C - HC
DHD = D - HD
S = (1 / DHA) + (1 / DHB) + (1 / DHC) + (1 / DHD)
K = S * CP * (T1 - T2) / 4
TxtK.Text = "" & K
End Sub
End Class

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลอง

หอระบายความร้อน (Cooling Tower)

1. วัตถุประสงค์

- 1.1. เพื่อศึกษาหลักการทำงานของหอระบายความร้อนชนิดอากาศหมุนเวียนด้วยแรงกล
- 1.2. เพื่อศึกษาหลักการถ่ายเทความร้อนในหอระบายความร้อน
- 1.3. เพื่อศึกษาและคำนวณขีดความสามารถของหอระบายความร้อน

2. ทฤษฎี

หลักการทำงาน

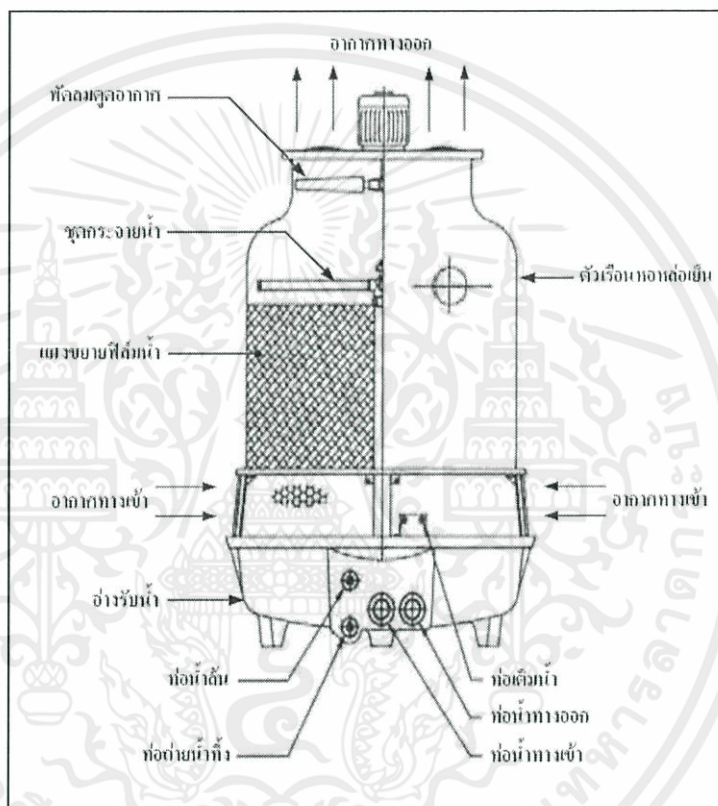
หอระบายความร้อนเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับระบายความร้อนออกจากน้ำที่มีอุณหภูมิสูงในระบบทำความเย็นหรือในกระบวนการผลิต ทำให้อุณหภูมิของน้ำลดลงและสามารถนำกลับไปใช้หมุนเวียนในระบบได้อีก การระบายความร้อนจะอาศัยการถ่ายเทความร้อนจากน้ำสู่อากาศและจะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิของน้ำสูงกว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียของอากาศ ซึ่งกลไกการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในหอระบายความร้อน ได้แก่ การถ่ายเทความร้อนสัมผัส (sensible heat) จากน้ำสู่อากาศ และการถ่ายเทความร้อนแฝง (latent heat) จากการระเหยของน้ำบางส่วนออกจากน้ำไหลเวียน ดังนั้นการคำนวณการถ่ายเทความร้อนในหอระบายความร้อนจึงต้องอาศัยการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลไปพร้อมกัน

หอระบายความร้อนชนิดไหลสวนทาง อากาศจะถูกดูดขึ้นและแทรกตัวผ่านแผงขยายฟิล์มน้ำ (packing) ไปสัมผัสกับฟิล์มน้ำที่ถูกกระจายออกเต็มแผงขยายฟิล์มนั้นและเคลื่อนที่ลงมาด้านล่างของตัวหอระบายความร้อน การระเหยของน้ำจะเกิดขึ้นที่ฟิล์มน้ำร้อนบนแผงขยายฟิล์มทำให้น้ำสูญเสียความร้อนแฝงและเย็นตัวลงในที่สุด

หอระบายความร้อนชนิดไหลขวาง น้ำจะไหลผ่านหัวฉีดจากด้านบนลงสู่ด้านล่างผ่านแผงขยายฟิล์มและอากาศจะไหลมาตามแนวระดับผ่านแผงขยายฟิล์มและแผงกั้นกระเซ็น แล้วไหลออกทางด้านบนของหอระบายความร้อน

การถ่ายเทความร้อนจากน้ำร้อนสู่อากาศจะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิของน้ำร้อนสูงกว่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศและการระเหยของไอน้ำออกจากผิวร่วมระหว่างน้ำและอากาศ จะเกิดขึ้นเสมอเมื่ออัตราส่วนของความชื้นของอากาศอิ่มตัวมีค่าสูงกว่าอัตราส่วนความชื้นของอากาศ ดังนั้นถ้าอากาศไม่อิ่มตัวไหลผ่านแผงขยายฟิล์ม น้ำจะระเหยไปในอากาศนั้น ทำให้อากาศมีความชื้นเพิ่มขึ้น ความร้อนแฝงของการระเหยของน้ำจะถูกดึงออกมาจากน้ำที่มีอุณหภูมิสูงและถ่ายเทสู่อากาศ

โดยปกติหอบระบายความร้อนชนิดไหลสวนทางน้ำร้อนจะไหลเข้าด้านบนของแผงขยายฟิล์ม และไหลลงสู่ด้านล่างของของแผงขยายฟิล์ม จึงทำให้อุณหภูมิของน้ำลดลงเรื่อยๆเมื่อไหลลงสู่ด้านล่าง ในการออกแบบหอบระบายความร้อนจึงต้องทำให้น้ำที่ทางออกมีอุณหภูมิลดลงจนเข้าใกล้อุณหภูมิ กระเปาะเปียกของอากาศให้มากที่สุด แต่ในทางปฏิบัติอุณหภูมิของน้ำทางออกแผงขยายฟิล์มจะ ลดลงไม่ถึงอุณหภูมิกะเปาะเปียกของอากาศบรรยากาศ ซึ่งขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของหอบระบาย ความร้อนด้วย



