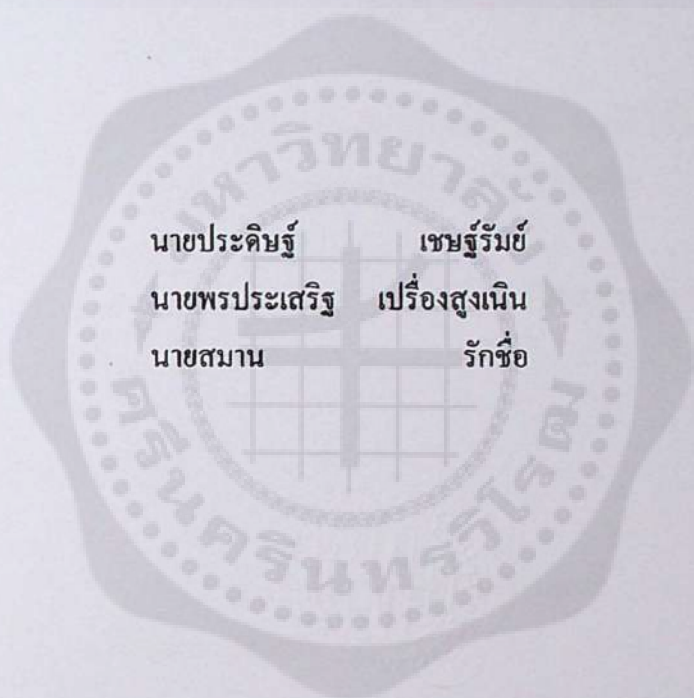


สมรรถภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดกันหอย
PERFORMANCE OF A COMPACT SPIRAL COIL HEAT EXCHANGER

26 ส.ย. 7544



นายประดิษฐ์ เซษจุรัมย์
นายพรประเสริฐ เปื้องสูงเนิน
นายสมาน รักชื้อ

โครงงานวิศวกรรมศาสตร์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ปีการศึกษา 2543

หัวข้อโครงการวิศวกรรมศาสตร์

สมรรถภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน
แบบขดกันหอย

โดย

นาย ประดิษฐ์ เชษฐรัมย์
นาย พรประเสริฐ เปื้องสูงเนิน
นาย สมาน รักชื่อ

ภาควิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ ไพศาล นาผล

คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ อนุมัติให้โครงการวิศวกรรม
ศาสตร์เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต

..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รศ.ดร. ศักดิ์ กองสุวรรณ)

คณะกรรมการสอบปริญญาโท

..... ประธานกรรมการ

(อ. ไพศาล นาผล)

..... กรรมการ

(อ. มนต์ แป้งใส)

..... กรรมการ

(อ. ประชาสันติ ไตรยสุทธิ)

..... กรรมการ

(อ. กิตติ สถาพรประเสริฐ)

สมรรถภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดกันหอย

ปีการศึกษา 2543

โดย

อาจารย์ที่ปรึกษา

นาย ประดิษฐ์ เชษฐรัมย์
นาย พรประเสริฐ เปรื่องสูงเนิน
นาย สมาน รักชื้อ

อาจารย์ ไพศาล นาผล

บทคัดย่อ

โครงการวิศวกรรมศาสตร์ ฉบับนี้เป็นการศึกษาการถ่ายเทความร้อน ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดกันหอย ซึ่งผู้ศึกษาได้ออกแบบระบบท่ออุโมงค์ลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร ท่อทดสอบทำจากท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.525 มิลลิเมตร มีจำนวนชุด 6 ชุด ซึ่งมีจำนวนชั้นทั้งหมด 9 ชั้น และ อุปกรณ์ต่าง ๆ ตลอดจนทำการทดลองการถ่ายเทความร้อนของท่อขดกันหอยโดยใช้ น้ำ และ อากาศ เป็นสารทำงาน

จากการทดลองพบว่าตัวแปรที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน คือ อุณหภูมิ น้ำ อุณหภูมิ อากาศ อัตราการไหลของน้ำ และ อากาศ นอกจากนั้นลักษณะของคอยล์ เช่น ความโค้งของท่อทดสอบ จำนวนรอบของชุด และ จำนวนชั้นของชุดทดสอบ ก็มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนในการทดลองด้วย

PERFORMANCE OF A COMPACT SPIRAL COIL HEAT EXCHANGER

Academic Year 2000

By

Mr. Pradit Chetram

Mr. Pornprasert Puangsungnoen

Mr. Smarn Rakchue

Project Report Advisor

Mr. Paisarn Narphon

ABTRACT

In this engineering, the heat transfer in spiral coil heat exchanger was designed and constructed. The test channel made of zinc, with inside diameter and length of 30, 1100 cm respectively. The test section have inside diameter of 9.525 mm, 6 number of coil turn and 9 level .The experimental were conducted a various water and air flow rate, water and air temperature

The results from experimental show that the water air flow rate, water and air temperature were effected to the heat transfer rate of coil unit . Furthermore, the coil characteristics ; number of coil turn, curvature of coil were have been effected to heat transfer too.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ อาจารย์ ไพศาล นาผล และ คณะกรรมการโครงการวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำ ตรวจสอบ และ แก่ไขจนทำให้โครงการวิศวกรรมศาสตร์ ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ขอขอบคุณบริษัท Thai Heat Exchanger ที่ให้ความอนุเคราะห์ท่อทองแดงและอัดรีบที่ท่อทองแดง ทำให้โครงการวิศวกรรมครั้งนี้บรรลุจุดประสงค์ดังที่ตั้งไว้ ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ท่านอาจารย์ทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนให้ความรู้แก่ผู้เขียนมาตั้งแต่ต้น รวมถึงเพื่อน ๆ ที่ให้การสนับสนุน และ เป็นกำลังใจให้ด้วยดีตลอดมาจนกระทั่งทำให้ผู้เขียน มีโอกาสเขียนโครงการวิศวกรรมศาสตร์ ฉบับนี้ได้สำเร็จ

คณะผู้จัดทำ



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญรูป	ช
สารบัญตาราง	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ผ
บทที่	
1. บทนำ	1
ความสำคัญและความเป็นมา	1
จุดประสงค์ของโครงการ	1
ขอบเขตของโครงการ	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
2. ทฤษฎี	3
หลักการถ่ายเทความร้อน	3
หลักการทำงานและชนิดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน	6
สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม	8
การถ่ายเทความร้อนจากครีป	13
อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดกันหอย	15
ลักษณะการไหลในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดกันหอย	16
หลักการถ่ายเทความร้อนในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดกันหอย	21
การสูญเสียความดันในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดกันหอย	27

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3. การออกแบบและการคำนวณ	29
ระบบการไหลของอากาศในช่องทดสอบ	29
การคำนวณและการออกแบบระบบน้ำ	31
ระบบการไหลของน้ำในชุดทดสอบ	37
4. วิธีการทดลองและผลการทดลอง	42
ส่วนประกอบของชุดทดลอง	42
วิธีการทดลอง	47
ข้อสังเกตและข้อควรระวังในการทดสอบ	49
การวิเคราะห์ผลจากการทดลอง	49
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	54
สรุปผลการทดลอง	54
ข้อเสนอแนะสำหรับงานในอนาคต	54
บรรณานุกรม	56
ภาคผนวกที่	
1. ตารางข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ	57
2. ตารางที่ได้จากการทดลอง	63
3. แสดงตัวอย่างการคำนวณ	91
4. แสดงตารางข้อมูลที่ได้จากการคำนวณ	98
5. ตารางเงื่อนไขในการทดลอง	104
6. แบบโครงสร้างของชุดทดสอบ	109

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงลักษณะการไหลผ่านท่อสองชั้น	7
2.2 แสดงการไหลแบบ Cross flow	7
2.3 แสดงอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Shell and tube	7
2.4 แสดงค่าความแตกต่างของอุณหภูมิเชิงล็อก	9
2.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขนาน	12
2.6 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลสวนทาง	12
2.7 ตัวอย่างของท่อถ่ายความร้อนชนิดครีบริบติดครีบริบตามแนวยาวของท่อ	14
2.8 ตัวอย่างของครีบริบตามแนวขวางของท่อ	14
2.9 แสดงลักษณะของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดกันหอย	16
2.10 แสดงผลของค่า คีน นัมเบอร์ ในรูปแบบความเร็วในแนวแกนของท่อ (a) ในแนวราบ (b) ในแนวตั้ง	18
2.11 แสดงฟังก์ชันสำหรับ ค่า คีน นัมเบอร์ (Dean number) ของการไหลแบบเต็มรูป	18
2.12 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการไหลในท่อตรงกับท่อโค้ง	19
2.13 แสดงลักษณะท่อในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดกันหอย	21
2.14 แสดงลักษณะของรูปแบบของอุณหภูมิสำหรับเงื่อนไขขอบเขตที่มีค่าต่าง ๆ คือ (a) ค่า คีน นัมเบอร์ (Dean number) และ (b) ค่า แพรนเดิล นัมเบอร์ (Prandtl number) สำหรับท่อโค้ง	23
2.15 แสดงการเปรียบเทียบค่าในการออกแบบ กับค่าทางทฤษฎี ของค่า นัสเซลต์ นัมเบอร์ (Nusselt number) สำหรับเงื่อนไขขอบเขต	24
4.1 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	43
4.2 แสดงลักษณะของชุดทดสอบแบบท่อขดกันหอย	44
4.3 แสดงลักษณะของชุดทดสอบ (Test channel) ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน แบบขดกันหอย	44
4.4 แสดงลักษณะของชุดควบคุม	45

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 แสดงลักษณะของชุดแลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดกันหอยและชุดพัดลม	45
4.6 แสดงลักษณะของเครื่องวัดอุณหภูมิ และ Selector switch	46
4.7 แสดงลักษณะของชุดวัดอัตราการไหลของน้ำ	46
4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำทางเข้ากับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายใน (hi) ที่ความเร็วอากาศ 4 m/s และ อัตราการไหลของน้ำ 3.5 GPM	50
4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำทางเข้ากับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายนอก (ho) ที่ความเร็วอากาศ 4 m/s และอัตราการไหลของน้ำ 3.5 GPM	50
4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำทางเข้ากับอัตราการถ่ายเทความร้อนของน้ำ (Qw) ที่ความเร็วอากาศ 4m/s และอัตราการไหลของน้ำ 3.5 GPM	51
4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำที่ทางเข้ากับอัตราการถ่ายเทความร้อนของอากาศ (Qa) ที่ความเร็วอากาศ 4m/s และอัตราการไหลของน้ำ 3.5GPM	51
4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำทางเข้ากับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายนอก (ho) ที่ความเร็วอากาศ 4 m/s และ อัตราการไหลของน้ำ 4 GPM	52
4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำทางเข้ากับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายใน (hi) ที่ ความเร็วอากาศ 4 m/s และ อัตราการไหลของน้ำ 4 GPM	52
4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำทางเข้ากับอัตราการถ่ายเทความร้อนของน้ำ (Qw) ที่ความเร็วอากาศ 4 m/s และ อัตราการไหลของน้ำ 4 GPM	53
4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำทางเข้ากับอัตราการถ่ายเทความร้อนของอากาศ (Qa) ที่ความเร็วอากาศ 4m/s และอัตราการไหลของน้ำ 4 GPM	53

สารบัญตาราง

ตารางภาคผนวกที่	หน้า
1.1 แสดงคุณสมบัติของอากาศที่ความดันบรรยากาศ	58
1.2 แสดงคุณสมบัติของน้ำที่ความดันบรรยากาศ	59
1.3 แสดงค่าการนำความร้อนของวัสดุชนิดต่าง ๆ	60
1.4 ตารางแสดงการเลือกขนาดท่อทองแดง	61
2.1 แสดงผลการทดสอบแบบขดกันหอยแบบไหลสวนทางที่ความเร็วของอากาศ 4 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 40 °C อัตราการไหลของน้ำ 3.5 GPM โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ทางเข้า	64
2.2 แสดงผลการทดสอบแบบขดกันหอยแบบไหลสวนทางที่ความเร็วของอากาศ 4 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 50 °C อัตราการไหลของน้ำ 3.5 GPM โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ทางเข้า	65
2.3 แสดงผลการทดสอบแบบขดกันหอยแบบไหลสวนทางที่ความเร็วของอากาศ 4 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 60 °C อัตราการไหลของน้ำ 3.5 GPM โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ทางเข้า	66
2.4 แสดงผลการทดสอบแบบขดกันหอยแบบไหลสวนทางที่ความเร็วของอากาศ 4 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 40 °C อัตราการไหลของน้ำ 4 GPM โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ทางเข้า	67
2.5 แสดงผลการทดสอบแบบขดกันหอยแบบไหลสวนทางที่ความเร็วของอากาศ 4 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 50 °C อัตราการไหลของน้ำ 4 GPM โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ทางเข้า	68
2.6 แสดงผลการทดสอบแบบขดกันหอยแบบไหลสวนทางที่ความเร็วของอากาศ 4 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 60 °C อัตราการไหลของน้ำ 4 GPM โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ทางเข้า	69

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางภาคผนวกที่	หน้า
2.7 แสดงผลการทดสอบแบบชดกันหอยแบบไหลสวนทางที่ความเร็วของอากาศ 4 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 40 °C อัตราการไหลของน้ำ 4.5 GPM โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำที่ทางเข้า	70
2.8 แสดงผลการทดสอบแบบชดกันหอยแบบไหลสวนทางที่ความเร็วของอากาศ 4 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 50 °C อัตราการไหลของน้ำ 4.5 GPM โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำที่ทางเข้า	71
2.9 แสดงผลการทดสอบแบบชดกันหอยแบบไหลสวนทางที่ความเร็วของอากาศ 4 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 60 °C อัตราการไหลของน้ำ 4.5 GPM โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำที่ทางเข้า	72
2.10 แสดงผลการทดสอบแบบชดกันหอยแบบไหลสวนทางที่ความเร็วของอากาศ 5 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 40 °C อัตราการไหลของน้ำ 3.5 GPM โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำที่ทางเข้า	73
2.11 แสดงผลการทดสอบแบบชดกันหอยแบบไหลสวนทางที่ความเร็วของอากาศ 5 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 50 °C อัตราการไหลของน้ำ 3.5 GPM โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำที่ทางเข้า	74
2.12 แสดงผลการทดสอบแบบชดกันหอยแบบไหลสวนทางที่ความเร็วของอากาศ 5 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 60 °C อัตราการไหลของน้ำ 3.5 GPM โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำที่ทางเข้า	75
2.13 แสดงผลการทดสอบแบบชดกันหอยแบบไหลสวนทางที่ความเร็วของอากาศ 5 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 40 °C อัตราการไหลของน้ำ 4 GPM โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำที่ทางเข้า	76
2.14 แสดงผลการทดสอบแบบชดกันหอยแบบไหลสวนทางที่ความเร็วของอากาศ 5 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 50 °C อัตราการไหลของน้ำ 4 GPM โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำที่ทางเข้า	77

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางภาคผนวกที่

2.15	แสดงผลการทดสอบแบบชดกันหอยแบบไหลสวนทางที่ความเร็วของอากาศ 5 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 60 °C อัตราการไหลของน้ำ 4 GPM โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำที่ทางเข้า	78
2.16	แสดงผลการทดสอบแบบชดกันหอยแบบไหลสวนทางที่ความเร็วของอากาศ 5 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 40 °C อัตราการไหลของน้ำ 4.5 GPM โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำที่ทางเข้า	79
2.17	แสดงผลการทดสอบแบบชดกันหอยแบบไหลสวนทางที่ความเร็วของอากาศ 5 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 50 °C อัตราการไหลของน้ำ 4.5 GPM โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำที่ทางเข้า	80
2.18	แสดงผลการทดสอบแบบชดกันหอยแบบไหลสวนทางที่ความเร็วของอากาศ 5 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 60 °C อัตราการไหลของน้ำ 4.5 GPM โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำที่ทางเข้า	81
2.19	แสดงผลการทดสอบแบบชดกันหอยแบบไหลสวนทางที่ความเร็วของอากาศ 6 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 40 °C อัตราการไหลของน้ำ 3.5 GPM โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำที่ทางเข้า	82
2.20	แสดงผลการทดสอบแบบชดกันหอยแบบไหลสวนทางที่ความเร็วของอากาศ 6 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 50 °C อัตราการไหลของน้ำ 3.5 GPM โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำที่ทางเข้า	83
2.21	แสดงผลการทดสอบแบบชดกันหอยแบบไหลสวนทางที่ความเร็วของอากาศ 6 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 60 °C อัตราการไหลของน้ำ 3.5 GPM โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำที่ทางเข้า	84
2.22	แสดงผลการทดสอบแบบชดกันหอยแบบไหลสวนทางที่ความเร็วของอากาศ 6 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 40 °C อัตราการไหลของน้ำ 4 GPM โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำที่ทางเข้า	85

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางภาคผนวกที่	หน้า
2.23 แสดงผลการทดสอบแบบขดกันหอยแบบไหลสวนทางที่ความเร็วของอากาศ 6 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 50 °C อัตราการไหลของน้ำ 4 GPM โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำที่ทางเข้า	86
2.24 แสดงผลการทดสอบแบบขดกันหอยแบบไหลสวนทางที่ความเร็วของอากาศ 6 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 60 °C อัตราการไหลของน้ำ 4 GPM โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำที่ทางเข้า	87
2.25 แสดงผลการทดสอบแบบขดกันหอยแบบไหลสวนทางที่ความเร็วของอากาศ 6 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 40 °C อัตราการไหลของน้ำ 4.5 GPM โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำที่ทางเข้า	88
2.26 แสดงผลการทดสอบแบบขดกันหอยแบบไหลสวนทางที่ความเร็วของอากาศ 6 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 50 °C อัตราการไหลของน้ำ 4.5 GPM โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำที่ทางเข้า	89
2.27 แสดงผลการทดสอบแบบขดกันหอยแบบไหลสวนทางที่ความเร็วของอากาศ 6 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 60 °C อัตราการไหลของน้ำ 4.5 GPM โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำที่ทางเข้า	90
4.1 แสดงผลกาคำนวณของชุดทดสอบแบบขดกันหอย ที่อัตราการไหลของน้ำ 3.5 GPM ความเร็วอากาศ 4 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 40 °C	99
4.2 แสดงผลกาคำนวณของชุดทดสอบแบบขดกันหอย ที่อัตราการไหลของน้ำ 3.5 GPM ความเร็วอากาศ 4 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 50 °C	99
4.3 แสดงผลกาคำนวณของชุดทดสอบแบบขดกันหอย ที่อัตราการไหลของน้ำ 3.5 GPM ความเร็วอากาศ 4 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 60 °C	100
4.4 แสดงผลกาคำนวณของชุดทดสอบแบบขดกันหอย ที่อัตราการไหลของน้ำ 4 GPM ความเร็วอากาศ 4 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 40 °C	100