ภาพที่ 1 แสดงส่วนประกอบของหอล้อเย็นชนิดลมดูดไหลสวนทาง

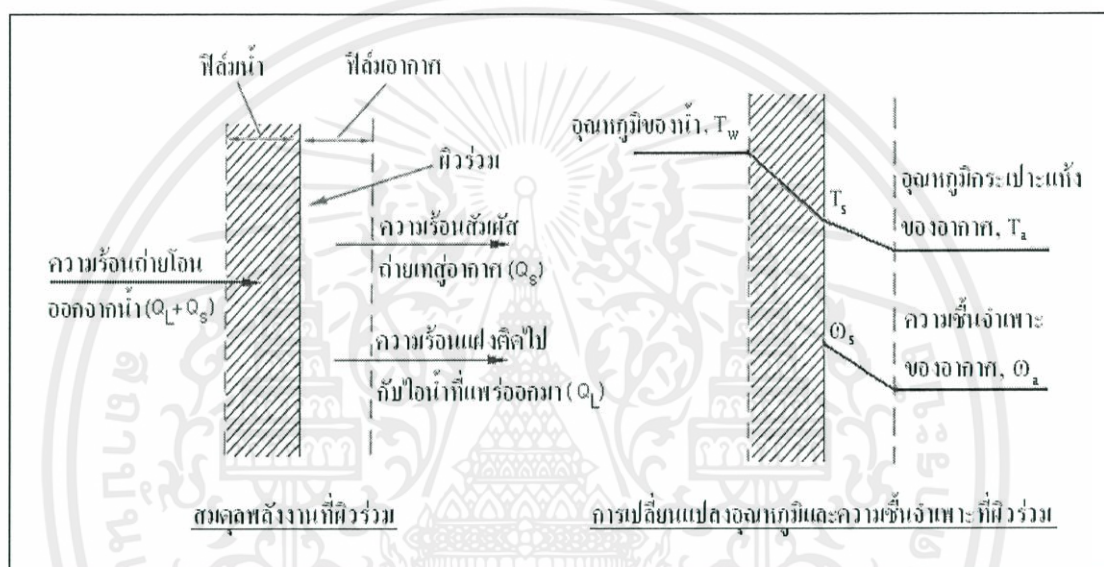
กลไกการถ่ายเทความร้อน

สำหรับความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของน้ำทางเข้าหอบระบายความร้อนและอุณหภูมิของ น้ำทางออกหอบระบายความร้อน เรียกว่า เรนจ์ ส่วนความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของน้ำทางออกหอบ ระบายความร้อนและอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศทางเข้าหอบระบายความร้อน เรียกว่า แอป โพรซ

สาเหตุที่ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวล (การระเหยของน้ำ) คือ ศักย์ขับ ความร้อน (driving force) ระหว่างน้ำกับอากาศ ซึ่งเป็นผลมาจาก

1. อุณหภูมิแตกต่างระหว่างน้ำและอากาศ ซึ่งจะใช้อุณหภูมิที่ผิวร่วมและอุณหภูมิกระเปาะแห้ง ในรูปที่ 2 คักย์ขับเคลื่อนความร้อนสัมผัส คือ $(T_s - T_a)$ ทำให้ความร้อนสัมผัส (Q_s) ถ่ายเทจากผิวร่วมสู่อากาศ

2. ความแตกต่างระหว่างความดันไอของอากาศที่ผิวร่วมและความดันไอของอากาศ อาจใช้ผลต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นของอากาศที่ผิวร่วม (ω_s) และอัตราส่วนความชื้นภายนอกผิวร่วม (ω_a) คักย์ขับเคลื่อนคือ $(\omega_s - \omega_a)$ จึงทำให้ความร้อนแฝงติดไปกับไอน้ำที่ระเหยออกมาจากผิวร่วม (Q_L) และเข้าสู่อากาศ



ภาพที่ 2 การถ่ายโอนความร้อนข้ามผิวร่วมระหว่างน้ำกับอากาศเมื่ออุณหภูมิของน้ำต่ำกว่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศ (มนตรี 2544)

ความสามารถในการถ่ายเทความร้อน (thermal performances) ของหอระบายความร้อนสามารถอธิบายได้โดยพารามิเตอร์ๆ ดังนี้

1) แอปโพรช (Approach) คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศทางเข้าและอุณหภูมิของน้ำเย็นที่หอระบายความร้อนทำได้ แสดงถึงความสามารถในการถ่ายเทความร้อนแฝง

2) เรนจ์ (Range) คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิของน้ำที่ทางเข้าและอุณหภูมิของน้ำที่ทางออกของหอระบายความร้อน ($R = T_{w,in} - T_{w,out}$) แสดงถึงความสามารถในการถ่ายเทความร้อน

สัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
3) ค่าคุณลักษณะของหอระบายความร้อน (Tower Characteristic ; KaV/L)
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือทำซ้ำ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาสมรรถนะการใช้งานของหอระบายความร้อน

การหาสมรรถนะการใช้งานของหอระบายความร้อนโดยการสร้างกราฟคุณลักษณะเฉพาะของหอระบายความร้อนจะใช้วิธีมาตรฐานของสถาบันหอระบายความร้อน (CTI) โดยแบ่งการคำนวณออกเป็นขั้นตอนดังนี้

1) การคำนวณ KaV/L ตามวิธีเชบายเซฟฟ์

จากการทดสอบหอระบายความร้อนตัวหนึ่งๆจะสามารถวัดค่าของอุณหภูมิของน้ำร้อนทางเข้า (T_1) และอุณหภูมิของน้ำเย็นทางออก (T_2) และอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศทางเข้า (T_{wb}) ภายใต้อำหนดของ L/G นั้น ค่าของ KaV/L สามารถหาได้จากสมการ

$$\frac{KaV}{L} = \int_{T_2}^{T_1} \frac{c_L dT}{(h_w - h)} \quad (1)$$

การคำนวณค่าของ KaV/L นี้อยู่ในรูปของปริพันธ์ วิธีเชบายเซฟฟ์จะนำมาใช้หาปริพันธ์นี้โดยตรง โดยพิจารณาดังนี้ ปริพันธ์ของ $\int_a^b y dx$ จะพิจารณาในรูปของผลบวกของแต่ละค่าของ y ที่กำหนดไว้ทั้งหมด 4 จุดในช่วงของ $a \leq x \leq b$ แล้วคูณด้วยค่าของ $(b-a)$ ตำแหน่งหรือจุดที่ใช้พิจารณาค่าของ y อยู่ที่ $x = 0.10(b-a)$, $0.40(b-a)$, $0.6(b-a)$ และ $0.9(b-a)$ ตามลำดับ ซึ่งได้แก่จุด A, B, C และ D ตามลำดับ ดังแสดงในภาพ 1. ดังนั้น

$$\int_a^b y dx = \frac{b-a}{4} (y_A + y_B + y_C + y_D) \quad (2)$$

โดยที่ y_A คือค่า y ที่ตำแหน่ง $x_A = a + 0.1(b-a)$
 y_B คือค่า y ที่ตำแหน่ง $x_B = a + 0.4(b-a)$
 y_C คือค่า y ที่ตำแหน่ง $x_C = b - 0.4(b-a)$ หรือ $a + 0.6(b-a)$
 y_D คือค่า y ที่ตำแหน่ง $x_D = b - 0.1(b-a)$ หรือ $a + 0.9(b-a)$

กำหนด $dx = dT$ และ $y = \frac{1}{\Delta h}$ โดยที่ $\Delta h = (h_w - h)$ ดังนั้นจากสมการ (1) จะเขียนได้ดังนี้

$$\frac{KaV}{L} = \frac{c_L(T_1 - T_2)}{4} \left[\frac{1}{\Delta h_A} + \frac{1}{\Delta h_B} + \frac{1}{\Delta h_C} + \frac{1}{\Delta h_D} \right] \quad (3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

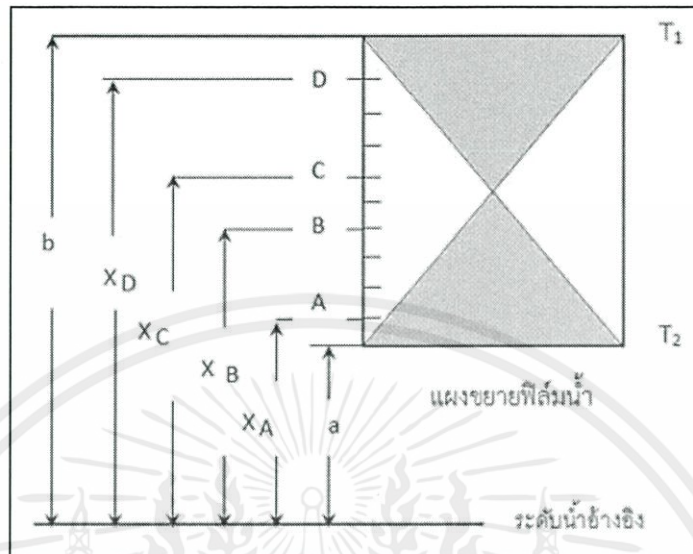
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ขอสงวนสิทธิ์ในสิ่งที่ปรากฏ ไม่รับผิดชอบต่อการใช้งานใดๆของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Δh_A คือ ค่าของ $(h_s - h_a)$ ที่อุณหภูมิ $T_2 + 0.1(T_1 - T_2)$

Δh_B คือ ค่าของ $(h_s - h_a)$ ที่อุณหภูมิ $T_2 + 0.4(T_1 - T_2)$

Δh_C คือ ค่าของ $(h_s - h_a)$ ที่อุณหภูมิ $T_1 + 0.4(T_1 - T_2)$ หรือ $T_2 + 0.6(T_1 - T_2)$

Δh_D คือ ค่าของ $(h_s - h_a)$ ที่อุณหภูมิ $T_1 + 0.1 (T_1 - T_2)$ หรือ $T_2 + 0.9 (T_1 - T_2)$



ภาพที่ 3 ตำแหน่งพิจารณา ค่าของ y 4 ตำแหน่ง ตามวิธีเซบายเซฟฟ์

กำหนดรายละเอียดในการทดสอบคูลลิ่งทาวเวอร์แบบไหลสวนทาง

5. อุณหภูมิของน้ำร้อนทางเข้า (T_{wi}), T_1
6. อุณหภูมิของน้ำเย็นทางออก (T_{wo}), T_2
7. อุณหภูมิกระเปาะเปียกทางเข้า (T_{WB})
8. อัตราส่วนของอัตราการไหล L/G

ขั้นตอนการคำนวณ

4. แบ่งช่องอุณหภูมิของน้ำ ($T_1 - T_2$) ออกเป็น 10 ส่วน ๆ ละเท่ากัน
5. กำหนดจุดพิจารณาค่าของ y 4 ตำแหน่งตามวิธีของเซบายเซฟฟ์ จะได้จุด A, B, C และ D
6. คำนวณสมมูลของพลังงาน $(G\Delta h)_{air} = (L C_L \Delta T)_{water}$ และจะได้

$$\Delta h = \frac{L}{G} C_L \Delta T \quad (4)$$

กำหนดให้เอนทัลปีของอากาศที่จุด 1 (h_1) เป็นเอนทัลปีของอากาศอิ่มตัวที่อุณหภูมิกระเปาะ