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางภาคผนวกที่	หน้า
4.5 แสดงผลกาคำนวณของชุดทดสอบแบบขดกันหอย ที่อัตราการไหลของน้ำ 4 GPM ความเร็วอากาศ 4 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 50 °C	101
4.6 แสดงผลกาคำนวณของชุดทดสอบแบบขดกันหอย ที่อัตราการไหลของน้ำ 4 GPM ความเร็วอากาศ 4 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 60 °C	101
4.7 แสดงผลกาคำนวณของชุดทดสอบแบบขดกันหอย ที่อัตราการไหลของน้ำ 4.5 GPM ความเร็วอากาศ 4 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 40 °C	102
4.8 แสดงผลกาคำนวณของชุดทดสอบแบบขดกันหอย ที่อัตราการไหลของน้ำ 4.5 GPM ความเร็วอากาศ 5 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 40 °C	102
4.9 แสดงผลกาคำนวณของชุดทดสอบแบบขดกันหอย ที่อัตราการไหลของน้ำ 4 GPM ความเร็วอากาศ 5 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 50 °C	103
4.10 แสดงผลกาคำนวณของชุดทดสอบแบบขดกันหอย ที่อัตราการไหลของน้ำ 4 GPM ความเร็วอากาศ 5 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 60 °C	103

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
A	พื้นที่ตัดขวางของการไหล	m^2
A_f	พื้นที่ผิวของครีบท่อหน่วยความยาวของท่อ	m^2
A_b	พื้นที่ผิวของท่อที่ไม่มีครีบท่อ	m^2
A_o	พื้นที่ผิวรวมทั้งหมดของท่อ	m^2
b	ระยะความกว้างของท่อ	m
C_p	ค่าความร้อนจำเพาะของของไหลที่ความดันคงที่	$J/(kg\ K)$
D_1	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกท่อ	m
D_2	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ	m
De	ค่า Dean number	
f	สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของการสูญเสียความดัน	
f_c	สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของการสูญเสียความดันในท่อ	
h	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน	$W/(m^2\ ^\circ C)$
h_o, h_i	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผิวท่อภายนอกและภายในท่อ	$W/(m^2\ ^\circ C)$
K^*	ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียโดยรวม	
K	ค่าการนำความร้อนของวัสดุ	W/mK
L	ความยาวของท่อ	m
m	อัตราการไหลเชิงมวล	kg/s
n_1	จำนวนรอบของขดเริ่มก้นหอย $= L/(2\pi bN) - N/2$	
n_2	จำนวนรอบของขดสิ้นสุดก้นหอย $= L/(2\pi bN) + N/2$	
N	จำนวนรอบของขดก้นหอย $= n_2 - n_1$	
Nu	ค่า Nusselt number	
Nu_{bc}	ค่า Nusselt number เฉลี่ยรอบวงในขอบเขต	
$Nu_{m,bc}$	ค่า Nusselt number ของความยาวเชิงอุณหภูมิจุดใด ๆ ของเส้นรอบวง	

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
$Nu_{x,bc}$	ค่า Nusselt number เฉลี่ยตามเส้นรอบวงในส่วนของอุณหภูมิในขอบเขต	
P	ความดัน Static ของของไหล	Pa
Pr	ค่า แพรนดเติล นัมเบอร์ (Prandtl number)	
Q	อัตราการถ่ายเทความร้อน	W
r	รัศมีภายในท่อ	m
R	รัศมีของขดท่อ	m
Re	ค่า Reynolds number	
Re_{crit}	ค่าวิกฤติของ Reynolds number	
R_{ave}	รัศมีเฉลี่ยของขดกันหอย	m
T	อุณหภูมิของของไหล	K, °C
T_{ave}	อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหล	K, °C
V	ความเร็วตามแนวแกน	m/s
v	ความหนืดจลน์ของของไหล	m ² /s
ρ	ความหนาแน่นของของไหล	kg/m ³
η_r	ประสิทธิภาพของครีป	
η_p	ประสิทธิภาพของปั๊ม	

บทที่ 1

บทนำ

ความสำคัญและความเป็นมา

ปัจจุบันนี้การถ่ายเทความร้อนในท่อที่มีขนาดเล็ก นิยมใช้กันมากในระบบการทำความเย็น เช่น ในรถยนต์ โรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ โดยเฉพาะในโรงงานอุตสาหกรรม ที่จะใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ในการช่วยอุ่นน้ำเลี้ยงเพื่อใช้ในการผลิต ไอน้ำเพื่อขับเคลื่อนกังหันเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งต้องใช้พื้นที่ในการติดตั้งมากเพราะฉะนั้นการถ่ายเทความร้อนในท่อนขนาดเล็ก จึงมีบทบาทสำคัญเพราะจะช่วยลดพื้นที่ในการติดตั้ง และ ลดต้นทุนในการผลิตด้วย

การวิเคราะห์เชิงความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกับเชลล์ (Shell and tube) คือ การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลที่สัมผัสกันสองชนิด ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะขึ้นอยู่กับ ความหนาแน่น ความหนืด และ ความเร็วของไหลรวมทั้งจะขึ้นอยู่กับ คุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุ เช่น ค่าการนำความร้อน และ ค่าความร้อนจำเพาะ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างวัตถุกับของไหลที่สัมผัสกันด้วย

จากที่กล่าวมาข้างต้น ผู้ศึกษาได้ศึกษาค้นคว้าถึงวิธีออกแบบ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อศึกษา และ ทดลองโดยใช้ทฤษฎีในเรื่องการถ่ายเทความร้อน การพาความร้อน และ ปฏิกิริยาอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องมาใช้ในการคำนวณ และออกแบบ โดยลักษณะของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเป็นแบบท่อขดรูปก้นหอย (Spiral coil) และติดครีป (Fins) ที่ท่อเพื่อเพิ่มพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนให้มากขึ้นด้วย

จุดประสงค์ของโครงการ

เพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ ท่อขดรูปก้นหอย (Spiral coil heat exchanger)

ขอบเขตของโครงการ

1. Test channel แนวนอนยาว 4 เมตร แนวตั้งสูง 15 เมตร ดังนั้น Test channel ยาวทั้งหมดประมาณ 11 เมตร (ยังไม่รวมท่อโค้ง) ทำจากสังกะสีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.30 เมตรและหุ้มฉนวนหนา 0.015 เมตร

2. ท่อทดสอบ (Test section) ชุดที่ 1 ใช้ท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.525 มิลลิเมตร ขดเป็นรูปก้นหอย (Spiral coil) ทั้งหมด 6 รอบ และมีท่อทั้งหมดจำนวน 9 ท่อ ซึ่งเป็นท่อที่ขดเป็นขดรูปก้นหอยจำนวน 9 ชั้นโดยที่แต่ละท่อมีครีบนานา 0.25 มิลลิเมตร เป็นรูปสี่เหลี่ยมขนาด 25x25 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างครีบ 15 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุดของ Spiral coil unit เท่ากับ 560 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่ำสุดของ Spiral coil unit เท่ากับ 140 มิลลิเมตร ความสูงของ Spiral coil unit เท่ากับ 270 มิลลิเมตร

4. ใช้น้ำและอากาศเป็นสารทำงาน (Working fluid) โดยที่ให้น้ำไหลในท่อทดสอบ (Test section spiral coil) และให้อากาศไหลในชุด Test channel ที่ทำจากสังกะสี

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ทราบถึงพฤติกรรมต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน
2. ได้ทราบถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต่าง ๆ ในขณะที่มีการถ่ายเทความร้อนหรือในระหว่างที่ทำการทดสอบ
3. ได้เข้าใจในหลักการทำงานและการถ่ายเทความร้อน ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดก้นหอย

บทที่ 2

ทฤษฎี

ในปัจจุบันมีจำนวนโรงงานอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมาก ซึ่งโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะมีการปล่อยควันหรือไอเสียออกสู่บรรยากาศเป็นจำนวนมาก ซึ่งควันหรือไอเสียต่างๆ เหล่านั้น ยังมีความร้อนอยู่ในตัวของมันเอง เมื่อมีการปล่อยควันหรือไอเสียจำนวนมาก ๆ ก็เท่ากับว่าเป็นการปล่อยพลังงานออกไปทิ้งโดยไม่เกิดประโยชน์ ดังนั้นจึงมีการศึกษาวิธีการที่จะนำเอาความร้อนจากควันหรือไอเสียต่าง ๆ นั้นมาใช้ใหม่ให้เกิดประโยชน์ (Heat recovery) ทั้งนี้เพื่อเป็นการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่า และยังเป็นการช่วยประหยัดพลังงานอีกทางหนึ่งด้วย โดยใช้ทฤษฎีในเรื่องการถ่ายเทความร้อนและการแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งจะได้กล่าวต่อไป

หลักการถ่ายเทความร้อน (Principle of heat transfer)

ในการศึกษาเรื่องการถ่ายเทความร้อนโดยทั่วไปแล้ว จะมีรูปแบบของการถ่ายเทความร้อนอยู่ด้วยกัน 3 รูปแบบคือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสี ซึ่งรูปแบบของการถ่ายเทความร้อนทั้ง 3 รูปแบบนี้เป็นสิ่งที่สำคัญยิ่งสำหรับ งานทางด้าน การแลกเปลี่ยนความร้อน ทั้งในวัสดุที่เป็นของแข็ง และ ของไหล ซึ่งจะได้กล่าวถึงลักษณะของการถ่ายเทความร้อนทั้ง 3 รูปแบบต่อไปดังนี้

1. การนำความร้อน (Heat conduction)

การนำความร้อน คือ วิธีการที่ความร้อนเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ ภายในตัวกลางเดียวกันหรือเป็นการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างตัวกลางที่ติดกัน แต่อุณหภูมิต่างกัน ในการนำความร้อน ความร้อนจะเคลื่อนที่ผ่านโมเลกุลของสารโดยที่โมเลกุลไม่เคลื่อนที่ (Steady state) การนำความร้อนจะเกิดขึ้นได้ดีมากในตัวกลางที่เป็นของแข็ง การเคลื่อนที่ของความร้อนแบบนำเกิดขึ้นบ้างในของเหลวและก๊าซ แต่มักจะแยกไม่ออกจากการเคลื่อนที่ของความร้อนแบบการนำความร้อนเคลื่อนที่โดยการนำได้โดยการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน

จากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่อุณหภูมิต่ำ นอกจากนี้ความร้อนยังเคลื่อนที่ไปได้โดยการสั่นสะเทือนของโมเลกุลภายในของแข็ง ในลักษณะของพลังงานของความสั่นสะเทือน (Vibration energy) อีกด้วย

หลักการคำนวณเกี่ยวกับการนำความร้อนถูกตั้งขึ้นโดย โจเซฟ โฟริเยอร์ (Joseph Fourier) นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศส โฟริเยอร์ ได้เสนอสมการที่ใช้สำหรับคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการนำ ในปี ค.ศ. 1822 โดยอาศัยข้อมูลการทดลองไว้ดังนี้ คือ

$$Q_x = -kA \left(\frac{dT}{dx} \right) \quad (2.1)$$

ในที่นี้ คือ

Q_x	=	อัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการนำ	W
k	=	ค่าการนำความร้อน	W/m °C
dT	=	ความแตกต่างของอุณหภูมิ	°C
dx	=	ความแตกต่างของความยาวในทิศทาง x	m
A	=	พื้นที่ที่ตั้งฉากกับการถ่ายเทความร้อน	m ²

2. การพาความร้อน (Heat convection)

การพาความร้อน คือ วิธีการที่ความร้อนเคลื่อนที่ระหว่างผิวของของแข็งกับของไหล ของไหลเป็นตัวพาความร้อนมาให้ หรือพาความร้อนจากผิวของของแข็ง กลไกที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพานั้นเกิดจากผลรวมของการนำความร้อน การสะสมพลังงาน และการเคลื่อนที่ของของไหล การพาแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ การพาความร้อนโดยการบังคับ (Forced convection) และการพาแบบอิสระ (Free convection)

2.1 การพาความร้อนโดยการบังคับ (Forced convection) คือ การเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยที่ของไหลถูกบังคับให้เคลื่อนที่ไปสัมผัสกับผิวของของแข็ง โดยกลไกภายนอก เช่น เครื่องสูบน้ำ พัดลม เป็นต้น

2.2 การพาความร้อนแบบอิสระ (Free convection) คือ การเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของของไหล โดยไม่มีกลไกใดๆ ที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ที่เร็วของไหลที่อยู่ใกล้กับผิวของของแข็งก็อาจเคลื่อนที่โดยแรงลอยตัวของของไหลเอง แรงลอยตัวนี้เกิดจากความแตกต่างของความหนาแน่นของของไหล เมื่อเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิในชั้นของของไหลขึ้น

การคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพานั้นเป็นสิ่งยุ่งยาก เมื่อพิจารณาแล้วมีหลายสิ่งที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของความร้อนแบบการพานี้ เป็นต้นว่า คุณสมบัติต่างๆ ของของไหล เช่น ความหนาแน่น ความร้อนจำเพาะ ความหนืด ฯลฯ ความเร็วของของ

ไหล ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของพื้นผิวของของแข็ง และของไหลเป็นต้น นิวตัน(Newton) ได้ศึกษาความยุ่งยากเหล่านี้ โดยเสนอสมการการหาค่าอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพา ดังนี้ คือ

$$Q = hA(T_h - T_c) \quad (2.2)$$

โดยที่

h	=	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน	$W/m^2 \text{ } ^\circ C$
Q	=	อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ของของแข็งที่สัมผัสกับของไหล	W
T_h	=	อุณหภูมิของของไหลหรือพื้นผิวของของแข็งที่ร้อนกว่า	$^\circ C$
T_c	=	อุณหภูมิที่เย็นกว่าของของไหลหรือพื้นผิวของของแข็ง	$^\circ C$
A	=	พื้นที่สัมผัสระหว่างผนังท่อกับการไหลของของไหล	m^2

เนื่องจากอุณหภูมิ T_h และ T_c นี้เปลี่ยนแปลงตลอดความยาวของท่อ ดังนั้นความแตกต่างของอุณหภูมิที่ใช้งานในสมการก็เป็นค่าความแตกต่างเฉลี่ย

3. การแผ่รังสี (Radiation)

ในการแผ่รังสี ความร้อนเคลื่อนที่ได้โดยมิต้องอาศัยตัวกลางดังเช่นในการนำและการพาความร้อน ในการแผ่รังสี ความร้อนจะเคลื่อนที่ได้ดีที่สุดในสุญญากาศ การที่จะอธิบายว่าความร้อนเคลื่อนที่ได้อย่างไรนั้นเป็นสิ่งยากในการอธิบาย การแผ่รังสีในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave) ซึ่งสามารถเกิดขึ้นในสถานะที่เป็นสุญญากาศรวม เช่นเดียวกับตัวกลางชนิดหนึ่ง ผลที่ได้จากการทดลองได้พิสูจน์ให้เห็นว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีมีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ที่ยกกำลังสี่ แต่ค่าการนำความร้อนและการพาความร้อนจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ ซึ่งหาได้จาก กฎของ สเตฟาน โบลท์ซมานน์ (Stefan-Boltzman 's law) ขึ้นพื้นฐานดังนี้คือ

$$Q = \sigma AT^4 \quad (2.3)$$

เมื่อ

σ	=	ค่าคงที่ของสเตฟานและโบลซ์แมน	
		มีค่าเท่ากับ 5.67×10^{-8}	$W/m^2 \text{ } ^\circ C^4$

A	=	พื้นที่ผิวที่มีการแผ่รังสี	m
T	=	อุณหภูมิของวัตถุ	$^{\circ}C$

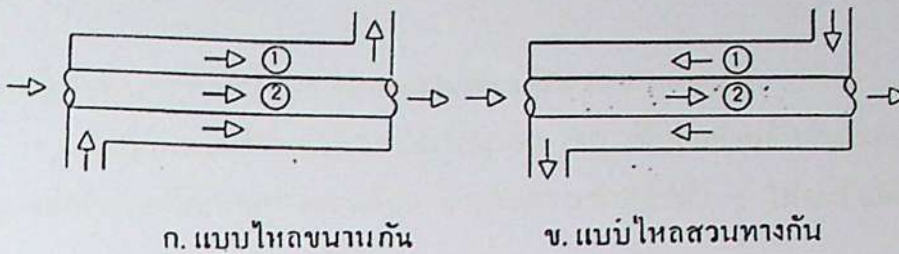
หลักการทํางาน และ ชนิดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน คือ เครื่องมือที่ใช้สำหรับการถ่ายเทความร้อนจากของไหลชนิดหนึ่งไปยังของไหลอีกชนิดหนึ่ง โดยที่ของไหลไม่จำเป็นต้องผสมกัน เพื่อให้ของไหลนั้น ๆ มีอุณหภูมิสูงขึ้นหรือต่ำลง ตามลักษณะของงานที่ต้องการใช้ เช่น ถ้าต้องการให้มีการแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อที่จะเอาผลที่ได้จากการแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อ ไปใช้ในงานทำความเย็นก็จะต้องใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ทำให้ของไหลที่จะนำไปใช้นั้นมีอุณหภูมิลดลง เช่น ในงานปรับอากาศที่มีขนาดใหญ่ ๆ แต่ถ้าต้องการให้ผลที่ได้จากการแลกเปลี่ยนความร้อนออกมาให้ของไหลมีอุณหภูมิสูงขึ้น ก็ใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ช่วยในการทำความร้อนให้กับของไหล เช่น ในงานผลิตกระแสไฟฟ้าที่ต้องใช้ไอน้ำเป็นตัวปั่นกังหัน และ ต้องมีการอุ่นน้ำเลี้ยงที่ใช้ในหม้อไอน้ำ ก็ต้องใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเข้ามาช่วยแทนที่จะต้องเอาน้ำเย็นมาต้ม ซึ่งต้องใช้พลังงาน และเวลามาก กว่าที่จะได้ไอน้ำที่มีอุณหภูมิตามที่ต้องการไปใช้งาน แต่ถ้ามีอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนก็สามารถนำ น้ำหรืออากาศที่มีอุณหภูมิต่ำ มาแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น แล้วจึงนำไปต้มในหม้อไอน้ำก็จะทำให้ประหยัดพลังงานและ เวลาได้อีกทางหนึ่ง ซึ่งหลักการทํางานของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนั้นจะขึ้นอยู่กับทิศทางการไหลของของไหล และ ชนิดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งจะได้อธิบายต่อไป

1. ชนิดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Classification of heat exchanger)

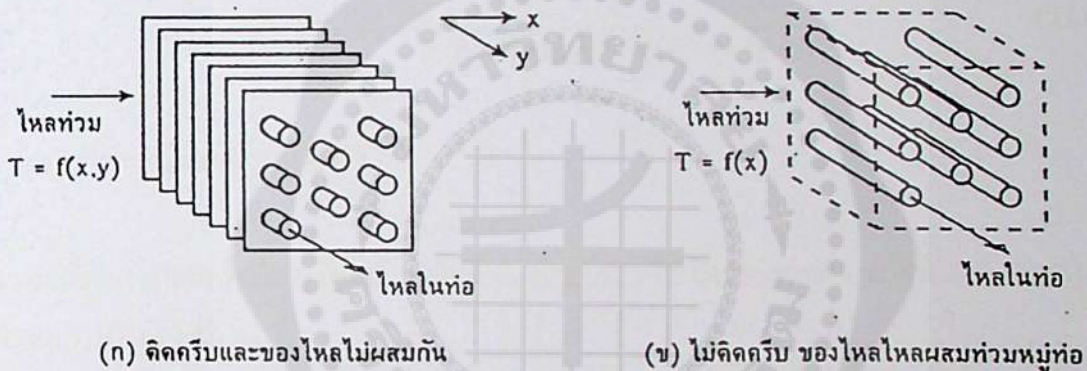
อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีหลายแบบ การจำแนกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน อาจทำได้โดยอาศัยทิศทางการเคลื่อนที่ของของไหลในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และลักษณะของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เป็นหลักโดยทั่วไป จำแนกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเป็น 3 แบบคือ