เปียกของอากาศที่จุดนั้น $T_{wb1} = 12^\circ\text{C}$ และใช้ตารางที่ X หาเอนทัลปีของอากาศอิ่มตัว เอนทัลปีของอากาศที่จุด 1, A, B, C, D และ 2 คือ h_1, h_A, h_B, h_C, h_D และ h_2 เมื่อทราบอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศที่เข้า (T_{WB1}) จึงทำให้หา h_1 ได้จากตารางที่ 1 และสามารถนำไปคำนวณเอนทัลปีที่จุดอื่นได้ดังนี้

$$h_2 = h_1 + C_L(L/G)(T_1 - T_2) \quad (5a)$$

$$h_A = h_1 + 0.1 C_L(L/G)(T_1 - T_2) \quad (5b)$$

$$h_B = h_1 + 0.4 C_L(L/G)(T_1 - T_2) \quad (5c)$$

$$h_C = h_2 + 0.4 C_L(L/G)(T_1 - T_2) \quad (5d)$$

$$h_D = h_2 + 0.1 C_L(L/G)(T_1 - T_2) \quad (5e)$$

ในที่นี้ C_L คือ ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ ซึ่งปกติจะใช้ $C_L = 4.1868 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$

Flow chart ที่ใช้ในการคำนวณ

Flow Chart to Calculation Cooling
Performance for Induce Draft Cooling Tower



ป้อนข้อมูลของอุณหภูมิน้ำเข้า, T_1 อุณหภูมิน้ำออก, T_2
อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศ, T_{wb} อัตราการไหล
ของอากาศ, G อัตราการไหลของน้ำ, L อุณหภูมิกระเปาะ
แห้ง, T_{db}



หาอัตราส่วนการไหลเชิงมวลระหว่างน้ำกับอากาศ
(L/G) โดยกำหนดให้ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ
(C_L) มีค่าเท่ากับ $4.1868 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ แล้วหาอุณหภูมิ 4
จุดตามความสูงของหอระบายความร้อน ตามวิธีของ
เซบายเซฟท์ตามสมการ

$$T_A = T_2 + 0.1 * (T_1 - T_2)$$

$$T_B = T_2 + 0.4 * (T_1 - T_2)$$

$$T_C = T_1 - 0.4 * (T_1 - T_2)$$

$$T_D = T_1 - 0.1 * (T_1 - T_2)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คัดแปลงเนื้อหาแต่ละหัวข้อไปยังเว็บไซต์ต่างๆของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาเอนทัลปีของอากาศอิมตัวทางเข้า, h_1 และหาเอนทัลปีของอากาศอิมตัวทางออก, h_2 จากสมการ

$$h_2 = h_1 + C_L(L/G)(T_1 - T_2)$$



หาเอนทัลปีของอากาศโดยแบ่งเป็น 4 จุด ตามความสูงของหระบายความร้อน ตามสมการ

$$h_A = h_1 + 0.1 * C_L * (L/G) * (T_1 - T_2)$$

$$h_B = h_1 + 0.4 * C_L * (L/G) * (T_1 - T_2)$$

$$h_C = h_2 - 0.4 * C_L * (L/G) * (T_1 - T_2)$$

$$h_D = h_2 - 0.1 * C_L * (L/G) * (T_1 - T_2)$$



หาเอนทัลปีของอากาศอิมตัวที่อุณหภูมิเดียวกันกับน้ำที่จุด A, B, C และ D

$$(h_w)_A \text{ ที่ } T_A$$

$$(h_w)_B \text{ ที่ } T_B$$

$$(h_w)_C \text{ ที่ } T_C$$

$$(h_w)_D \text{ ที่ } T_D$$



คำนวณ

$$\sum \frac{1}{\Delta h} = \frac{1}{(h_w)_A - h_A} + \frac{1}{(h_w)_B - h_B} + \frac{1}{(h_w)_C - h_C} + \frac{1}{(h_w)_D - h_D}$$



หาค่า KaV/L จากสมการ

$$\frac{KaV}{L} = \frac{\sum \left(\frac{1}{\Delta h} \right) C_L (T_1 - T_2)}{4}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ $\sum \left(\frac{1}{\Delta h} \right) C_L (T_1 - T_2)$ กรุณาให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอยู่ 4 อังคิงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการคำนวณ

กำหนดรายละเอียดในการทดสอบหอระบายความร้อนแบบไหลสวนทาง

- อุณหภูมิของน้ำร้อนทางเข้า (HWT), $T_1 = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$
- อุณหภูมิของน้ำเย็นทางออก (CWT), $T_2 = 32\text{ }^{\circ}\text{C}$
- อุณหภูมิกระเปาะเปียกทางเข้า (TWB) = $28\text{ }^{\circ}\text{C}$
- อัตราส่วนของอัตราการไหล, $L/G = 1$

การคำนวณค่า $\frac{1}{\Delta h_A}$, $\frac{1}{\Delta h_B}$, $\frac{1}{\Delta h_C}$ และ $\frac{1}{\Delta h_D}$ ตามวิธีของทีเซบายเพฟี

อุณหภูมิของน้ำ $^{\circ}\text{C}$	h_w (kJ/kg)	h_s (kJ/kg)	Δh $=(h_w - h_s)$	$1/\Delta h$
T_2 (Tw,out) = 32	-	$h_1 = 89.527$	-	-
$T_A = T_2 + 0.1(T_1 - T_2) = 32.8$	115.323	$h_A = 92.877$	22.446	0.04455
$T_B = T_2 + 0.4(T_1 - T_2) = 35.2$	130.383	$h_B = 102.925$	27.458	0.03642
$T_C = T_1 - 0.4(T_1 - T_2) = 36.8$	141.223	$h_C = 109.624$	31.599	0.03165
$T_D = T_1 - 0.1(T_1 - T_2) = 39.2$	158.684	$h_D = 119.672$	39.012	0.02563
T_1 (Tw,in) = 40	-	$h_2 = 123.022$	-	-
				0.13825

ดังนั้น

$$\begin{aligned} \frac{KaV}{L} &= \frac{C_L (T_1 - T_2)}{4} \sum \left(\frac{1}{\Delta h} \right) \\ &= 4.175 \left(\frac{40 - 32}{4} \right) (0.13825) = 1.154 \end{aligned}$$

2) การหาสมการคุณลักษณะเฉพาะของหอระบายความร้อน

ค่าคงที่สัมพันธ์กับการออกแบบแผงกระจายฟิล์มน้ำ (C) ของสมการคุณลักษณะเฉพาะของหอระบายความร้อน หาได้จากสมการ

$$\frac{KaV}{L} = C \left(\frac{L}{G} \right)^n \quad (6)$$

โดยกำหนด $n = -0.6$ ซึ่งสภาวะออกแบบที่ค่าแอมไพโรซ $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, ค่า $L/G = 0.957$ และ

$KaV/L = 0.264$ สำหรับการออกแบบ จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$0.718 = C(0.957)^{-0.6}$$

$$C = 0.257$$

ดังนั้น สมการคุณลักษณะเฉพาะของหอบายความร้อน คือ

$$\frac{KaV}{L} = 0.257\left(\frac{L}{G}\right)^{-0.6} \quad (7)$$

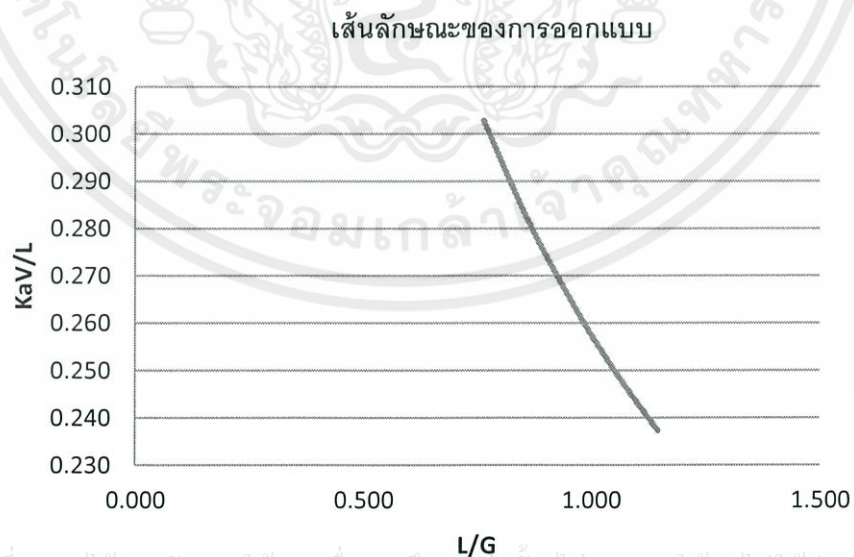
3) การสร้างกราฟคุณลักษณะของหอบายความร้อน

(1) กราฟคุณลักษณะ

สมรรถนะหรือความสามารถในการทำงานของหอบายความร้อนแสดงด้วย กราฟกราฟคุณลักษณะซึ่งสร้างจากสมการคุณลักษณะเฉพาะของหอบายความร้อน ตามสมการที่ (7) โดยใช้ค่า L/G ตั้งแต่ 60% ถึง 120% ที่สภาวะออกแบบ คำนวณค่า KaV/L ดังแสดงในตารางที่ 1 นำไปสร้างกราฟคุณลักษณะของการออกแบบ ดังรูปที่ 4

ตารางที่ 1 ค่า KaV/L ที่ L/G ค่าต่างๆ

% (L/G)	(L/G)	KaV/L จากสมการ (7)
120	1.148	0.237
110	1.053	0.249
100	0.957	0.264
90	0.861	0.281
80	0.756	0.304



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังรูปที่ 4 กราฟคุณลักษณะของหอบายความร้อนสำหรับการออกแบบ นำไปใช้

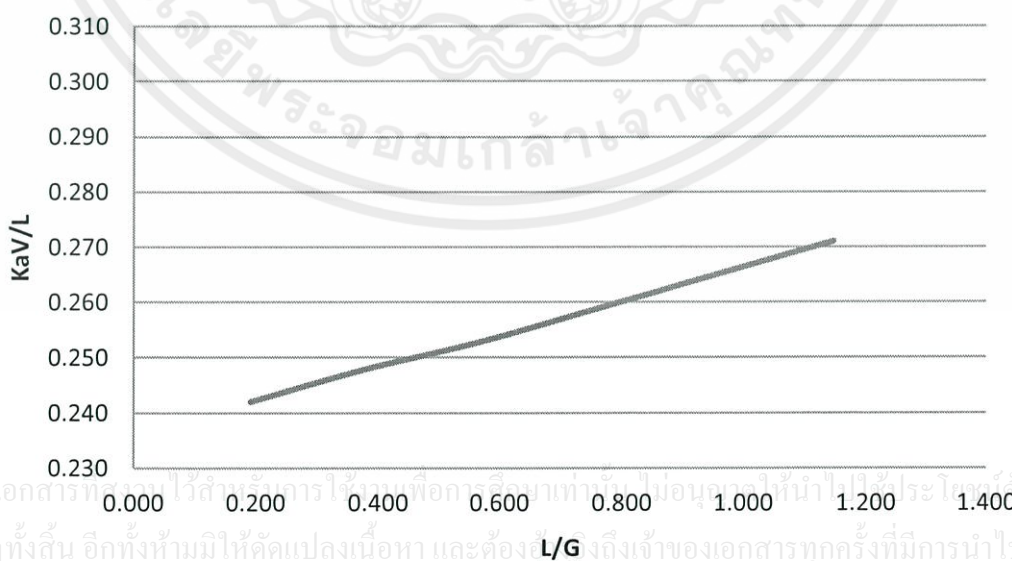
(2) กราฟแอปโพรช 5 °C

กราฟแอปโพรชเป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า KaV/L และค่า L/G โดยกำหนดให้ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศทางเข้าและอุณหภูมิของน้ำทางออกจากหอระบายความร้อนคงที่ไว้ที่ค่าหนึ่ง ในที่นี้กำหนดไว้ที่ 5°C จากนั้นคำนวณค่า KaV/L จากวิธีของ Tchebycheff ในสมการที่ (3) โดยใช้ค่า L/G ตั้งแต่ 20% ถึง 120% ของค่าที่สภาวะออกแบบ ดังแสดงในตารางที่ 2 และนำค่าที่ได้มาสร้าง กราฟแอปโพรชที่ 5 °C ดังภาพที่ 5