1.1 แบบท่อสองชั้น (Concentric tube) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้ อาจอยู่ในลักษณะของท่อสองท่อสวมเข้าด้วยกัน ส่วนการไหลมีอยู่ 2 แบบคือ ไหลในทิศทางเดียวกันกับไหลสวนทาง ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1. แสดงลักษณะการไหลผ่านท่อสองชั้น

1.2 แบบที่ไหลมีทิศทางการตั้งฉากกัน (Cross flow) ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้ ของไหลจะมีทิศทางการตั้งฉากกัน คือ ลักษณะการไหลอาจไหลทีละแถวหรือสองทีละแถวหรือมากกว่านั้นก็ได้



รูปที่ 2.2 แสดงการไหลแบบ Cross flow

1.3 แบบเชลล์และท่อ (Shell and tube) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้ ของไหลอย่างเดียวยาวอยู่ในเชลล์และอีกอย่างหนึ่งอยู่ในท่อ ส่วนลักษณะการไหลจะไหลแบบสวนทางหรือขนานกัน อาจทั้งสองอย่างรวมกันในเครื่องเดียวหรืออาจจะไหลตั้งฉากกับท่ออีกด้วย



รูปที่ 2.3 แสดงอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Shell and tube

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall heat transfer coefficient, U)

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U) เป็นสัดส่วนกับค่าแลกเปลี่ยนความร้อนในรูปของค่าความต้านทานทางความร้อน สำหรับความสัมพันธ์ทั่ว ๆ ไปจะเป็นดังสมการต่อไปนี้

สมการที่ผนังรวม

$$U = \frac{1}{(1/h_o) + (L/k) + (1/h_i)} \quad (2.4)$$

สมการที่ผนังแบบทรงกระบอก

$$U_o = \frac{1}{(r_o/r_i h_i) + [r_o \ln(r_o/r_i)]/k + (1/h_o)} \quad (2.5)$$

$$U_i = \frac{1}{(1/h_i) + [r_i \ln(r_o/r_i)]/k + (r_i/r_o h_o)} \quad (2.6)$$

ส่วนสมการการถ่ายเทความร้อนคือ

$$Q = UA\Delta T_{LMTD} \quad (2.7)$$

ในกรณีที่ผิวภายนอกท่อมีการติดครีปเข้าไปด้วย ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U) จะหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_o} \left(\frac{A_o}{\eta_c A_f + A_b} \right) + \frac{D_1 \ln(D_2/D_1)}{2k} + \frac{1}{h_i} \left(\frac{D_2}{D_1} \right) \quad (2.8)$$

1. ผลต่างอุณหภูมิเชิงลอการิทึม (The logarithmic temperature difference)

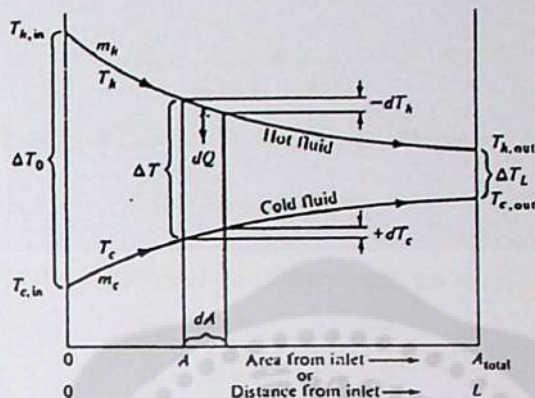
ในการคำนวณหาค่าความร้อนในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนทั่ว ๆ ไปนั้นคุณสมบัติที่สำคัญอย่างแรก ที่ต้องหาก็คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนรวม (Q) เมื่อพิจารณาถึงอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบทางเดียว (Single pass) ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งจะได้เห็นถึงค่าความแตกต่างระหว่างของเหลวที่มีอุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำ ซึ่งโดยทั่วไปจะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอยู่เสมอ ตามความยาวของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแต่ละชนิดที่มีความยาวไม่เท่ากัน

ในการวิเคราะห์ค่าการถ่ายเทความร้อนในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบอื่น ๆ ก็มีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเดียวกัน คือ มีค่าความแตกต่างของของไหลที่มีอุณหภูมิสูง กับอุณหภูมิต่ำ โดยสามารถนำค่าความแตกต่างดังกล่าวนี้มาใช้ในการคำนวณหา อัตราการถ่ายเทความร้อนรวม (Q) ได้ดังสมการ

$$Q = AU\Delta T_m \quad (2.9)$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนรวม (Q) จากของเหลวที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่ของเหลวที่มีอุณหภูมิต่ำที่ไหลผ่านพื้นที่ผิวเล็ก ๆ (dA) ที่จุด A จะหาได้จากสมการ

$$dQ = U dA \Delta T \quad (2.10)$$



รูปที่ 2.4 แสดงค่าความแตกต่างของอุณหภูมิเชิงลึก

จากรูปกำหนดให้

A = พื้นที่ผิวของการถ่ายเทความร้อน

m_c, m_h = อัตราการไหลของของไหลทั้งร้อนและเย็น

$\Delta T = T_h - T_c$ คือค่าความแตกต่างของอุณหภูมิของของไหลทั้งร้อนและเย็น

U = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของของไหลทั้งสองชนิด

จากสมการ (2.10) dQ จะมีค่าสูงขึ้นหรือต่ำลง ขึ้นอยู่กับค่าความร้อนของของไหลที่ใช้ ที่ตำแหน่ง A ถึง $A + dA$ ภายใต้เงื่อนไขดังสมการต่อไปนี้

$$dQ = -m_h c_{ph} dT_h \quad \text{Hot fluid} \quad (2.11a)$$

$$dQ = m_c c_{pc} dT_c \quad \text{Cold fluid} \quad (2.11b)$$

เมื่อ

C_{pc}, C_{ph} = ค่าความร้อนจำเพาะของของไหลทั้งร้อนและเย็น

dT_c, dT_h = ค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของของไหลทั้งร้อนและเย็น

นั่นคือ

$$\Delta T = T_h - T_c \quad (2.12a)$$

$$d(\Delta T) = dT_h - dT_c \quad (2.12b)$$

นำสมการ (2.11) มารวมกับสมการ (2.12b) จะได้

$$d(\Delta T) = -\frac{dQ}{m_h c_{ph}} - \frac{dQ}{m_c c_{pc}} = -dQ \left(\frac{1}{m_h c_{ph}} + \frac{1}{m_c c_{pc}} \right) \quad (2.13)$$

หรือเขียนใหม่ได้เป็น

$$d(\Delta T) = -B dQ \quad (2.14a)$$

เมื่อ

$$B = \frac{1}{m_h c_{ph}} + \frac{1}{m_c c_{pc}} \quad (2.14b)$$

แทนค่า dQ จากสมการ (2.9) ลงในสมการ (2.14a) จะได้เป็น

$$\frac{d(\Delta T)}{\Delta T} = -UB dA \quad (2.15)$$

อินทิเกรตสมการ(2.15)ตามความยาวของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

$$\int_{\Delta T_o}^{\Delta T_L} \frac{d(\Delta T)}{\Delta T} = -B \int_0^{A_t} U dA \quad (2.16a)$$

$$\int_{\Delta T_o}^{\Delta T_L} \frac{d(\Delta T)}{\Delta T} = -BA \frac{\int_0^{A_t} U dA}{A_t} \quad (2.16b)$$

เมื่อ A_t เป็นพื้นที่ผิวรวมของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และ เมื่อ ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม U_m ที่ทางเข้าของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าเป็น

$$U_m = \frac{1}{A_t} \int_0^{A_t} U dA \quad (2.17)$$

และผลของการอินทิเกรตสมการ (2.16) คือ

$$\ln \frac{\Delta T_o}{\Delta T_L} = BU_m A_t \quad (2.18)$$

ดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อน Q ที่ผ่านในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ได้จากการอินทิเกรตสมการ (2.14a) จะมีค่าเป็น

$$\int_{\Delta T_o}^{\Delta T_L} d(\Delta T) = -B \int_0^Q dQ \quad (2.19a)$$

$$\Delta T_o - \Delta T_L = BQ \quad (2.19b)$$

แทนค่า B ในสมการ (2.18) ลงในสมการ (2.19) จะได้

$$Q = A_t U_m \frac{\Delta T_o - \Delta T_L}{\ln(\Delta T_o / \Delta T_L)} \quad (2.20)$$

ดังนั้นจากการคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนรวมที่ผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ในส่วนของผลต่างอุณหภูมิ ΔT_m

$$Q = A_t U_m \Delta T_m \ln \quad (2.21)$$

เมื่อเปรียบเทียบ ΔT_m ในสมการ (2.20) กับสมการ (2.21) จะได้ค่าผลต่างของอุณหภูมิ ระหว่างของไหลที่มีอุณหภูมิสูงกับ ของไหลที่มีอุณหภูมิต่ำตามความยาวของทางเข้าและทางออกของอุปกรณ์ แลกเปลี่ยนความร้อนจะได้

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_o - \Delta T_L}{\ln(\Delta T_o / \Delta T_L)} \quad (2.22)$$

ค่าผลต่างอุณหภูมิ ΔT_m มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ผลต่างอุณหภูมิเชิงล็อก (The logarithmic mean temperature difference หรือ ΔT_{LMTD}) เมื่อ ΔT_o คือผลต่างอุณหภูมิที่ทางเข้าและ ΔT_L คือผลคือผลต่างอุณหภูมิที่ทางออก จากรูปที่ 2.4

$$\Delta T_o = T_{ho} - T_{co}$$

และ

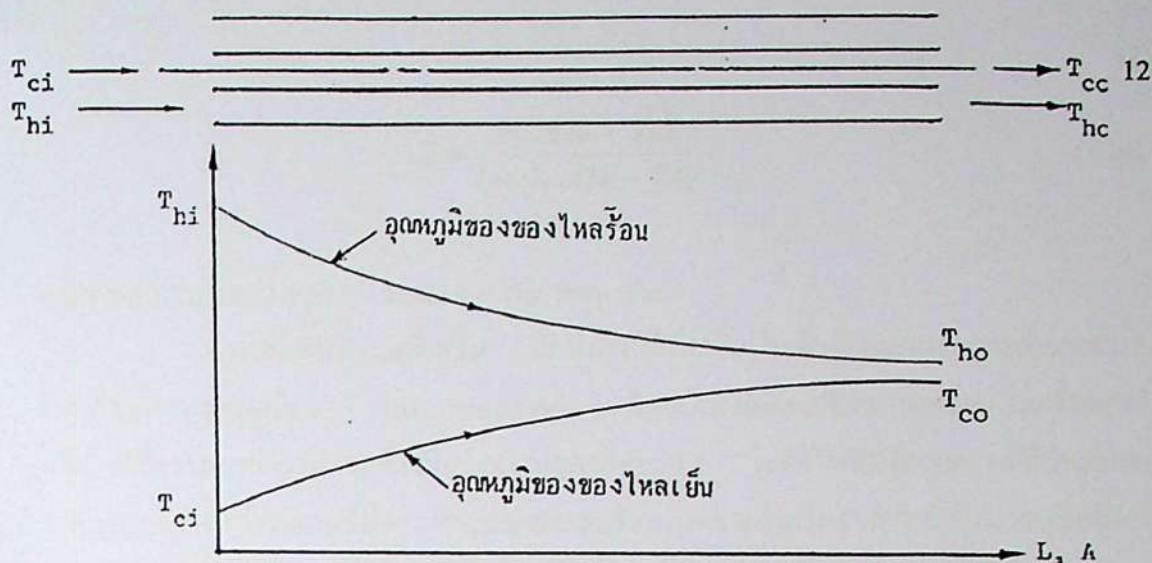
$$\Delta T_L = T_{hl} - T_{cl}$$

ดังนั้น

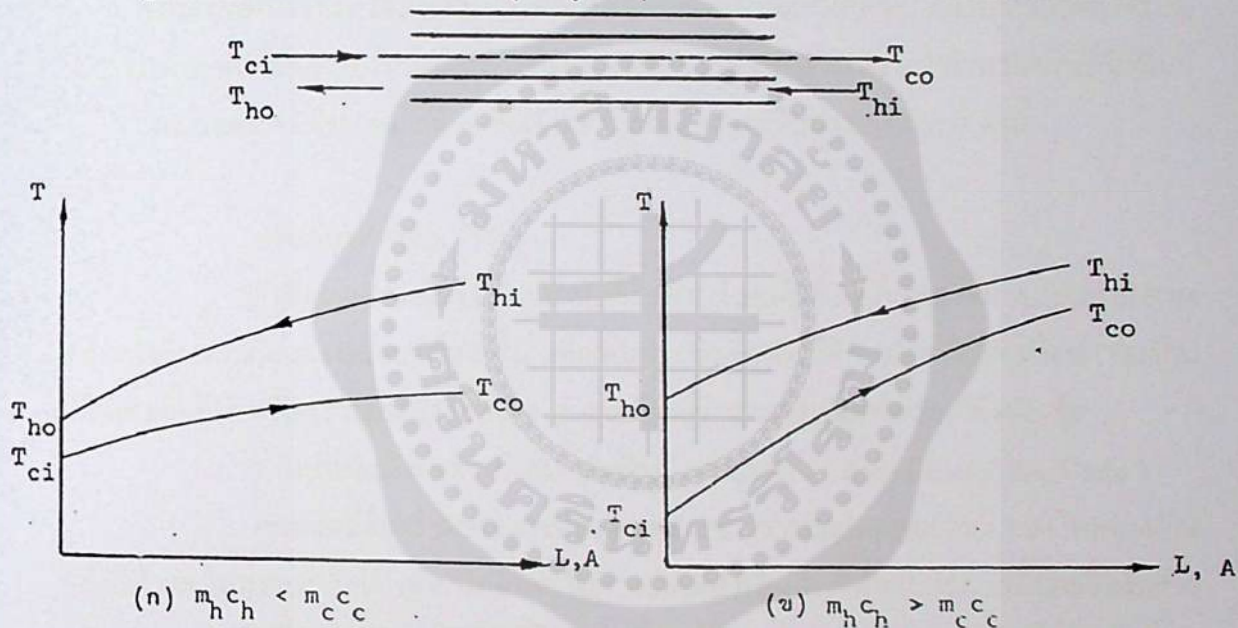
$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(T_{ho} - T_{co})(T_{hl} - T_{cl})}{\ln\left(\frac{(T_{ho} - T_{co})}{(T_{hl} - T_{cl})}\right)} \quad (2.23)$$

2. ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน คือ อัตราส่วนระหว่างความร้อนที่ถ่ายเทจริง ๆ ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ต่อ ความร้อนที่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะถ่ายเทได้มากที่สุด จะเห็นได้ว่าความร้อนจะถ่ายเทได้มากที่สุด เมื่อมีการสัมผัสกันของอากาศหรือของไหล กับพื้นที่ผิวของท่อที่ใช้ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนได้มากและนานที่สุด และเมื่อมีการแลกเปลี่ยนความร้อนกันขึ้น จะทำให้อุณหภูมิของของไหลมีการเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของอากาศร้อน หรือ เย็นที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนกันซึ่งกันและกันขึ้นในรูปที่ 2.5 เป็นตัวอย่างกันแลกเปลี่ยนความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขนาน ซึ่งจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของไหลมีอุณหภูมิสูงขึ้น และ มีค่าเข้าใกล้กับอุณหภูมิของของไหลที่มีอุณหภูมิสูงกว่าในตอนแรกที่ไหลเข้าในตอนแรก หรืออาจจะกล่าวได้ว่า T_{∞} จะคือน้อยกว่า T_{ho} เสมอ แต่ในรูปที่ 2.6 จะเห็นได้ว่าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลสวนทางจะมีความเป็นไปได้ที่ T_{∞} มีค่ามากกว่า T_{ho}



รูปที่ 2.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขนาน



รูปที่ 2.6 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลสวนทาง

ความร้อนที่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะถ่ายเทได้มากที่สุดก็ต่อเมื่อ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน นั้นมีความยาวเป็น ∞ นั่นก็คือ T_{ho} มีค่าเข้าใกล้ T_c ดังนั้นความร้อนที่ถ่ายเทมากที่สุดคือ

$$Q = m_h c_h (T_{hi} - T_{ci}) = (m c)_{\min} (T_{hi} - T_{ci}) \quad (2.24)$$

ดังนั้นประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้คือ

$$E = \frac{m c (T_{hi} - T_{ho})}{(m c)_{\min} (T_{hi} - T_{ci})} \quad (2.25)$$

ในทำนองเดียวกันถ้าเป็นในกรณีที่ $m_h c_h > m_c c_c$ จะเขียนสมการออกมาเป็นดังนี้

$$E = \frac{m_c c_c (T_{co} - T_{ci})}{(mc)_{\min} (T_{hi} - T_{ci})} \quad (2.26)$$

การถ่ายเทความร้อนจากครีป (Heat transfer from fins)

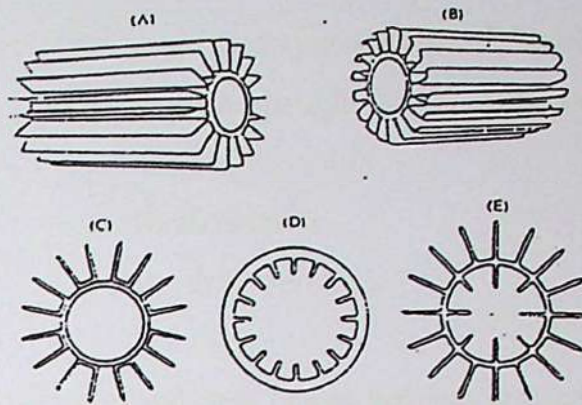
การเพิ่มพื้นที่ผิวหรือครีป มักนำมาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อน (Heat convection) ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในเครื่องยนต์หรือ เครื่องระบายความร้อนที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม โดยครีปจัดเป็นอุปกรณ์ที่มีบทบาทสำคัญมากอย่างหนึ่งในงานที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อน เพราะว่าครีปจะทำหน้าที่ในการเพิ่มพื้นที่ในการระบายความร้อนให้กับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ทำให้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสามารถระบายความร้อนได้มากขึ้นทำให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นมากด้วย แต่ในการติดตั้งครีปในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเป็นเรื่องที่ค่อนข้างยุ่งยากพอสมควรเพราะว่าจำนวนครีปที่ใช้นั้นมีจำนวนมากและครีปมีขนาดเล็กด้วย ซึ่งครีปสามารถแบ่งออกเป็นประเภทต่าง ๆ ดังนี้

ประเภทของครีป (Fins)

ดังที่กล่าวมาแล้วว่าครีปมีหน้าที่ในการช่วยเพิ่มพื้นที่ในการระบายความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนให้มากขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนให้เพิ่มขึ้นด้วย ครีปสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบใหญ่ๆ ตามลักษณะของการใช้งาน คือ