ตารางที่ 2 ค่า KaV/L ที่ L/G ค่าต่างๆ โดยวิธี เซบายเชฟฟ์

%L/G	L/G	KaV/L
120	1.148	0.271
110	1.053	0.268
100	0.957	0.264
90	0.861	0.261
80	0.766	0.258
60	0.574	0.253
40	0.383	0.248
20	0.1914	0.242

กราฟแสดงเส้นแอปโพรช

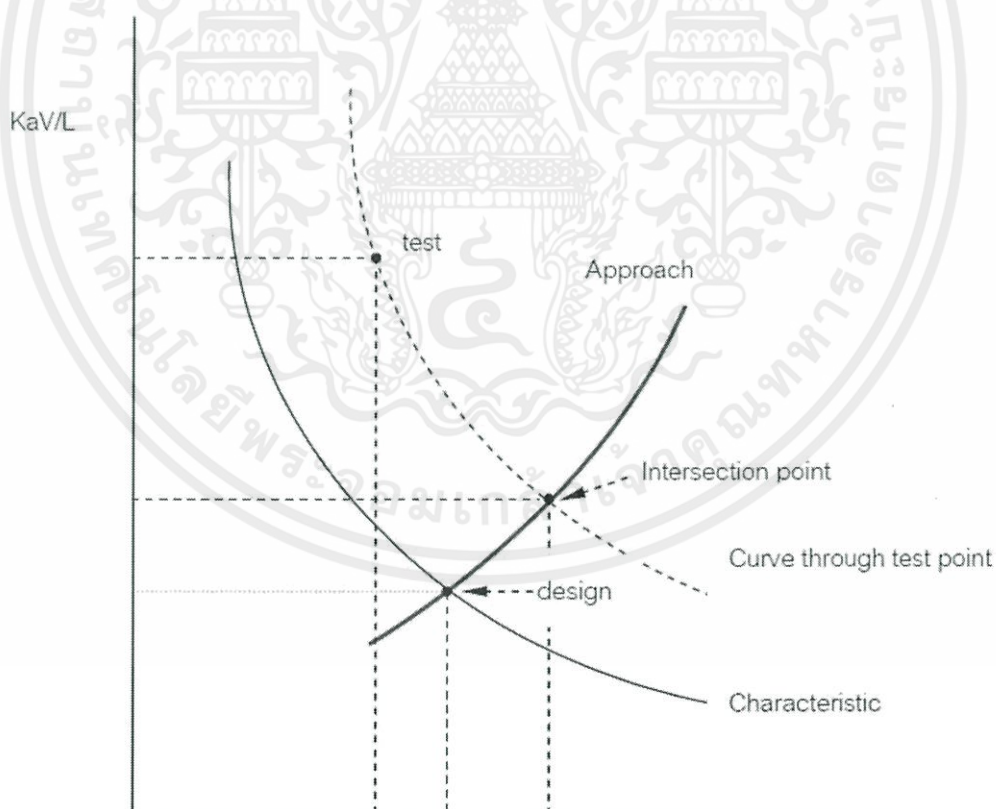


รูปที่ 5 กราฟแอปโพรช 5 °C

(3) การหาค่าขีดความสามารถของหอบายความร้อน

สมรรถนะในการทำงานของหอบายความร้อนพิจารณาจากขีดความสามารถของหอบายความร้อน (Tower Capability) โดยใช้วิธีตามมาตรฐานของสถาบันหอบายความร้อน (CTI) โดยการนำข้อมูลของหอบายจากผู้ผลิตมาคำนวณและสร้างกราฟคุณลักษณะของหอบายความร้อนของการออกแบบและเส้นแอมป์โพรซ 5 °C ซึ่งจุดตัดระหว่างเส้นทั้งสองเรียกว่า “จุดออกแบบ” (Design point) ซึ่งที่จุดนี้จะให้ค่า $(L/G)_{design}$ จากนั้นทำการทดลองหาค่า L/G และ KaV/L เพื่อสร้างเส้นกราฟคุณลักษณะการทดสอบ ซึ่งจะได้จุดตัดกับกราฟแอมป์โพรซ เรียกว่า “จุดทำงาน” ที่ $(L/G)_{test}$ รูปที่ 6 จากนั้นนำ จุดออกแบบ $(L/G)_{design}$ และจุดทดสอบ $(L/G)_{test}$ ที่ได้มาคำนวณหาขีดความสามารถของหอบายความร้อนของแต่ละอัตราการไหลจากสมการ