1. แบบท่อถ่ายเทความร้อนชนิดครีปตามยาว (Longitudinally finned tube)

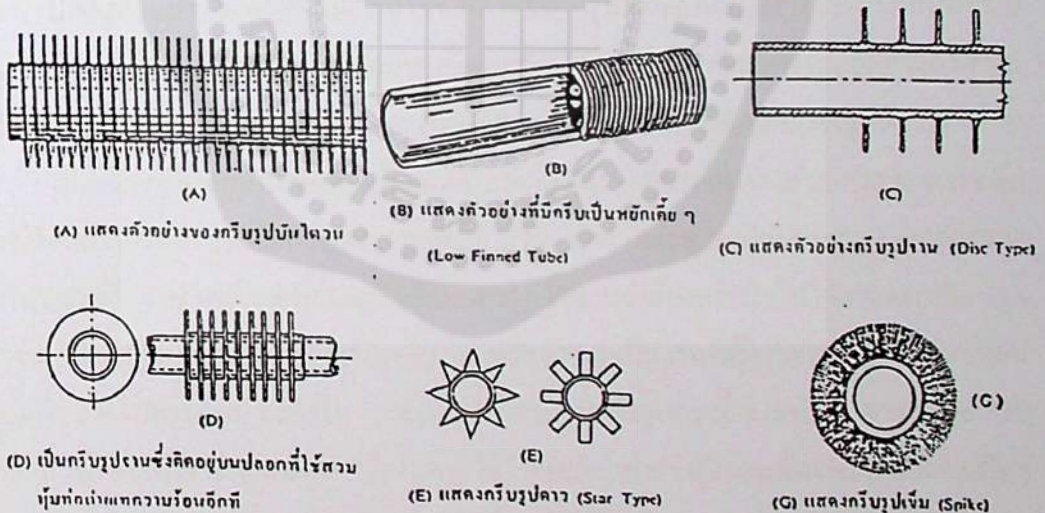
ท่อชนิดนี้ครีปยาวขนานกับแกนกลางของท่อถ่ายเทความร้อน ของไหลทางด้านที่มีครีปจะไหลขนานกับแกนกลางของท่อไปตามแผ่นครีปโดยทั่วไปแล้วท่อพวกนี้นิยมใช้กับก๊าซของเหลวความหนืดสูง หรือของเหลวที่ไหลเป็นชั้นๆ (Laminar flow) และมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผ่านฟิล์มต่ำ ตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างของท่อถ่ายเทความร้อนชนิดติดครีบทามยาวของท่อ

2. แบบท่อถ่ายเทความร้อนแบบติดครีบทามขวาง (Transversity finned tube)

ท่อชนิดนี้ติดครีบบัวในทิศทางที่ตั้งฉากกับแกนกลางของท่อถ่ายเทความร้อนส่วนใหญ่ใช้กับการระบายความร้อนจากหรือเพิ่มความร้อนให้กับก๊าซที่ไหลผ่านตั้งฉากกับท่อถ่ายเทความร้อนดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างของครีบทามแนวขวางของท่อ

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของผนังที่ติดครีบ สามารถหาได้จากสมการ 2.27 อัตราการถ่ายเทความร้อน ความร้อนของท่อที่มีครีบบัวหาได้โดย

$$Q = h_f T_b A_i = h_f T_b (\eta_f A_f A_o) \quad (2.27)$$

ในที่นี้

h_f	=	สปส. การถ่ายเทความร้อนผ่านฟิล์มท่อมิกิริบ	W/m^2K
T_b	=	ผลต่างของอุณหภูมิของของไหลนอกท่อ กับอุณหภูมิที่ฐานครีป	K
A_r	=	พื้นที่ผิวของครีป	m^2
η_f	=	ประสิทธิภาพของครีป	

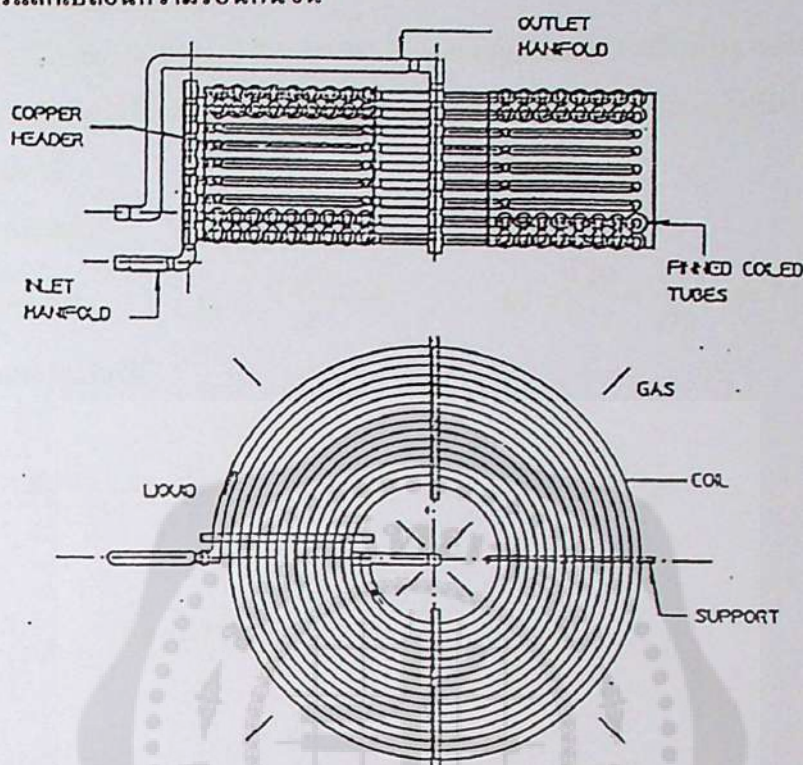
อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดกันหอย (Spiral coil heat exchanger, SCHE)

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้ประกอบด้วยท่อบาง ๆ ที่ขดเป็นวง ๆ แล้วเรียงกันเป็นชั้น มีท่อร่วมคอด้านในและด้านนอกของขดแต่ละวง การออกแบบให้มีลักษณะเช่นนี้เพื่อประโยชน์ในการแลกเปลี่ยนความร้อน โดยกำหนดก๊าซหรืออากาศจะไหลเข้าไปด้านในตรงแกนกลาง แล้วไหลออกด้านข้าง หรือจะไหลตรงรวมกันก็ได้ ของเหลวที่อยู่ในท่อจะไหลสวนทางกับก๊าซหรืออากาศ สำหรับก๊าซหรืออากาศ นั้นจะขึ้นอยู่กับทางเลือกอะไรมาใช้งาน อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดกันหอยอาจจะออกแบบให้ใช้ท่อที่มีครีปหรือไม่มีก็ได้ ขึ้นอยู่กับความต้องการใช้งานใน แต่ถ้าต้องการการถ่ายเทความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูง ๆ ควรจะใช้แบบมีครีป เพราะจะทำให้พื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนที่มากขึ้น อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้มีขนาดเล็กกว่าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบตั้งฉากถึง 15% และยังสามารถดัดโค้งทำความสะดวกได้รูปแบบของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดกันหอย จะมีลักษณะดังรูปที่ 2.9

ประโยชน์ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดกันหอย นั้นส่วนมากจะขึ้นระบบการแลกเปลี่ยนความร้อน รวมถึงความสามารถในการรับ และการขยายตัวของความแตกต่างของอุณหภูมิในขณะที่ใช้งาน นอกจากนี้ยังอยู่กับลักษณะการใช้งานว่าต้องการนำไปใช้งานแบบใด โดยส่วนมากจะนำไปใช้ในงานของเครื่องปรับอากาศ หรืออาจจะเป็นงานที่ต้องใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อช่วยในการอุ่นน้ำเลี้ยงใน หม้อไอน้ำก็สามารถนำอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดกันหอยนี้ไปใช้งานได้ด้วยเช่นกัน ซึ่งในการใช้ในแต่ละอย่างจำเป็นจะต้องทราบถึงประสิทธิภาพหรือสมรรถภาพ ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนว่ามีประสิทธิภาพหรือ สมรรถภาพ ในการแลกเปลี่ยนความร้อนได้คิมน้อยอย่างไร ซึ่งเป็นสิ่งที่จำเป็นมาก เพื่อที่จะได้งานออกมาตามความต้องการ

การคำนวณหาสมรรถภาพเชิงความร้อนของ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดกันหอย นั้นจะต้องทราบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ของวัสดุหรือของไหลที่นำมาใช้ใน อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดกันหอย ว่าเป็นน้ำ ก๊าซ หรืออากาศ ที่จะให้เป็นของไหล ไหล

ในขดท่อ ซึ่งส่วนมากจะนิยมใช้น้ำเป็นของไหลที่ไหลอยู่ภายในที่และให้อากาศไหลสวนทางกับน้ำ เพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนกันขึ้น



รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดกันหอย

ลักษณะการไหลในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดกันหอย

ลักษณะการไหลในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดกันหอยจะมีลักษณะการไหลด้วยกัน 2 แบบ คือการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) และการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ซึ่ง มีความสำคัญในการหาค่าการสูญเสียแรงดันในท่อโค้งที่ขดเป็นกันหอยเพื่อจะนำไปหาขนาดของปั๊มน้ำต่อไป

1. การไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow)

การไหลแบบราบเรียบสามารถแบ่งลักษณะของการไหลออกเป็น 4 แบบด้วยกัน คือ การไหลแบบเต็มรูป การไหลแบบไฮโดรไดนามิกส์แบบเต็มรูป การไหลแบบไฮโดรไดนามิกส์เชิงความร้อนแบบเต็มรูป และการไหลแบบเต็มรูปแบบฉับพลัน ซึ่งจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

การไหลแบบเต็มรูป การไหลของของไหลในขดท่อนั้น จะทำให้เกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางจากรูปแบบของความเร็วของการไหลซึ่งในการไหลของท่อขดกันหอยนั้นค่ารัศมีของขดจะมีการเปลี่ยนแปลงตลอด ซึ่งจะมีผลทำให้รูปแบบของการไหลและความเร็วเกิดการเปลี่ยนแปลง

ตามไปด้วย ดังนั้น การไหลแบบเต็มรูปในท่อขดกันหยอนนั้นจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของความแตกต่างของ R/a หรือ De เป็นส่วนใหญ่

รูปแบบความเร็วของ ดีน (Dean 's velocity profiles) เป็นพื้นฐานที่สำคัญในการวิเคราะห์และการประยุกต์ใช้ค่าคินน์เบอร์ที่ ค่า $De < 20$ ดังสมการต่อไปนี้ซึ่งจะขึ้นอยู่กับขอบเขตที่กำหนดให้

สมการในแนวแกน

$$u_r = \frac{vD}{a} \cos \theta, \quad u_\theta = -\frac{vD}{a} \sin \theta, \quad u_x = \left(\frac{Bv}{a} + \frac{Crv}{Da^2} \cos \theta \right) \quad (2.28)$$

สมการในแนวขอบเขต

$$u_r = 0 \quad (2.29)$$

$$u_\theta = \frac{Dv \sin \theta}{a} \left(\frac{12a - 6\delta}{\delta} \right) \delta + \left(\frac{9\delta - 24a}{\delta} \right) \delta^2 + \left(\frac{12a - 4\delta}{\delta} \right) \delta^3 \quad (2.30)$$

และ

$$u_x = \frac{v}{a} \left[\left(B + \frac{C}{D} \frac{(a - \delta) \cos \theta}{a} \right) (2\delta - \delta^2) \right] + \frac{vC\delta \cos \theta}{Da^2} (\delta - \delta^2) \quad (2.31)$$

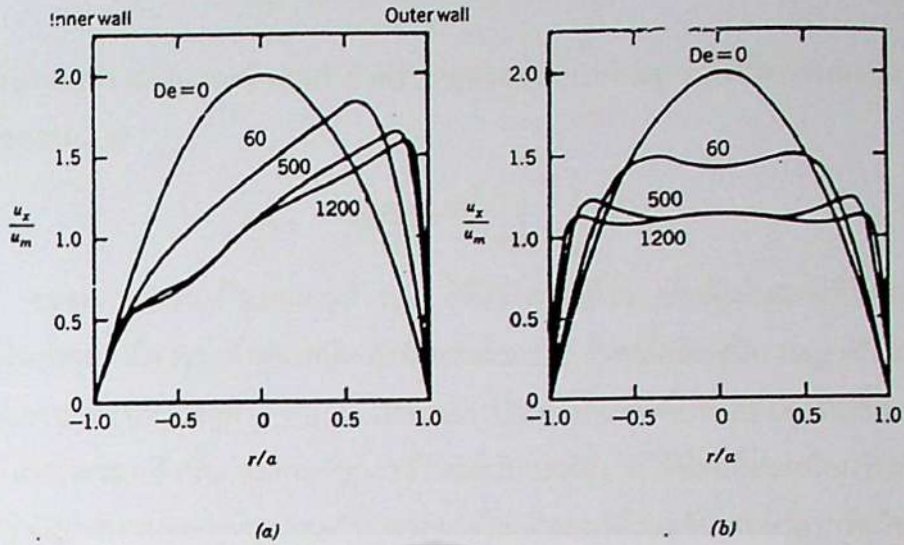
เมื่อ

$$B = \frac{0.5 \text{ Re}}{1 - \frac{2\delta}{3a} + \frac{\delta^2}{6a^2}}, \quad C = \frac{\frac{2a \text{ Re}}{\delta}}{1 - \frac{2\delta}{3a} + \frac{\delta^2}{6a^2}} \quad (2.32a)$$

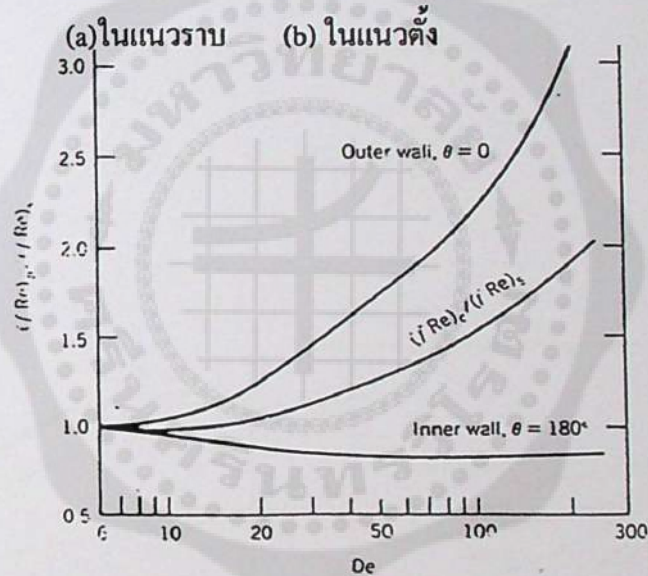
และ

$$D = 0.9656 De^{1/2} + 1.65, \quad \delta = \frac{4.63a}{De^{1/2}} - \frac{0.766a}{De} \quad (2.32b)$$

จากสมการแสดงรูปแบบของความเร็วข้างต้นถึงความสำคัญของเงื่อนไขขอบเขตเพื่อใช้ในการคำนวณ เมื่อ $De > 100$ แต่ถ้าค่า $De < 20$ รูปแบบของความร้อนจะเป็นการไหลในลักษณะที่เป็นท่อตรง เพราะฉะนั้นในท่อโค้งจะมีค่า คินน์ เบอร์อยู่ระหว่าง 20 ถึง 100 ในรูปที่ 2.10 แสดงให้เห็นถึงรูปแบบของความเร็วเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าคินน์เบอร์ ซึ่งใช้ในการวิเคราะห์รูปแบบของการไหลในขดท่อ



รูปที่ 2.10 แสดงผลของค่า Dean นัมเบอร์ในรูปแบบความเร็วในแนวแกนของท่อ



รูปที่ 2.11 แสดงการฟังก์ชันสำหรับค่า Dean นัมเบอร์ (Dean number) ของการไหลแบบเต็มรูป

ค่าวิกฤติของ เรย์โนลด์ นัมเบอร์ การไหลที่มีการเปลี่ยนแปลงจากการไหลแบบราบเรียบเป็นการไหลแบบปั่นป่วนนั้นได้มีการกำหนดค่าวิกฤติของเรย์โนลด์นัมเบอร์ Re_{crit} สำหรับการไหลในท่อโค้งนั้นถึงแม้จะยากต่อการบอกค่าของเรย์โนลด์นัมเบอร์ เพราะมีการเปลี่ยนแปลงของส่วนโค้งต่าง ๆ เป็นจำนวนมากรวมทั้งค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานภายในท่อโค้งที่มีผลทำให้ ค่าเรย์โนลด์ นัมเบอร์ เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ซึ่งจะแตกต่างกับการไหลในท่อตรงที่มีการเปลี่ยนแปลงของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เป็นไปอย่างคงที่และได้มีการ

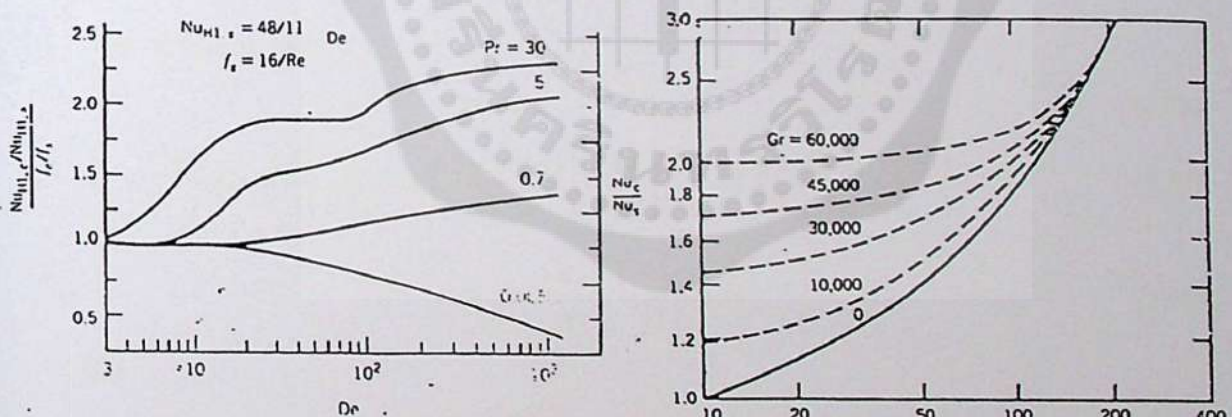
กำหนดค่าวิกฤติของค่า เรย์โนลด์ นัมเบอร์ สำหรับท่อตรงซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้ในการออกแบบท่อ
ทั่ว ๆ ไป ดังสมการ 2.33

$$Re_{crit} = 2100 \left[1 + 12 \left(\frac{R}{a} \right)^{-0.5} \right] \quad (2.33)$$

จากความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.33 ได้มีวิธีการแก้ไข เพิ่มเติมในกรณีที่มีการจำกัด
ของการไหลในท่อตรง เมื่อ R/a เข้าสู่อ่านั้น ดังนั้นสมการ 2.33 จึงเปลี่ยนมาเป็น $Re_{crit} = 2100$ ซึ่งมี
การกำหนดค่าความเบี่ยงเบน อยู่ที่ $\pm 15\%$ สำหรับการไหลในท่อขดกันหยอที่มีการเปลี่ยนแปลง
รัศมีความโค้งตลอดเวลา ดังนั้น ค่าวิกฤติของเรย์โนลด์นัมเบอร์จึงไม่ได้มีค่าเดียวเหมือนในท่อตรง
เพราะฉะนั้นจึงมีการกำหนดค่าสูงสุดและต่ำสุดของค่าวิกฤติของเรย์โนลด์นัมเบอร์ตามรัศมีของขที่
เปลี่ยนแปลงตลอดเวลาเพื่อให้เหมาะสมในการนำไปใช้งานดังสมการ 2.34 และสมการ 2.35

$$(Re_{crit})_{min} = 2100 \left[1 + 12 \left(\frac{R_{max}}{a} \right)^{-0.5} \right] \quad (2.34)$$

$$(Re_{crit})_{max} = 2100 \left[1 + 12 \left(\frac{R_{min}}{a} \right)^{-0.5} \right] \quad (2.35)$$



รูปที่ 2.12 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการไหลท่อตรงกับท่อโค้ง

การตรวจสอบ ขดท่อที่ใช้ในการไหลแบบราบเรียบ ที่ทางเข้าของขดท่อจะมีความ
ยาว น้อยกว่าในท่อตรงถึง 20-50% และการประยุกต์ค่าที่ใช้ในงานทางด้านวิศวกรรมจะใช้ค่า คิน
นัมเบอร์ มากกว่าหรือเท่ากับ 200 ($De \geq 200$) สำหรับการไหลแบบเต็มรูปซึ่งจะเป็นค่าที่มีค่าความ
ผิดพลาดน้อยมาก ซึ่งค่าประสิทธิภาพการไหลในท่อตรงกับท่อโค้งได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.12 เมื่อ

อัตราส่วนของ $(N_{uhk}/N_{uhl})/(f_c/f)$ ถูกนำมาใช้ในการหาค่า แพรนเติล นัมเบอร์มีค่าเป็น 0.7 เพราะนั้นประสิทธิภาพของการไหลในท่อได้ยากกว่าท่อตรง

2. การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow)

การไหลของของไหลส่วนมาก จะเป็นการไหลแบบปั่นป่วนซึ่งจะควบคุมรูปแบบในการไหลได้ยาก ดังนั้นจึงได้มีการกำหนดค่ามาตรฐานสำหรับการไหลแบบเต็มรูป ของการไหลแบบปั่นป่วนไว้เพื่อให้ช่วยในการหาค่าต่าง ๆ ที่เกิดจากการไหลเมื่อมีการไหลแบบปั่นป่วนขึ้น ซึ่งส่วนมากจะเกิดขึ้นที่ครึ่งรอบแรกของการไหลขดท่อหรืออาจจะเกิดขึ้นช้ากว่านั้น ถ้าตรงส่วนทางเข้าของขดน้อยเกินไป การไหลของของไหลที่ไหลแบบปั่นป่วนจะมีรูปแบบของความเร็วคล้ายกับการไหลแบบราบเรียบในขณะที่มีการไหลแบบเต็มรูปที่จุดที่มีความเร็วสูงสุดของขดท่อนั้น ๆ ดังนั้นการคำนวณหารูปแบบของความเร็วในการไหลแบบปั่นป่วนจะหาได้จาก การรวมกันของความยาวของขดท่อและความเร็วจัดของของไหลในท่อ โดยที่ รูปแบบของความเร็วที่หาได้นั้นจะขึ้นอยู่กับ เงื่อนไขของชั้นขอบเขตของขดท่อด้วย ดังสมการต่อไปนี้

สมการในแนวแกน

$$u_r = \frac{Gv}{a} \cos \theta, \quad u_\theta = -\frac{Gv}{a} \sin \theta, \quad (2.36)$$

$$u_x = \frac{Hv}{a} \left(1 + \frac{0.4r \cos \theta}{a} \right) \quad (2.37)$$

สมการแนวขอบเขต

$$u_r = 0 \quad (2.38)$$

$$u_\theta = -\frac{Gv}{a} \sin \theta \left[\frac{1}{3} \left(\frac{8}{\delta/a} - 1 \right) \left(\frac{1-(r/a)}{\delta/a} \right) - \frac{4}{3} \left(\frac{2}{\delta/a} - 1 \right) \left(\frac{1-(r/a)}{\delta/a} \right)^{1/7} \right] \quad (2.39)$$

$$u_x = \frac{vu_\delta}{a} \left(\frac{1-(r/a)}{\delta/a} \right)^{1/7} \quad (2.40)$$

เมื่อ

$$G = 0.0855 \text{Re}^{0.8} \left(\frac{R}{a} \right)^{-0.1}, \quad \frac{\delta}{a} = 0.5545 \text{Re}^{-0.02} \left(\frac{R}{a} \right)^{0.4} \quad (2.41)$$

$$u_\delta = H \left(1 + 0.7 \cos \theta + 0.1 \cos^2 \theta + \dots \right)^{4/7} \quad (2.42a)$$

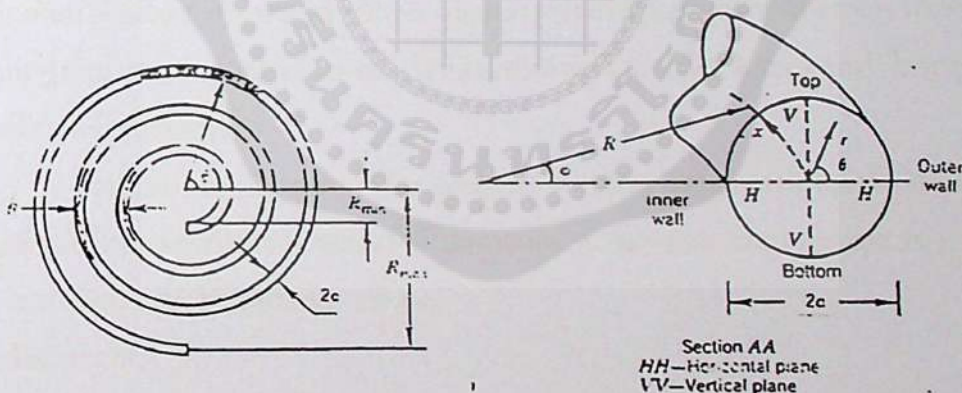
และ สมการ

$$H = \frac{\text{Re}}{2.0 - 0.5(\delta/a) + 0.133(\delta/a)^2} \quad (2.42b)$$

รูปแบบของ ความเร็วเชิงเส้นนั้นสามารถคำนวณ ได้จากสมการข้างต้นด้วย เหมือนกันดังนั้นจากสมการข้างต้นจึงทำให้ทราบถึงรูปแบบความเร็วของการไหลแบบปั่นป่วนได้ ว่ามีรูปเป็นอย่างไร ซึ่งมีผลในการคำนวณหาการสูญเสียความดันที่เกิดขึ้นในขดท่อ ทั้งในการ ไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน ต่อไป

หลักการถ่ายเทความร้อนในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดกันหอย

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อตรงกับท่อโค้งจะพบว่าในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่เป็นแบบท่อโค้งจะใช้เนื้อที่ในการติดตั้งน้อยกว่า และมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงกว่า เพราะว่าเมื่อของไหลไหลในท่อจะทำให้เกิด แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางตามส่วนโค้งของท่อซึ่งความเร็วของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางนี้เองเป็นตัวทำให้เกิดการไหลแบบทุติยภูมิ (Secondary flow) ดังนั้นการเพิ่มความเร็วในการไหลในแกน ซึ่งอยู่ติดกับผนังท่อด้านนอกและลดความเร็วในแนวแกนด้านในท่อ ที่ผนังท่อด้านนอกความจะลดเนื่องจากมีแรงเสียดทานเชิงความร้อนและมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นด้วย เพราะฉะนั้นจึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและการสูญเสียแรงดันมีค่าสูงกว่าท่อตรงนั่นเองแต่ว่า ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อโค้งจะดูแลรักษา ความสะอาดภายในท่อยากกว่าท่อตรง



รูปที่ 2.13 แสดงลักษณะขดท่อในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดกันหอย

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและค่าการสูญเสียแรงดันในท่อโค้งจะขึ้นอยู่กับค่าตัวแปรต่าง ๆ เหล่านี้คือ ค่าเรย์โนลด์ นัมเบอร์ (Reynolds number) แพคเคิลนัมเบอร์ (Prandtl number) เงื่อนไขขอบเขตของอุณหภูมิที่ผนังท่อ อัตราส่วนของรัศมีของขดต่อรัศมีของท่อ พื้นที่หน้าตัดขวางของท่อ อัตราส่วนของความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ และ ระยะพิทช์ (Pitch) ของขดท่อ อิทธิพลของตัวแปรดังกล่าวมานี้จะมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนและแรงเสียดทานในการไหลของท่อ ซึ่ง

ลักษณะในการไหลภายในท่อโค้งสามารถแบ่งออกได้ดังนี้ คือ การไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) การไหลในช่องเปลี่ยนแปลง (Transitional flow) และการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ซึ่งการไหลในลักษณะต่าง ๆ เหล่านี้จะมีความเกี่ยวข้องกันกับการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานในการไหลซึ่งเป็นการไหลในสภาวะคงที่แบบสถานะเดียว

1. การถ่ายเทความร้อนในการไหลแบบราบเรียบ

การถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดกันหอยจะเห็นได้จาก รูปแบบของอุณหภูมิ (Temperature profiles) และ คำนวณเลข นัมเบอร์ (Nusselt number) สำหรับการถ่ายเทความร้อนแบบเต็มรูปแบบนั้นจะต้องพิจารณาที่เงื่อนไขดังต่อไปนี้ คือ อุณหภูมิที่ผนังท่อคงที่ และ ค่าฮีทฟลักซ์ (Heat flux) ที่ผนังคงที่ด้วย รูปแบบของอุณหภูมิที่มีการไหลแบบเต็มรูปแบบ (Fully developed) และรูปแบบของความเร็ว (Velocity profile) ความผิดพลาดของรูปแบบของอุณหภูมิในการไหลแบบทุติยภูมิ แรงผลักดันของอุณหภูมิที่ผนังด้านนอกท่อผลต่าง ๆ เหล่านี้ทำให้เกิดการอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ผิวท่อด้านนอกมีค่าสูงกว่าที่ผิวท่อด้านในรูปที่ 2.14 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่ม ค่านิน นัมเบอร์ (Dean number) และ ค่าพรันดเติล นัมเบอร์ (Prandtl number) จะทำให้เกิดค่าความผิดพลาดของรูปแบบทุติยภูมิมีค่าสูงขึ้น

สมการของรูปแบบอุณหภูมิที่ใช้กับการไหลในขดกันหอยโดยใช้ค่ารัศมีเฉลี่ย (R_{ave}) ในขดท่อเพื่อมาคำนวณค่า คินนัมเบอร์ (Dean number) และค่ารัศมีสูงสุดที่ทางออกของขดท่อทำให้สามารถหารูปแบบของการไหลได้ แต่อย่างไรก็ตามสมการดังกล่าวนี้จะไม่สามารถนำไปหารูปของการไหลที่ทางเข้าของขดท่อได้

รูปแบบของอุณหภูมิ (Temperature profiles) เราสามารถหาค่าได้จากเงื่อนไขขอบเขตที่จะใช้ในการหาค่าต่าง ๆ ออกมาได้โดยกำหนดให้ $De > 100$ เมื่อ $Pr \leq$ และ $Pr \leq 1$ และ $R/a > 1$. ในส่วนแนวแกนใช้ในดังสมการที่ 2.43

สมการในแนวแกน

$$\frac{T_w - T}{T_w - T_m} = F = N \left[1 + \frac{EB}{D} \left(\frac{r}{a} \right) \cos \theta + \frac{E}{2D^2} \left(C + EB^2 \left(\frac{r}{a} \cos \theta \right)^2 \right) + \frac{E}{D} \left(\frac{EC}{2D^2} + \frac{E^2 B^2}{6D^2} \right) \left(\frac{r}{a} \cos \theta \right)^3 \right] \quad (2.43)$$

เมื่อ

$$N = \left(1 + \frac{3}{8} \frac{EC}{D^2} + \frac{1}{8} \frac{E^2 B^2}{D^2} \right)^{-1}, \quad E = \frac{8a}{\delta_t \text{RePr}} \quad (2.44)$$

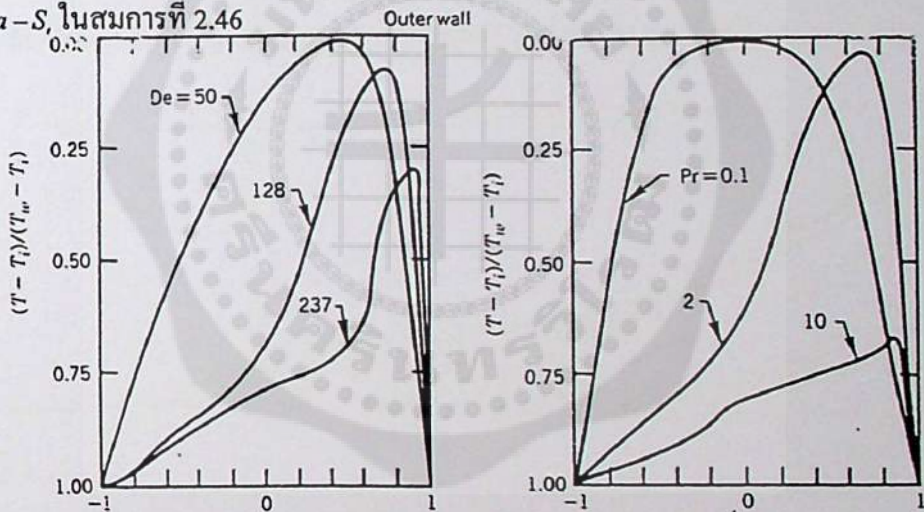
$$\delta_t = \begin{cases} 0.2 \left[2 + (10/\text{Pr}^2 - 1)^{1/2} \right] & \text{for } \text{Pr} \leq 1 \\ 0.189 \delta \left[1 + (1 + 19.5/\text{Pr}^2)^{1/2} \right] & \text{for } \text{Pr} \geq 1 \end{cases} \quad (2.45)$$

สมการในขอบเขต

$$\frac{T_w - T}{T_w - T_m} = F_1 \left[\frac{2(a-r)}{\delta_t} - \left(\frac{a-r}{\delta_t} \right)^2 \right] \quad (2.46)$$

โดยที่

F_1 = ตัวแปรไร้มิติที่แสดงถึงรูปแบบของอุณหภูมิบริเวณแกนกลางซึ่งได้มาจาก F ที่หาค่าได้จาก $r = a - \delta$ ในสมการที่ 2.46



รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะของรูปแบบของอุณหภูมิสำหรับเงื่อนไขขอบเขตที่มีค่าขึ้นอยู่กับค่าต่าง ๆ คือ (a) ค่าคีนัมเบอร์ (Dean number) และ (b) ค่าพรานเติล นัมเบอร์ (Prandtl number) สำหรับท่อโค้ง

จากสมการข้างต้นจะสามารถหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ได้จะต้องกำหนดให้ค่า $\text{Pr} < 1$ และ $\text{De} > 100$ และ $R/a > 4$ ถ้ากำหนดให้ $\text{De} < 100$ จะหาค่าไม่ได้ แต่ถ้าเป็นในท่อตรงจะหาค่าได้เพราะในท่อตรงมีค่า คีนัมเบอร์ (Dean number) ที่ต่ำ ๆ เมื่อเรากำหนดให้ค่า $\text{De} > 100$ จะได้สมการของรูปแบบอุณหภูมิออกมาเป็นหัวข้อต่าง ๆ ดังนี้

สมการที่แนบมา

$$\frac{T_w - T}{a(dT/dx)} = g = B' + \frac{C(r/a)^2}{2D^2} + \frac{B(r/a)\cos\theta}{D} \quad (2.47a)$$

เมื่อ

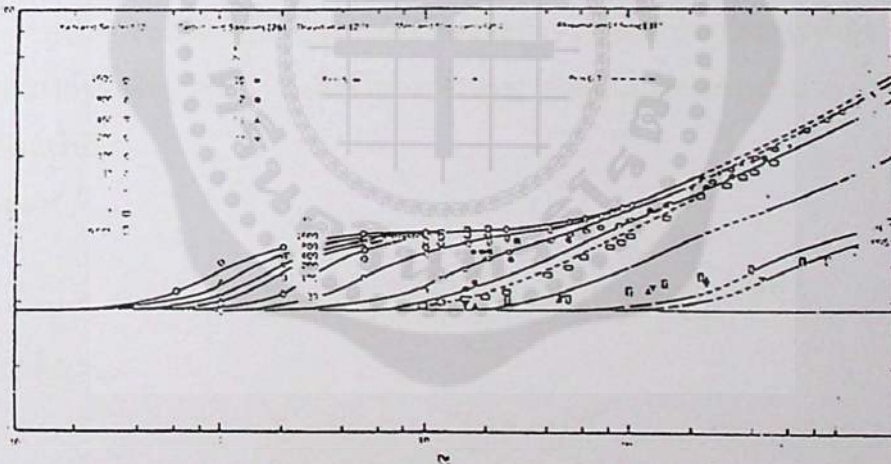
$$B' = \frac{\delta_i \text{Re Pr}}{8a} - \frac{a \text{Re}}{D^2 \delta} \quad (2.47b)$$

สมการในแนวขอบเขต

$$\frac{T_w - T}{a(dT/dx)} = g\delta_i \left(\frac{2(a-r)}{\delta_i} - \left(\frac{a-r}{\delta_i} \right)^2 \right) + \frac{\delta_i}{a} \left(\frac{C}{aD^2} (a-\delta_i) + \frac{B}{D} \cos\theta \right) \left[\left(\frac{a-r}{\delta_i} \right)^2 - \left(\frac{a-r}{\delta_i} \right)^3 \right] \quad (2.48)$$

เมื่อ $g\delta_i$ = ตัวแปรไร้มิติของรูปแบบอุณหภูมิซึ่งคำนวณได้โดยการแทนค่า $r = a - \delta_i$

จากสมการข้างต้นสามารถหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ได้ในรูปแบบของอุณหภูมิซึ่งมีผลทำให้การถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงขึ้นได้ แต่อย่างไรก็ตามทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของเหลวที่ใช้เป็นตัวกลางที่จะทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้ดียิ่งขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังมี ค่าพรันดเติล นัมเบอร์ (Prandtl number) ที่กำหนดให้มีค่าเป็น $Pr > 1$ ดังสมการที่ 2.47 และ 2.48 เป็นต้น



รูปที่ 2.15 แสดงการเปรียบเทียบค่าในการออกแบบกับค่าทาง ทฤษฎี ของค่า นัสเซลต์ นัมเบอร์ (Nusselt number) สำหรับเงื่อนไขขอบเขต

ค่า นัสเซลต์ นัมเบอร์ ในขดกันหอย (Nusselt number spiral coils) การหาค่า นัสเซลต์ นัมเบอร์ สำหรับ 2 ขดที่ใช้กับหม้อไอน้ำ โดยใช้สารละลาย กลีเซอรอล (Glycerol solutions) ซึ่งจะได้สมการที่ใช้สำหรับการคำนวณหาค่าคุณสมบัติของของเหลวที่นำมาใช้งานโดยใช้ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิเพื่อนำมาหาค่าต่าง ๆ ได้

$$Nu_T = \left(1.98 + 1.8 \frac{a}{R_{ave}} \right) Gz^{0.7} \quad (2.49)$$

โดยที่จะกำหนดให้ค่าต่าง ๆ ดังนี้ $9 \leq Gz < 1000$, $80 < Re < 6000$ และ $20 < Pr < 1000$

แม้ว่า สมการจะให้ค่าต่าง ๆ ในช่วงที่กำหนดแต่เราสามารถคำนวณหาค่า นัสเซิลต์ นัมเบอร์ (Nusselt number) ได้โดยการใช้ค่า $Gz = 20$ ลักษณะความสัมพันธ์นี้จะไม่รวมค่าคงที่ของ ตัวแปรต่าง ๆ ทางกายภาพ ได้แก่ ระยะห่างของขดท่อ จำนวนรอบของขด เป็นต้น ซึ่งค่าต่าง ๆ เหล่า นี้จะเป็นค่าที่ใช้ในการออกแบบเพื่อใช้สัมพันธ์ดังกล่าวมาคำนวณหาผลลัพธ์และนำค่าที่ได้จากการ คำนวณไปใช้งานต่อไป

2. การถ่ายเทความร้อนในการไหลแบบปั่นป่วน

ลักษณะการถ่ายเทความร้อนสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนจะมีอยู่ด้วยกัน 2 ลักษณะ คือ (1) พิจารณาที่รูปแบบของอุณหภูมิ (Temperature profiles) และ (2) ค่า นัสเซิลต์ นัมเบอร์ (Nusselt number) ในการคำนวณหาการถ่ายเทความร้อนในการไหลแบบปั่นป่วนจะต้องทราบ ถึงลักษณะของรูปแบบของอุณหภูมิและค่านัสเซิลต์นัมเบอร์ ซึ่งค่าดังกล่าวจะไม่ขึ้นอยู่กับเงื่อนไข ของขอบเขต เมื่อ $Pr \geq 0.7$

รูปแบบของอุณหภูมิ ในการคำนวณและการคาดคะเนถึงรูปแบบของอุณหภูมินั้น สามารถคำนวณได้จากเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการคำนวณ ซึ่งรูปแบบของการคำนวณนั้นจะหาได้ จากสมการดังต่อไปนี้

ในแนวแกนกลาง

$$\frac{T_w - T_m}{a(dT/dx)} = H \left(\frac{H'}{H} + \frac{0.2}{G} \left(\frac{r}{a} \right)^2 + \frac{r}{Ga} \cos \theta \right) \quad (2.50)$$

สมการในแนวขอบเขต

$$\frac{T_w - T_m}{a(dT/dx)} = g_{1\delta} \left(\frac{1 - (r/a)}{\delta/a} \right)^{1/7} \quad (2.51)$$

เมื่อ

$$g_{1\delta} = H \left[\frac{H'}{H} + \frac{0.2}{G} \left(1 - \frac{\delta}{a} \right)^2 + \frac{\cos \theta}{G} \left(1 - \frac{\delta}{a} \right) \right] \quad (2.52)$$

$$H' = \frac{(Pr^{0.67} - 0.16724)(10.64 Re^{0.2})(R/a)^{0.1}}{1 + 0.1875(\delta/a)} \quad (2.53)$$

ค่า G, H และ δ/a จากสมการข้างต้นเป็นค่าคงที่ของก๊าซที่ $Pr \leq 1$ แต่ถ้าใช้สมการใช้ ค่า $Pr > 1$ จะหาค่าไม่ได้

$$\frac{Nu_c}{Nu_s} = \left(1 + 3.54 \frac{a}{R} \right) \left(\frac{Pr_m}{Pr_w} \right)^{0.25} \quad \text{for} \quad \frac{R}{a} > 6 \quad (2.54)$$

ค่าตัวเลข นัมเบอร์ (Nusselt number) ในขดกันหอย จะสามารถหาได้จากสมการ 2.54 ซึ่งค่าที่ได้จะมีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ $\pm 15\%$ เมื่อใช้ค่ารัศมีเฉลี่ยของส่วนโค้งของขดกันหอย มาใช้ในการคำนวณ

3. การหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ภายในท่อ (h_i)

สำหรับท่อแบบขดกันหอยที่มีการไหลแบบราบเรียบ จะหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้จาก การคำนวณ ค่าตัวเลข นัมเบอร์ (Nusselt number) ภายในของท่อก่อนแล้วนำ ค่าตัวเลข นัมเบอร์ (Nusselt number) ที่ได้ไปคำนวณหา ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ต้องการ ซึ่ง ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ที่ได้จะขึ้นอยู่กับ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) ของของไหลที่ไหลอยู่ภายในท่อ ซึ่งของไหลที่ไหลอยู่ในท่อ ในที่นี้กำหนดให้เป็นน้ำ ดังนั้น ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) ที่ใช้จึงต้องเป็นของน้ำด้วยเช่นกันจึงจะทำให้การคำนวณออกมาได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องซึ่งในขั้นแรกนั้นจะต้องหา ค่าตัวเลข นัมเบอร์ (Nusselt number) ก่อนดัง สมการต่อไปนี้

$$Nu = 0.06 Re^{0.7} Pr^{0.43} \left(\frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0.25} \left(\frac{r_i}{R} \right)^{0.18} \quad (2.55)$$

สำหรับท่อแบบขดกันหอยที่มีการไหลแบบปั่นป่วน จะหา ค่าตัวเลข นัมเบอร์ (Nusselt number) ได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\frac{Nu_{curve \ tube}}{Nu_{straight \ tube}} = F \left(\frac{r_i}{R} \right) \quad (2.56)$$

$$Nu_{straight \ tube} = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (2.57)$$

$$F \left(\frac{r_i}{R} \right) = 1 + 3.5 \left(\frac{r_i}{R} \right) \quad (2.58)$$

จากสมการการหา ค่าตัวเลข นัมเบอร์ (Nusselt number) ข้างต้นทั้งที่เป็นการไหลแบบ ราบเรียบ และ การไหลแบบปั่นป่วนเราสามารถนำมาหา ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ด้านในท่อได้ดังความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$Nu_i = \frac{h_i D_i}{k} \quad (2.59)$$

และจากความสัมพันธ์นี้เองเราสามารถย้ายข้าง สมการเพื่อหา ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (h_i) ด้านในท่อได้

4. การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ภายนอกท่อ (h_o)

สำหรับ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (h_o) ภายนอกท่อ นั้นเราสามารถหาได้ ด้วยการใช้ความสัมพันธ์เดียวกันกับสมการ (2.59) แต่จะต่างกันตรงที่ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) เพราะว่าที่ด้านนอกของท่อนั้นจะใช้ของไหลต่างชนิดกันกับด้านในท่อ ดังนั้น ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) ที่ใช้จึงต้องเป็นค่าของค่าของไหลที่ใช้ในนั้น ๆ ด้วยในที่นี้ ของไหลที่ใช้เป็นอากาศซึ่ง ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (h_o) ที่ได้นี้ก็ขึ้นอยู่กับ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) ของอากาศนั่นเอง ในขั้นแรกก็ต้องหาค่านัสเซลล์ นัมเบอร์ (Nusselt number) ออกมาก่อนดังสมการต่อไปนี้

$$Nu = (0.4 Re^{0.5} + 0.06 Re^{2/3}) Pr^{0.4} \quad (2.60)$$

เมื่อได้ ค่านัสเซลล์ นัมเบอร์ (Nusselt number) ออกมาแล้วก็มาหา ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนได้ดังสมการ (2.61)

$$Nu_o = \frac{h_o D_o}{k} \quad (2.61)$$

การสูญเสียความดันในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดกันหอย

การสูญเสียความดันในขดท่อจะเกิดจากลักษณะของการไหลของของไหลในขดท่อ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ การสูญเสียความดันจากการไหลแบบราบเรียบ และ การสูญเสียความดันจากการไหลแบบปั่นป่วน

1. การสูญเสียความดันจากการไหลแบบราบเรียบ

การหาค่าการสูญเสียความดันนั้นก่อนอื่นเราจะต้องทราบค่าของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานก่อนซึ่ง ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของการไหลแบบราบเรียบนั้นหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$f_c = \frac{0.63(n_2^{0.7} - n_1^{0.7})^2}{Re^{0.6}(b/r_i)^{0.3}} \quad (2.62)$$

$$\text{for } 500 < Re(b/r_i) < 20000 \text{ and } 7.3 < b/r_i < 15.5$$

เมื่อได้ค่า สัมประสิทธิ์ความเสียดทานในท่อขดกันหอยมาแล้วก็ทำการคำนวณหาค่า การสูญเสียความดัน ΔP ได้จากสมการต่อไปนี้

$$\Delta P = 4f_c \frac{L}{D} \rho \frac{u_m^2}{2} \quad (2.63)$$

2. การสูญเสียความดันจากการไหลแบบปั่นป่วน

ในขณะเดียวกันการหาสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของการไหลแบบปั่นก็จำเป็นต้องทราบด้วยเช่นกัน ซึ่งจะหาได้จากสมการ ต่อไปนี้

$$f_c = \frac{0.0074(n_2^{0.9} - n_1^{0.9})^{1.5}}{\left(\text{Re}\left(\frac{b}{r_i}\right)^{0.5}\right)^{0.2}} \quad (2.64)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} n_1 &= L/(2\pi bN) - N/2 \\ n_2 &= L/(2\pi bN) + N/2 \end{aligned} \quad (2.65)$$

เมื่อได้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานการสูญเสียความดันแล้วก็สามารถที่จะหาค่าการสูญเสียความดันในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนได้จากสมการ

$$\Delta P = K \frac{\rho u_m^2}{2} \quad (2.66)$$

โดยที่

$$K = \frac{4f_c L}{D_h} = \frac{4fL}{D_h} + K^* \quad (2.67)$$

กำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานการสูญเสียความดัน f มีค่าดังต่อไปนี้คือ

$$f = 0.0791 \text{Re}^{-0.25} \quad \text{for } 10^4 < \text{Re} < 10^5 \quad (2.68)$$

$$f = 0.0008 + 0.005525 \text{Re}^{-0.237} \quad \text{for } 10^5 < \text{Re} < 10^7 \quad (2.69)$$

บทที่ 3

การคำนวณและการออกแบบ

กำหนดข้อมูลเบื้องต้น

1. ความยาวของชุด Test channel 12 m.
2. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Test channel 30 cm
3. ความเร็วของลมภายใน Test channel 5 m/s
4. ค่าความร้อนที่ Heater ทำความร้อนได้ 3,000 watt
5. อุณหภูมิอากาศเข้า Test channel 50 °C

ระบบการไหลของอากาศในช่องทดสอบ (Test channel)

1. คำนวณหาการสูญเสียหลัก (Major losses)

จากความยาวของช่องทดสอบทั้งหมดหาค่าของ ρ และ ν ของอากาศที่อุณหภูมิ 50 °C เพื่อหาค่าการสูญเสียของ Test Channel ได้

$$\rho = 1.030 \quad \text{kg} / \text{m}^3$$
$$\nu = 1.99 \times 10^{-5} \quad \text{m}^2 / \text{s}$$

จากสูตรในการหาค่าเรย์โนลด์ นัมเบอร์ (Re)

$$\text{Re} = \frac{VD}{\nu} = \frac{5 \times 0.3}{1.99 \times 10^{-5}}$$
$$\text{Re} = 7.5376 \times 10^4$$

เนื่องจาก Test channel ทำจากสังกะสี

ได้ค่าความขรุขระ (Roughness) : $e = 0.03 \text{ mm}$.

หามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $D = 30 \text{ cm} = 300 \text{ mm}$.

จาก Moody diagram สามารถหาค่า f จากความสัมพันธ์ของค่าเรย์โนลด์ นัมเบอร์ (Re) และค่า e/D ได้ค่า f ออกมาเป็น

$$\frac{e}{D} = \frac{0.03}{300} = 0.0001$$
$$f = 0.028$$

ดังนั้นจะสามารถหาค่าการสูญเสียหลัก (Major Losses) h_L

จากสูตร

$$\begin{aligned} h_L &= f \frac{L V^2}{D 2g} \\ &= 0.028 \frac{12}{0.3} \times \frac{(5)^2}{(2 \times 9.81)} \\ &= 1.4271 \quad m \end{aligned}$$

2. คำนวณหาค่าการสูญเสียรอง (Minor losses) h_m

ภายใน Test channel จะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนี้ ข้องอ 90 องศา จำนวน 3 ตัว ซึ่งเป็นข้องอที่มีรัศมีสั้น ๆ ทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของการสูญเสียมีค่าเป็น

$$K_b = 0.5$$

จากสูตร

$$\begin{aligned} h_m &= K_b \frac{V^2}{2g} \\ &= 0.5 \left(\frac{(5)^2}{2 \times 9.81} \right) \\ &= 0.6371 \quad m \end{aligned}$$

เนื่องจากข้องอ 90 องศา มีจำนวน 3 ตัว ดังนั้นจะได้ค่า h_m เท่ากับ

$$\begin{aligned} h_m &= 0.6371 \times 3 \\ &= 1.9113 \quad m \end{aligned}$$

รวมค่าการสูญเสียหลัก h_L กับการสูญเสียรอง h_m

$$\begin{aligned} h_{total} &= 1.4271 + 1.9113 \\ &= 3.3348 \quad m \end{aligned}$$

เนื่องจาก มีการสูญเสียที่เกิดจากชุด Test section , Straightener , ชุด Heater และ ชุด Guide vane จึงต้องเพิ่มค่าการสูญเสียขึ้นอีก 3 เท่า ของค่าที่คำนวณได้ ดังนั้นจะได้ค่าการสูญเสียรวมทั้งสิ้นเท่ากับ

$$\begin{aligned} h_{total} &= 3.3348 \times 3 \\ &= 10.0044 \quad m \end{aligned}$$

3. การคำนวณหาขนาดพัดลม

จากสูตร

$$\text{Fan power} = \Delta P \times \text{Volume flow rate}$$

เมื่อ ΔP หาได้จากสูตร

$$\begin{aligned}\Delta P &= \rho gh \\ &= 1.030 \times 9.81 \times 10.0044 \\ &= 101.08745 \quad \text{N / m}^2\end{aligned}$$

หาค่า $\text{Volume flow rate (Q)}$ จากสูตร

$$\begin{aligned}\dot{Q} &= AV \\ &= \frac{\pi}{4} (0.3)^2 \times 5 \\ &= 0.3534 \quad \text{m}^3 / \text{s}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\therefore \text{Fan power} &= \Delta P \times \dot{Q} \\ &= 101.08745 \times 0.3534 \\ &= 35.72430 \quad \text{Watt}\end{aligned}$$

ดังนั้นจะได้ขนาดพัดลม = 35.72430 Watt

การคำนวณและการออกแบบระบบน้ำ

กำหนดข้อมูลเบื้องต้น

เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อทดสอบ (Test section) (D_2)	= 9.525	mm
โดยท่อที่ใช้เป็นท่อทองแดง Type K ได้ค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ (D_1)	= 7.75	mm
ความหนาของครีป	= 0.25	mm
ระยะห่างระหว่างครีป	= 8.35	mm
เส้นผ่าศูนย์กลางของครีป	= 30	mm
เส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุดของชุดทดสอบ (Spiral coil unit)	= 560	mm
เส้นผ่านศูนย์กลางต่ำสุดของชุดทดสอบ (Spiral coil unit)	= 200	mm
มีจำนวนของขดกันหอยทั้งหมด	= 10	ชั้น

ดังนั้นจะได้ขนาดความยาวของท่อทดสอบทั้งหมดมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned}
 L_{tube \text{ total}} &= \pi D_{ave} \\
 &= \pi \left(\frac{560 + 200}{2} \right) \times 10^{-3} \\
 &= 1.19 \quad m
 \end{aligned}$$

คำนวณหาจำนวนของครีบอกในท่อทดสอบ (N_{fin})

$$\begin{aligned}
 N_{Fin} &= \left(\frac{1.00}{(8.35 \times 10^{-3})} \right) + 1 \\
 &= 143.51 \quad Fins \\
 &= 144 \quad Fins
 \end{aligned}$$

คำนวณหาพื้นที่ของท่อทดสอบที่ไม่มีครีบอก (A_b)

จะได้

$$\begin{aligned}
 A_b &= \pi D L N_{Fin} \\
 &= \pi (9.525 \times 10^{-3}) \times [1 - ((0.25 \times 10^{-3}) \times 144)] \\
 &= 0.02884 \quad m^2
 \end{aligned}$$

คำนวณพื้นที่หน้าตัดของครีบอกทั้ง 2 ด้าน (A_{f1})

จะได้

$$\begin{aligned}
 A_{f1} &= 2 \left[\frac{\pi}{4} (d_o^2 - d_i^2) \times N_{fin} \right] \\
 &= 2 \left[\frac{\pi}{4} [(30 \times 10^{-3})^2 - (9.525 \times 10^{-3})^2] \times 144 \right] \\
 &= 0.18305 \quad m^2
 \end{aligned}$$

คำนวณหาพื้นที่สันครีบอก (A_{f2})

จะได้

$$\begin{aligned}
 A_{f2} &= \pi D L N_{Fin} \\
 &= \pi (30 \times 10^{-3}) \times (0.25 \times 10^{-3}) \times 144 \\
 &= 0.00339 \quad m^2
 \end{aligned}$$

เพราะฉะนั้นจะได้พื้นที่รวมของครีบบัทั้งหมด ($A_{f\text{total}}$)

$$\begin{aligned} A_{f\text{total}} &= A_b + A_{f1} + A_{f2} \\ &= 0.02884 + 0.18305 + 0.00339 \\ &= 0.21528 \quad \text{m}^2 \end{aligned}$$

1. คำนวณหาอุณหภูมิของอากาศที่ทางออก ($T_{a,o}$)

กำหนดข้อมูลเบื้องต้น

ค่าความร้อนที่ได้จาก ชุด Heater	= 3,000	Watt
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชุดทดสอบ	= 0.3	m
อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้า	= 50	°C
ความเร็วของอากาศที่ทางเข้า	= 5	m/s
กำหนดให้อุณหภูมิน้ำที่ทางเข้า ($T_{w,i}$)	= 10	°C
กำหนดให้ประสิทธิภาพของครีบบ	= 100 %	
รัศมีเฉลี่ยของขดกันหอย	= 0.19	m
รัศมีภายในท่อ	= 3.875×10^{-3}	m

จากการเปิดตารางที่ 1 ได้คุณสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิ 50 °C ดังนี้

$$\begin{aligned} \rho &= 1.38367 \quad \text{kg/m}^3 \\ C_p &= 1.00735 \quad \text{kJ/kg } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

คำนวณหาอัตราการไหลของอากาศ ($\dot{m}_a$)

$$\begin{aligned} \dot{m}_a &= \rho A V \\ &= 1.38367 \times \left(\frac{\pi}{4} (0.3)^2 \right) \times 5 \\ &= 0.48898 \quad \text{kg/s} \end{aligned}$$