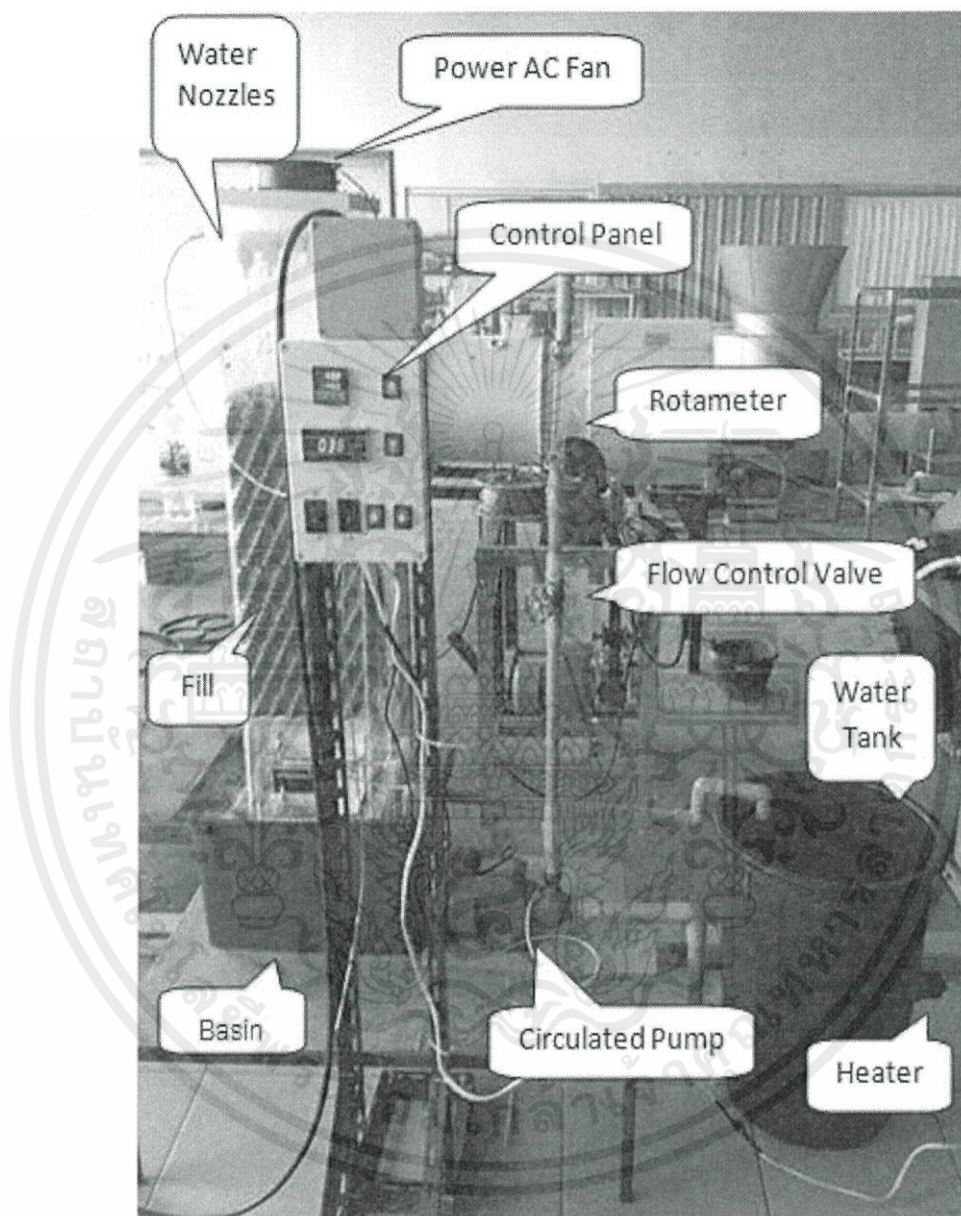
$$\text{ขีดความสามารถของหอบายความร้อน} = \frac{(L/G)_{test}}{(L/G)_{design}} \times 100 \quad (8)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ L/G โฆษณาด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ลือทั้งนี้ขอเป็นข้อแนะนำและขอร้องว่าถึงแม้จะแจ้งเอกสารเหล่านี้ไว้ก็ตามให้นำไปใช้
รูปที่ 6 การหาจุดตัดระหว่างกราฟแอมป์โพรซและกราฟคุณลักษณะของหอบายความร้อน

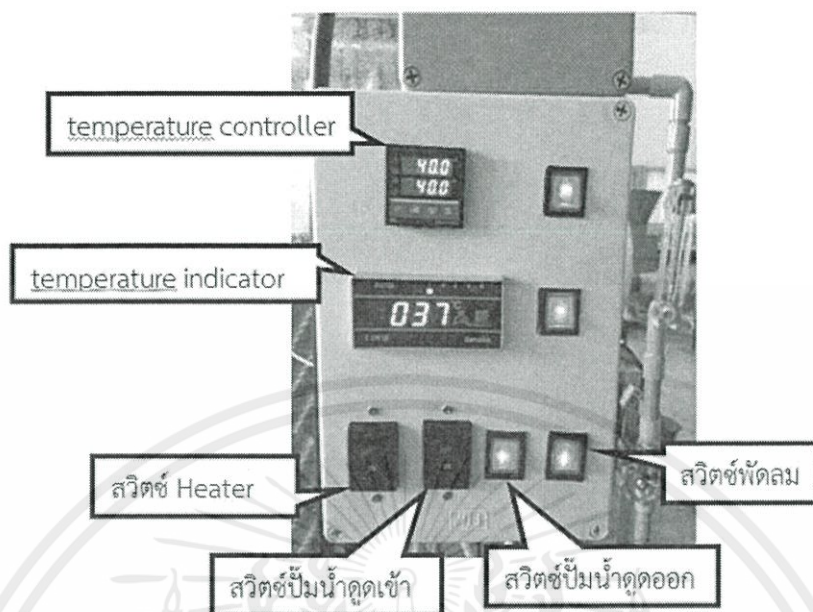
3. การทดลอง

3.1 อุปกรณ์การทดลอง



ภาพที่ 7 ชุดทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8 ชุดอุปกรณ์ควบคุม