คำนวณหาอุณหภูมิที่ทางออกของอากาศ ($T_{a,o}$)

$$\begin{aligned} Q &= \dot{m}_a c_p (T_{a,i} - T_{a,o}) \\ \therefore T_{a,o} &= T_{a,i} - \left(\frac{Q}{\dot{m}_a c_p} \right) \\ &= 50 - \left(\frac{3}{0.48898 \times 1.00735} \right) \\ &= 43.91 \quad ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

ดังนั้นจะได้ อุณหภูมิอากาศเฉลี่ยเท่ากับ

$$\begin{aligned} T_{a,ave} &= \frac{T_{a,i} + T_{a,o}}{2} \\ &= \frac{50 + 43.91}{2} \\ &= 46.95 \quad ^\circ\text{C} \\ &= 46.95 + 273.15 \\ &= 320.10 \quad \text{K} \end{aligned}$$

จากอุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศที่ได้นำไปเปิดตารางภาคผนวกที่ 1.1 ได้คุณสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

$$\begin{aligned} V &= 17.72216 \times 10^{-6} \quad \text{m}^3/\text{s} \\ k &= 0.02776 \quad \text{W/m}^\circ\text{C} \\ Pr &= 0.70357 \end{aligned}$$

สมมติให้อุณหภูมิน้ำที่ทางออก ($T_{w,o}$) = 28 $^\circ\text{C}$

เพื่อหาค่าอัตราการไหลของน้ำ (m_w)

ใช้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำได้เท่ากับ ($T_{w,ave}$)

$$\begin{aligned} T_{w,ave} &= \frac{T_{w,o} + T_{w,i}}{2} \\ &= \frac{10 + 28}{2} \\ &= 19 \quad ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

จากอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำที่ได้นำไปเปิดตารางภาคผนวกที่ 1.2 ได้คุณสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

$$\begin{aligned} \rho &= 1000.608 \quad \text{kg/m}^3 \\ V &= 1.0451 \times 10^{-6} \quad \text{m}^3/\text{s} \\ k &= 0.59475 \quad \text{W/m}^\circ\text{C} \\ Cp &= 4.1836 \quad \text{kJ/kg}^\circ\text{C} \\ Pr &= 7.349 \end{aligned}$$

คำนวณหาอัตราการไหลของน้ำ (m_w) จะได้จากสูตร

$$\begin{aligned} Q &= \dot{m}_w c_p (T_{w,i} - T_{w,o}) \\ \therefore \dot{m}_w &= \frac{Q}{c_p (T_{w,i} - T_{w,o})} \\ &= \frac{3}{4.1836 \times (28 - 10)} \\ &= 0.03983 \quad \text{kg/s} \end{aligned}$$

คำนวณหาความเร็วของน้ำในชุดทดสอบ (V)

$$\dot{m}_w = \rho A V \quad \therefore V = \frac{\dot{m}_w}{\rho A}$$

$$V = \frac{0.03983}{1000.608 \times \left[\frac{\pi}{4} (7.75 \times 10^{-3})^2 \right]}$$

$$= 0.84399 \quad \text{m/s}$$

คำนวณหาค่าเรย์โนลด์ นัมเบอร์ (Re_i) ภายในชุดทดสอบ

จากสูตร

$$Re_i = \frac{VD}{\nu}$$

$$= \frac{0.84399 \times (7.75 \times 10^{-3})}{(1.0451 \times 10^{-6})}$$

$$= 6258.71524$$

คำนวณหาค่าเรย์โนลด์ นัมเบอร์ภายนอกชุดทดสอบ (Re_o)

จากสูตร

$$Re_o = \frac{VD}{\nu}$$

$$= \frac{5 \times 0.3}{(17.72216 \times 10^{-6})}$$

$$= 84639.7956$$

คำนวณหาค่านัสเซิล นัมเบอร์ (Nu) ภายในชุดทดสอบ

จากสูตร

$$\frac{Nu_{\text{curve tube}}}{Nu_{\text{straight tube}}} = F\left(\frac{r_i}{R}\right)$$

$$Nu_{\text{straight tube}} = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}$$

$$F\left(\frac{r_i}{R}\right) = 1 + 3.5 \left(\frac{r_i}{R}\right)$$

$$\therefore Nu_{\text{straight tube}} = 0.023 \times (6258.71524)^{0.8} \times (7.349)^{0.4}$$

$$= 55.64258$$

$$F\left(\frac{r_i}{R}\right) = 1 + 3.5 \left(\frac{3.875}{190}\right)$$

$$= 1.07138$$

$$\begin{aligned}\therefore Nu_{\text{curve tube},i} &= 55.64258 \times 1.07138 \\ &= 59.61444\end{aligned}$$

คำนวณหาค่านัสเซิลส์ นัมเบอร์ (Nu_i) ภายนอกชุดทดสอบ

จากสูตร

$$\begin{aligned}Nu_o &= (0.4 Re^{0.5} + 0.06 Re^{2/3}) Pr^{0.4} \\ &= ((0.4(84639.7956)^{0.5}) + (0.06 \times (84639.7965)^{2/3})) \times (0.70357)^{0.4} \\ &= 201.59468\end{aligned}$$

คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h_i) ภายในชุดทดสอบ

จากสูตร

$$\begin{aligned}Nu_i &= \frac{h_i D_1}{k} & \therefore h_i &= \frac{Nu_i k}{D_1} \\ \therefore h_i &= \frac{59.61444 \times 0.59475}{7.75 \times 10^{-3}} \\ &= 4574.92751 \quad W / m^2 \text{ } ^\circ C\end{aligned}$$

คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h_o) ภายนอกชุดทดสอบ

จากสูตร

$$\begin{aligned}Nu_o &= \frac{h_o D_2}{k} & \therefore h_o &= \frac{Nu_o k}{D_2} \\ \therefore h_o &= \frac{(201.59468) \times (0.02776)}{(9.525 \times 10^{-3})} \\ &= 587.53473 \quad W / m^2 \text{ } ^\circ C\end{aligned}$$

คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U)

จากสูตร

$$\begin{aligned}\frac{1}{U} &= \frac{1}{h_o} \left(\frac{A_o}{\eta_f A_f + A_b} \right) + \frac{D_1 \ln \left(\frac{D_2}{D_1} \right)}{2k} + \frac{1}{h_i} \left(\frac{D_2}{D_1} \right) \\ &= \frac{1}{587.53473} + \frac{(7.75 \times 10^{-3}) \ln \left(\frac{9.525}{7.75} \right)}{2 \times 382.5} + \frac{1}{4574.92751} \left(\frac{9.525}{7.75} \right) \\ \therefore U &= 506.90366 \quad W / m^2 \text{ } ^\circ C\end{aligned}$$

คำนวณหาค่าอุณหภูมิของน้ำที่ทางออก ($T_{w,o}$)

จากสูตร

$$Q = UA \left(\frac{(T_{a,o} - T_{w,i}) - (T_{a,i} - T_{w,o})}{\ln \left(\frac{(T_{a,o} - T_{w,i})}{(T_{a,i} - T_{w,o})} \right)} \right)$$

$$3000 = 506.90366 \times 0.21528 \times \left(\frac{(43.91 - 10) - (50 - T_{w,o})}{\ln \left(\frac{(43.91 - 10)}{(50 - T_{w,o})} \right)} \right)$$

$$T_{w,o} = 28 \quad ^\circ\text{C}$$

จากค่าอุณหภูมิของน้ำที่ทางออก ($T_{w,o}$) ที่ได้จากการคำนวณมาเปรียบเทียบกับค่าที่สมมุติในตอนแรกพบว่ามีความเท่ากัน

ดังนั้นสรุปว่าได้ค่าอุณหภูมิต่าง ๆ ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{อุณหภูมิอากาศเข้า } (T_{a,i}) &= 50 \text{ }^\circ\text{C} \\ \text{อุณหภูมิอากาศออก } (T_{a,o}) &= 43.91 \text{ }^\circ\text{C} \\ \text{อุณหภูมิน้ำเข้า } (T_{w,i}) &= 10 \text{ }^\circ\text{C} \\ \text{อุณหภูมิน้ำออก } (T_{w,o}) &= 28 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$

ระบบการไหลของน้ำในชุดทดสอบ

1. คำนวณหาค่าการสูญเสียหลัก (Major losses)

กำหนดข้อมูลเบื้องต้น

อัตราการไหลของน้ำในระบบ ($\dot{m}_w$)	= 0.3983	kg/s
ความยาวของท่อ PVC	= 4	m
ระดับความต่างของปากทางดูดกับทางส่ง (h)	= 4	m
เส้นผ่านศูนย์กลางกลางท่อ PVC	= 25.4×10^{-3}	m
จำนวนรอบของขดกันหอย (n)	= 6	รอบ
ระยะห่างระหว่างท่อ (b)	= 30×10^{-3}	m
รัศมีภายในท่อทดสอบ (r_i)	= 3.875×10^{-3}	m
ความเร็วของน้ำในท่อทดสอบ	= 0.48399	m/s

จากตารางภาคผนวกที่ 1.1 ได้คุณสมบัติของน้ำที่อุณหภูมิเฉลี่ย 17.5°C ดังนี้

$$C_p = 4.18585 \quad \text{kJ/kg}^{\circ}\text{C}$$

$$\rho = 1000.718 \quad \text{kg/m}^3$$

$$\nu = 1.093975 \times 10^{-6} \quad \text{m}^2/\text{s}$$

$$k = 0.59193 \quad \text{W/m}^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Pr} = 7.76025$$

$$\text{ความยาวขาท่อ PVC} = 4 \quad \text{m}$$

$$\text{เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ} = 25.4 \times 10^{-3} \quad \text{m}$$

$$\text{ระดับความต่างของปากทางดูดกับทางส่ง (h)} = 2 \quad \text{m}$$

คำนวณหาความเร็ว (V) ของน้ำในท่อ PVC

จากสูตร

$$\begin{aligned} \dot{m}_{w,PVC} &= \rho A V \\ \therefore V &= \frac{\dot{m}_{w,PVC}}{\rho A} \\ &= \frac{0.4623}{1000.718 \times \left(\frac{\pi}{4} (2.54 \times 10^{-3})^2 \right)} \\ &= 0.94111 \quad \text{m/s} \end{aligned}$$

คำนวณหาค่าเรย์โนลด์ นัมเบอร์ (Re)

$$\begin{aligned} Re &= \frac{VD}{\nu} \\ &= \frac{0.94111 \times (25.4 \times 10^{-3})}{(1.093975 \times 10^{-6})} \\ &= 21850.86342 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\therefore \Delta P &= f \frac{L}{D} \rho \frac{V^2}{2} \\ f &= \frac{64}{Re} \\ &= \frac{64}{21850 \cdot 86342} \\ &= 0.00293\end{aligned}$$

คำนวณหาการสูญเสียความดันที่เกิดในท่อ PVC ตามความยาวของท่อทั้งหมด (ΔP_1) จากสูตรการหาการสูญเสียความดันข้างต้นได้

$$\begin{aligned}\therefore \Delta P_1 &= 0.00293 \left(\frac{4}{(25.4 \times 10^{-3})} \right) \times 1000.718 \times \left(\frac{(0.94111)^2}{2} \right) \\ &= 204.48261 \quad Pa\end{aligned}$$

2. คำนวณหาการสูญเสียรอง (Minor losses)

ระบบท่อน้ำประกอบด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนี้คือ

Sudden contraction		20
Sudden contraction		14
Gate valae	2 ตัว	330
Check valve clearway swing		50
90° Standard elbow	3 ตัว	30

การคำนวณหาการสูญเสียที่เกิดจากข้อต่อต่าง ๆ ของท่อ (ΔP_2)

$$\begin{aligned}\Delta P_2 &= 0.00293 [20 + 14 + (13 \times 2) + 50 + (30 \times 3)] \times 1000.718 \left(\frac{(0.9411)^2}{2} \right) \\ &= 259.69291 \quad Pa\end{aligned}$$

การคำนวณการสูญเสียความดันที่เกิดจากข้อต่อที่ทางออกจากชุดทดสอบ (Sudden enlargement) (ΔP_c) ได้จากสูตร

โดยที่

$$\Delta P_c = \rho \left(\frac{V^2 - V_0^2}{2} \right)$$

$$V_o = 0.94111 \quad m/s$$

$$V = \frac{\dot{m}_w}{\rho A}$$

$$= \frac{0.4623}{(1000.718) \times \left(\frac{\pi}{4} (7.75 \times 10^{-3})^2 \right)}$$

$$= 9.79307 \quad m/s$$

$$\therefore \Delta P_c = (1000.718) \times \left(\frac{(9.79307)^2 - (0.94111)^2}{2} \right)$$

$$= 47543.37765 \quad Pa$$

หาค่าการสูญเสียที่เกิดจากปลายท่อที่ทางออกของท่อ PVC ลงสู่ถังพักน้ำ (ΔP_3)
จากสูตร

$$\Delta P_3 = \rho \left(\frac{V^2 - V_o^2}{2} \right)$$

$$= 1000.718 \times \left(\frac{(0.9411)^2 - 0}{2} \right)$$

$$= 443.16197 \quad Pa$$

คำนวณหาการสูญเสียในขณะไหลผ่านชุดท่อทดสอบ (ΔP_H)

$$f_c = \frac{0.63(n_2^{0.7} - n_1^{0.7})^2}{Re^{0.6} \left(\frac{b}{a} \right)^{0.3}}$$

$$= \frac{0.63((6)^{0.7} - 0)^2}{(21850.86342)^{0.6} \times \left(\frac{(19.525 \times 10^{-3})}{(4.7625 \times 10^{-3})} \right)^{0.3}}$$

$$= 0.003602$$

$$\therefore \Delta P_H = 0.003602 \times \left(\frac{1}{(7.75 \times 10^{-3})} \right) \times 1000.718 \times \left(\frac{(0.97949)^2}{2} \right)$$

$$= 223.10971 \quad Pa$$

ท่อทดสอบมีจำนวน 10 ชั้น ดังนั้น (ΔP_H) มีค่าดังนี้

$$\Delta P_H = 223.10971 \times 10$$

$$= 2231.0971 \quad Pa$$

คำนวณหาการสูญเสียความดันที่เกิดจากความต่างระดับ (ΔP_h)
โดยที่

$$\begin{aligned}\Delta P_h &= \rho g h \\ &= 1000.718 \times 9.81 \times 4 \\ &= 39268.17432 \quad Pa\end{aligned}$$

ดังนั้นจะได้ค่าการสูญเสียความดันทั้งหมด (ΔP_{total}) มีค่าดังนี้

$$\begin{aligned}\Delta P_{total} &= \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + \Delta P_c + \Delta P_H + \Delta P_h \\ &= 204.48261 + 259.69291 + 47543.37765 \\ &\quad + 443.16197 + 2231.09711 + 39268.17432 \\ &= 89949.98657 \quad Pa\end{aligned}$$

ดังนั้นจะหาขนาดของปั๊มได้
จากสูตร

$$\begin{aligned}Pumping \text{ power} &= \frac{\Delta P \dot{Q}}{\eta_p} \\ \eta_p &= 0.7 \\ \therefore Pumping \text{ power} &= \frac{89949.98657 \times 0.4623}{0.7 \times 1000.718} \\ &= 59.36292 \quad Watt\end{aligned}$$

ดังนั้นได้ขนาดของปั๊มน้ำเท่ากับ 59.36292 วัตต์

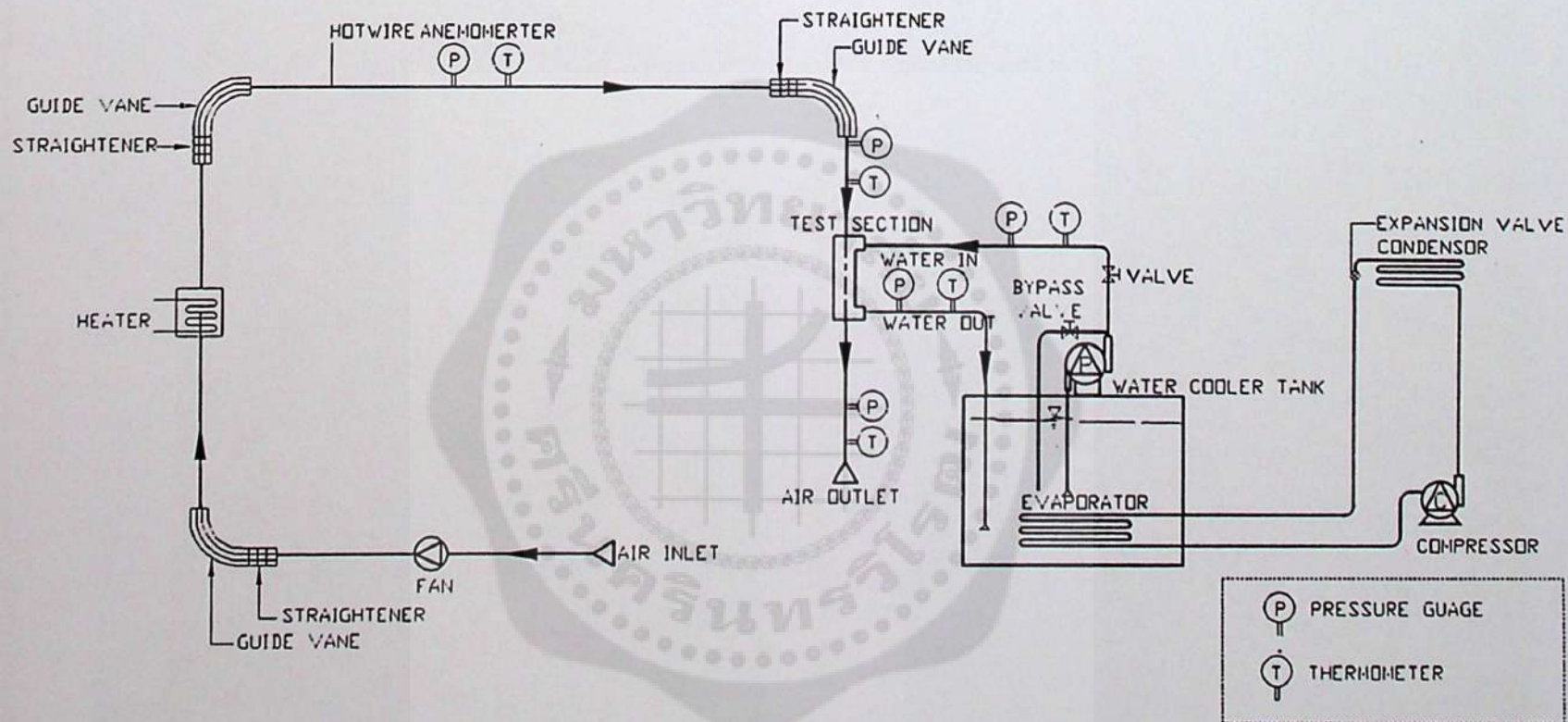
บทที่ 4

วิธีการทดลองและผลการทดลอง

ส่วนประกอบของชุดทดลอง

ชุดเครื่องทำความเย็น (Air conditioning unit)
อุโมงค์ลมความยาว 12 เมตร
ขดคอยล์ทดสอบ (Test section) แบบขดก้นหอย (Spiral coil)
ถังน้ำเย็น (Water cooler tank)
สายเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple wire)
อุปกรณ์วัดความดัน (Pressure gauge)
เครื่องมือวัดความเร็วลม และ อุณหภูมิอากาศ (Hot wire anemometer)
มาตรการไหลของน้ำ (Rota meter)
ปั๊มน้ำขนาด 0.5 แรงม้า (Water pump)
ชุดควบคุมฮีตเตอร์ (Heater control)
สวิตช์เลือกอ่านอุณหภูมิ (Selector switch)
เครื่องวัดอุณหภูมิ (Temperature measurement)
ชุดควบคุมอุณหภูมิน้ำ (Water temperature control)
พัดลม (Blower)
ตู้ควบคุมระบบไฟ (Control switch)
มอเตอร์ 3 เฟส (3 Phase meter)