3.2 วิธีการทดลอง

1. เปิดสวิทช์ที่ควบคุมการทำงานของฮีตเตอร์เพื่อเริ่มการทำงานของฮีตเตอร์และตั้งค่าอุณหภูมิของน้ำที่เครื่องควบคุมอุณหภูมิไปที่ 40 °C รอจนน้ำในถังมีอุณหภูมิเพิ่มจนถึง 40 °C โดยดูค่าจากเครื่องควบคุมอุณหภูมิ
2. เปิดสวิทช์ที่ควบคุมการทำงานของปั้มน้ำเพื่อให้ปั้มน้ำเริ่มสูบน้ำจากถังเก็บน้ำร้อนเข้าหอระบายความร้อน
3. ปรับอัตราการไหลของน้ำที่ทางเข้าหอระบายความร้อนที่วาล์วปรับอัตราการไหลไปที่ 2 L/min โดยดูค่าอัตราการไหลของน้ำที่โรตาริเตอร์ คำนวณอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำ, L (kg/s) (กำหนดความหนาแน่นของน้ำเท่ากับ 992.22 kg/m³) และจดบันทึกค่าลงในตารางบันทึกข้อมูลผลการทดลอง
4. เปิดสวิทช์พัดลมดูดอากาศ วัดอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศทางเข้าและจดบันทึกค่าลงในตารางบันทึกข้อมูลผลการทดลอง
5. วัดอัตราการไหลของอากาศด้วยแอนิเมเตอร์ คำนวณหาอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ, G (kg/s) และจดบันทึกค่าลงในตารางบันทึกข้อมูลผลการทดลอง
6. เดินเครื่องอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady state) ซึ่งสังเกตได้จากอุณหภูมิของน้ำทางเข้าและออกของหอระบายความร้อนเริ่มมีค่าที่คงที่ และจดบันทึกค่าอุณหภูมิ น้ำทางออกของหอระบายความร้อนลงในตารางบันทึกข้อมูลผลการทดลอง
7. นำค่าจากตารางบันทึกข้อมูลผลการทดลองมาหาสมการบ่งลักษณะเฉพาะ

8. ปรับอัตราการไหลของน้ำทางเข้าหอบายความร้อนเท่ากับ 3.0, 4.0, 5.0 และ 6.0 L/min บันทึกค่าที่ได้ลงในตารางบันทึกข้อมูลผลการทดลอง และทำการทดลองซ้ำในข้อ 6
9. นำค่าจากตารางบันทึกข้อมูลผลการทดลอง แทนค่าลงในสมการบ่งลักษณะเฉพาะในข้อที่ 7
10. นำค่า KaV/L กับ L/G ที่ได้ทั้งหมดมาสร้างกราฟสมรรถนะการใช้งาน และคำนวณหาค่าขีดความสามารถของหอบายความร้อน

4. ผลการทดลอง

ตารางบันทึกข้อมูลการทดลอง

อุณหภูมิอากาศทางเข้า ($^{\circ}C$)	
อุณหภูมิกระเปาะเปียกทางเข้า, T_{wb} ($^{\circ}C$)	
ความชื้นสัมพัทธ์ (%RH)	

ตาราง บันทึกข้อมูลการทดลองครั้งที่ 1

อัตราการไหลของน้ำที่ 2 ส/min	
รายละเอียดการทดลอง	ค่าที่ได้
อุณหภูมิน้ำทางเข้า, T_1 ($^{\circ}C$)	40 $^{\circ}C$
ความหนาแน่นของน้ำทางเข้า (kg/m^3)	992.22
อัตราการไหลของน้ำ (L/min)	2.0
อัตราการไหลโดยมวลของน้ำ, L (kg/s)	
อัตราการไหลโดยมวลของอากาศ, G (kg/s)	
อัตราส่วนอัตราการไหล, L/G	
อุณหภูมิน้ำทางออก, T_2 ($^{\circ}C$)	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง บันทึกข้อมูลการทดลองครั้งที่ 2

อัตราการไหลของน้ำที่ 3.0 l/min	
รายละเอียดการทดลอง	ค่าที่ได้
อุณหภูมิน้ำทางเข้า, T_1 (°C)	40 °C
ความหนาแน่นของน้ำทางเข้า (kg/m^3)	992.22
อัตราการไหลของน้ำ (l/min)	3.0
อัตราการไหลโดยมวลของน้ำ, L (kg/s)	
อัตราการไหลโดยมวลของอากาศ, G (kg/s)	
อัตราส่วนอัตราการไหล, L/G	
อุณหภูมิน้ำทางออก, T_2 (°C)	

ตาราง บันทึกข้อมูลการทดลองครั้งที่ 3

อัตราการไหลของน้ำที่ 4.0 l/min	
รายละเอียดการทดลอง	ค่าที่ได้
อุณหภูมิน้ำทางเข้า, T_1 (°C)	40 °C
ความหนาแน่นของน้ำทางเข้า (kg/m^3)	992.22
อัตราการไหลของน้ำ (l/min)	4.0
อัตราการไหลโดยมวลของน้ำ, L (kg/s)	
อัตราการไหลโดยมวลของอากาศ, G (kg/s)	
อัตราส่วนอัตราการไหล, L/G	
อุณหภูมิน้ำทางออก, T_2 (°C)	

ตาราง บันทึกข้อมูลการทดลองที่ 4

อัตราการไหลของน้ำที่ 5.0 l/min	
รายละเอียดการทดลอง	ค่าที่ได้
อุณหภูมิน้ำทางเข้า, T_1 (°C)	40 °C
ความหนาแน่นของน้ำทางเข้า (kg/m^3)	992.22
อัตราการไหลของน้ำ (l/min)	5.0
อัตราการไหลโดยมวลของน้ำ, L (kg/s)	
อัตราการไหลโดยมวลของอากาศ, G (kg/s)	
อัตราส่วนอัตราการไหล, L/G	
อุณหภูมิน้ำทางออก, T_2 (°C)	

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้ในการค้า

ตาราง บันทึกข้อมูลการทดลองที่ 5

อัตราการไหลของน้ำที่ 6.0 l/min	
รายละเอียดการทดลอง	ค่าที่ได้
อุณหภูมิน้ำทางเข้า, T_1 (°C)	40 °C
ความหนาแน่นของน้ำทางเข้า (kg/m^3)	992.22
อัตราการไหลของน้ำ (l/min)	6.0
อัตราการไหลโดยมวลของน้ำ, L (kg/s)	
อัตราการไหลโดยมวลของอากาศ, G (kg/s)	
อัตราส่วนอัตราการไหล, L/G	
อุณหภูมิน้ำทางออก, T_2 (°C)	

5. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้