รูปที่ 4.1 แสดงโครงสร้างอุปกรณ์ที่ใช้การทดลอง





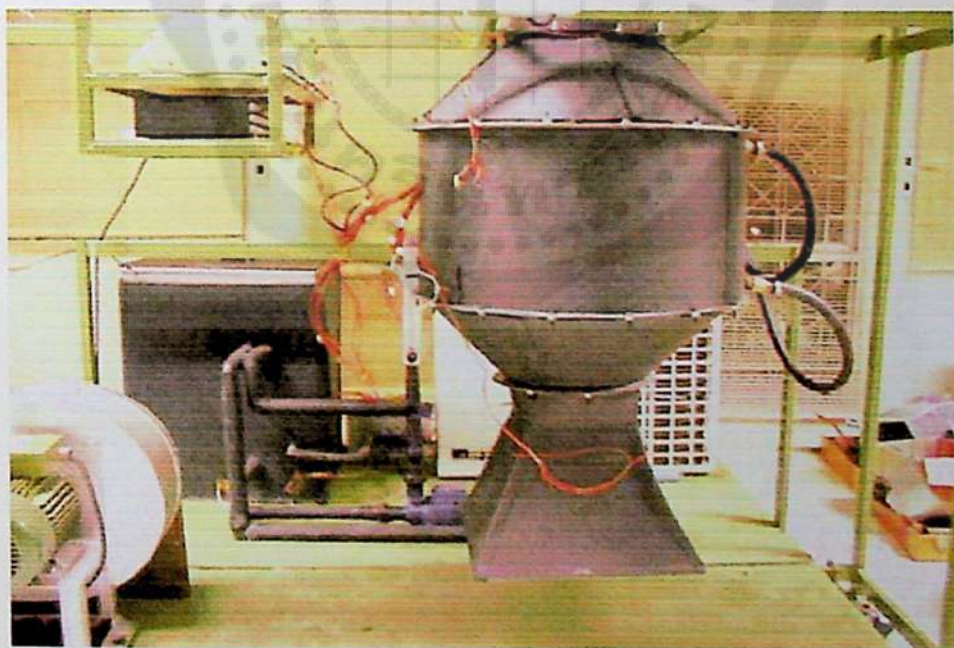
รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะของชุดทดสอบแบบท่อขดกันหอย



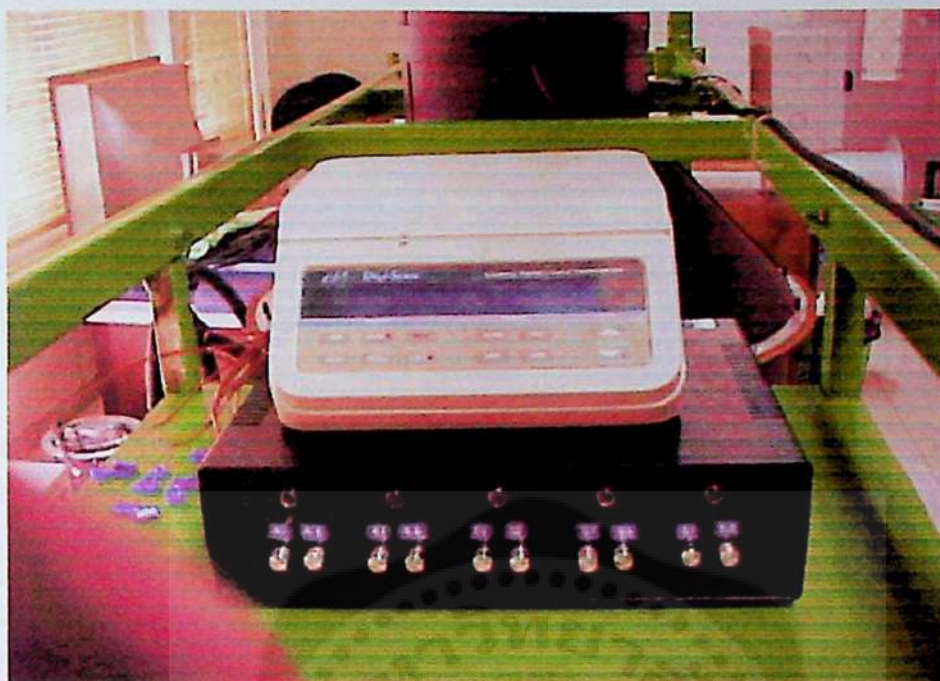
รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะของชุดทดสอบ (Test channel) ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดกันหอย



รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะของชุดควบคุม



รูปที่ 4.5 แสดงลักษณะของชุดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อขดกันหอย และ ชุดพัลลม



รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะของเครื่องวัดอุณหภูมิและ Selector switch



รูปที่ 4.7 แสดงลักษณะของชุดวัดอัตราการไหลของน้ำ

วิธีการทดลอง

การทดลองโดยการควบคุมความเร็วของอากาศให้คงที่ ที่ 3 m/s

1. กดปุ่ม Start compressor ของชุด Cooler water tank เพื่อให้ชุดทำความเย็นของน้ำทำงาน จากนั้นก็กดปุ่ม Start ชุด Water pump เพื่อให้น้ำหมุนวนในท่อทดสอบ และ สตาร์ทชุดใบพัดกวนน้ำเพื่อให้มีอุณหภูมิกระจายทั่วถึงกันโดยรอให้น้ำมีอุณหภูมิเริ่มต้นในถังที่ 12 °C และปรับอัตราการไหลของน้ำ 3 GPM

2. ตั้งค่าของเทอร์โมสตัทของชุด Air heater ที่อุณหภูมิเริ่มต้น 70 °C โดยชุด Magnetic coil จะทำงานโดยอัตโนมัติโดยไม่ต้อง On หรือ Off ปุ่ม Control

3. Start blower เป่าอากาศโดยการปรับควบคุมอากาศที่เข้า Blower แล้วใช้เครื่องวัดความเร็วลมให้ได้ 3 m/s ทำการวัดอุณหภูมิห้อง และ ความชื้นของอากาศที่ทาง เข้า-ออก ของท่อลม(Test channel) ทำการวัดอุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้า และ ออกจากชุดทดสอบอย่างละ 3 จุด

4. จากนั้นทำการวัดอุณหภูมิของน้ำที่ทางเข้า และทางออก ของชุดทดสอบในแต่ละจุด (มี 2 จุด) จากนั้นวัดอุณหภูมิของน้ำในท่อทดสอบ (Test section) ในแต่ละจุดจนครบซึ่งการวัดอุณหภูมิในชุดทดสอบนี้จะวัดด้วยท่อละ 3 จุด คือ วัดที่อุณหภูมิที่ผิวด้านนอกของท่อ วัดอุณหภูมิที่ด้านในตรงกลางท่อได้ทำการเจาะท่อแล้วใส่ น้ำที่ผิวท่อด้านใน หรือเรียกจุดวัดทั้ง 3 จุดสั้น ๆ ว่า ผิวนอก กลางท่อ และผิวใน ดังแสดงในตารางภาคผนวกที่ 2

5. เมื่อทำการวัดอุณหภูมิในท่อทดสอบเสร็จแล้วก็ปรับอุณหภูมิใน Water tank ให้เป็น 15 °C และ วัดอุณหภูมิในแต่ละจุดตามข้อ 4 จนครบทุกจุด โดยที่ปรับให้อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้า อัตราการไหลของน้ำ และ ความเร็วลมในท่อคงที่ และบันทึกผลที่ได้ลงในตาราง

6. ทำการทดลองเหมือนกับข้อ 5 แต่ปรับอุณหภูมิใน Water tank เป็น 18 °C และวัดอุณหภูมิในแต่ละจุดตามข้อ 4. จนครบทุกจุด และบันทึกผลที่ได้ลงในตาราง

7. จากนั้นปรับอุณหภูมิของน้ำ ใน Water tank คงที่ ที่ 18 °C และ ความเร็วอากาศคงที่ ที่ 3 m/s โดยเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำเป็น 3, 3.5 และ 4 GPM ตามลำดับ และทำการวัดอุณหภูมิในท่อทดสอบ ในแต่ละจุดตามข้อ 4 จนครบทุกจุด และ บันทึกผลที่ได้ลงในตาราง

8. จากนั้นให้อัตราการไหลของน้ำคงที่ ที่ 3 GPM และให้อุณหภูมิน้ำยังคงที่ ที่ 18 °C แต่จะเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศทางเข้า โดยการควบคุมที่เทอร์โมสตัทของชุด Heater ที่ 50, 60 และ 70 °C ตามลำดับ และทำการวัดอุณหภูมิในท่อทดสอบ ในแต่ละจุดตามข้อ 4. จนครบทุกจุดบันทึกผลที่ได้ลงในตาราง

9. จากนั้นทำการทดลองโดยการเปลี่ยนแปลง ความเร็วของอากาศทางเข้า อุณหภูมิอากาศ ทางเข้า อุณหภูมิน้ำใน Water tank และ อัตราการไหลของน้ำในท่อทดสอบ โดยทำการทดลองซ้ำ จากข้อ 1-8 จนครบและบันทึกผลที่ได้ลงในตาราง

การใช้ชุดควบคุม

1. ค่อยสายไฟเข้า 3 Phase 380 V/50 Hz. โดยจะต้องมี Main breaker ที่มีกระแสไฟฟ้าอย่างน้อย 60 แอมแปร์
2. On main breaker 3 Phase ที่ตู้ Control เพื่อจ่ายไฟเข้าและระบบ Supply
3. กดปุ่ม Start comp. ของ Cooler water tank เพื่อให้ชุดทำน้ำเย็นทำงานและเมื่อได้อุณหภูมิที่ต้องการก็กดปุ่ม Stop เพื่อหยุดการทำงานของชุด Cooler water tank
4. กดปุ่ม Start ของชุดปั๊มน้ำเพื่อให้ น้ำไหลในท่อทดสอบ เมื่อต้องการหยุดก็กดปุ่ม Stop
5. ตั้งค่าเทอร์โมสแตทของชุด Air heater ตามที่ต้องการ โดยที่ชุด Magnetic coil จะทำงานโดยอัตโนมัติ
6. ตั้งค่าเทอร์โมสแตทของชุด Water cooler ที่เป็นตัวเลขดิจิทัล โดยเลือกที่ SP เพื่อเลือกค่าตามที่ต้องการวัดเมื่อ Sensor อ่านค่าที่ตั้งได้แล้วเครื่องจะตัดต่อเองโดยอัตโนมัติโดยไม่ต้อง On หรือ Off

7. Off breaker main ทุกครั้งที่เลิกใช้งาน

การใช้งานเครื่องวัดอุณหภูมิแบบ 12 Channel ร่วมกับ Selector switch

1. ตรวจสอบความเรียบร้อยของเครื่องและปลั๊กไฟให้สมบูรณ์ เรียบร้อยและจะต้องใช้กระแสไฟ 220 V 50-60 Hz เป็น Power supply
2. ใช้สายเทอร์โมคัปเปิ้ลที่ต่อเข้ากับปลั๊กให้เรียบร้อย แล้วเสียบเข้าตัวเครื่องของชุด Scanning หรือเครื่องวัดอุณหภูมิ
3. ค่อยสายเทอร์โมคัปเปิ้ล จากชุดทดสอบเข้าชุด Selector switch โดยเลือกให้ตรงช่อง Main (ชุดด้านซ้ายบน) โดยแยกสายเข้า Line (สีน้ำเงินและ Neutron) แฉกกลางจนครบและตรงทั้ง 12 ช่อง โดยชุด Main จะต่อไปยังชุดที่ต้องการวัดในกล่องอยู่แล้ว
4. ค่อยสาย Line และ Neutron ที่จะไปใช้งาน ชุด A – E ตามจำนวนที่ต้องการวัดจากชุดของ Selector switch ไปยังจุดที่ต้องการวัดโดยด้านปลายสายของเทอร์โมคัปเปิ้ลจะต้องให้มัดแน่นหรือ บัดกรีปลายให้ติดกันโดยจะต้องไม่นำไปต่อรวมกันเพราะจะทำให้ช้อดกันแล้วจะไม่สามารถวัดค่าได้จะต้องแยกเป็นชุด ๆ ตั้งแต่ 1-12 ชุด

5. เลือกอ่านค่าจาก Selector switch A –E โดยกดทีละจุดเช่น A1 A2 จะทำให้ไฟสัญญาณสีแดงโชว์

การใช้เครื่อง Thermocouple scanning หรือเครื่องวัดอุณหภูมิ

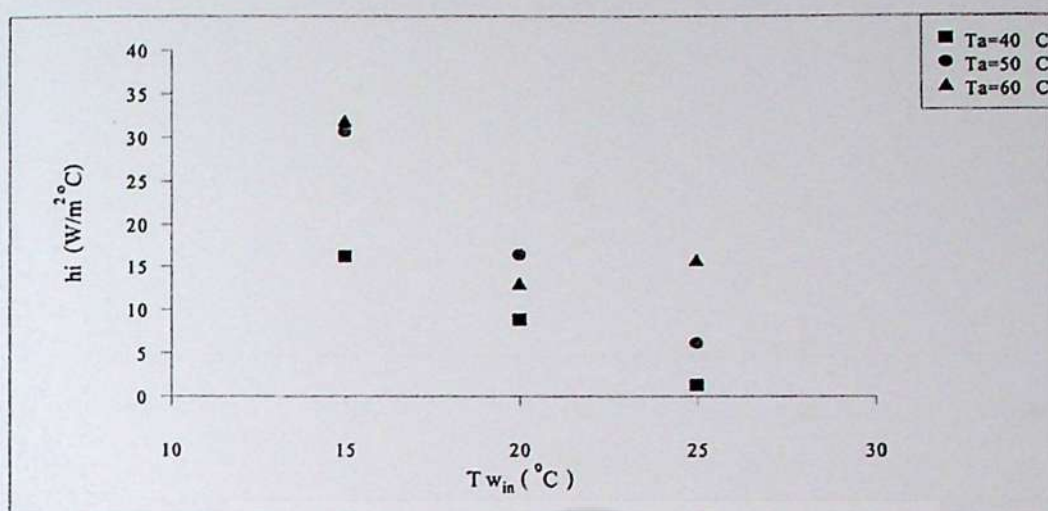
1. เปิดสวิทช์ด้านหลังแล้วเครื่องจะทำงานรอบประมาณ 30 วินาที เครื่องจะเริ่มสแกนจาก 1 - 12 อ่านอุณหภูมิที่ตั้งไว้เป็นองศาเซลเซียส
2. การ Calibration ให้กด Setup ไปเรื่อย ๆ จนไปถึง Cal. Emp. และรอให้กระพริบแล้วกด Store เครื่องจะกระพริบเป็นอุณหภูมิ แล้วปรับลูกศรขึ้น ลง ตามที่ต้องการโดยเทียบจากอุณหภูมิมาตรฐานพอได้ค่าแล้วให้กด Store เครื่องจะเลื่อนไปช่องถัดไปแล้วก็จะทำตามขั้นตอนที่กล่าวมานี้ไปจนครบทั้ง 12 ช่อง
3. การอ่านเวลาเครื่องกระพริบ Tc open ให้กดที่ Alarm เครื่องจะกลับมาปกติแล้วตรวจสอบว่ามีอะไรผิดปกติหรือไม่ เช่นถ้าสายหลุดทำการต่อแล้วเช็คใหม่
4. ถ้าเครื่องปกติแล้วเครื่องจะสแกนจาก 1-12 วนรอบไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะมีการเปลี่ยนช่องวัดโดยกดเลือกจาก Selector switch

ข้อสังเกตและข้อควรระวังในการทดสอบ

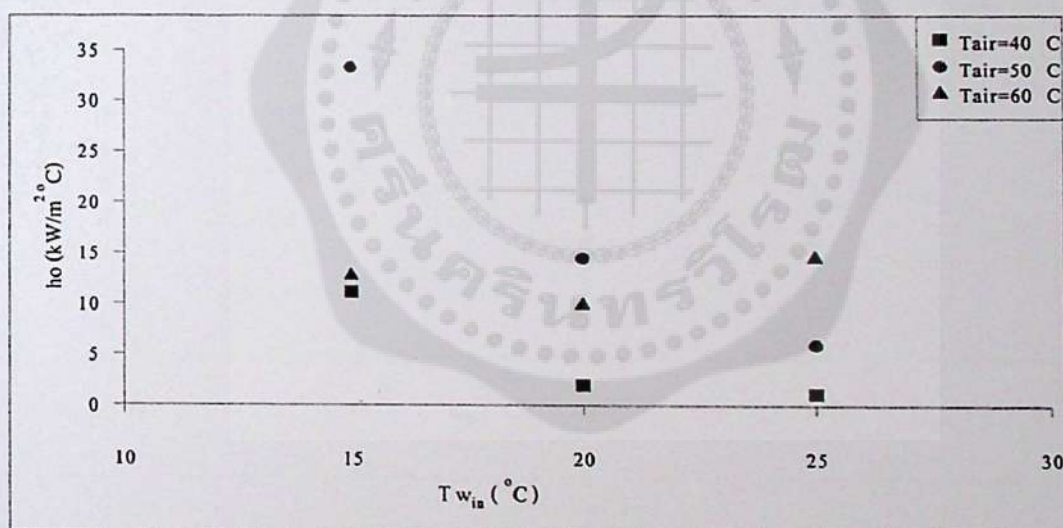
1. ก่อนทำการทดลองจะต้องตรวจสอบวาล์วน้ำที่ท่อทางเข้าและทางออกจากชุดทดสอบให้เรียบร้อย โดยให้อยู่ในลักษณะปิดก่อน
2. ในขณะที่ทำการทดลองจะต้องเปิดมอเตอร์กวนน้ำในถังเพื่อกวนน้ำในถังให้มีความเย็นได้ทั่วถึงกันทั้งหมด
3. ก่อนเปิดเครื่องทดสอบจะต้องตรวจสอบเช็คระดับน้ำในถังให้อยู่ในระดับ 3 ใน 4 ของความสูงของถัง
4. ในช่วงที่ต้องทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำในถังจะต้องเปิดชุดเครื่องทำความเย็นและปิดชุดทำความร้อนของน้ำไม่ให้ทำงานด้วยและต้องเปิดใบพัดกวนน้ำด้วยเพื่อให้ได้อุณหภูมิน้ำตามที่ต้องการ
5. ในระหว่างทำการทดลองจะต้องระวังไม่ให้มีวัสดุอย่างอื่นวางอยู่ใกล้กับปากทางดูดของพัดลมเพราะอาจจะถูกดูดเข้าไปข้างในและอาจเกิดอันตรายได้

การวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลองตามเงื่อนไขต่าง ๆ ได้นำข้อมูลจากการทดลองมาเปรียบเทียบกับกันได้กราฟลักษณะต่าง ๆ ดังรูปต่อไปนี้

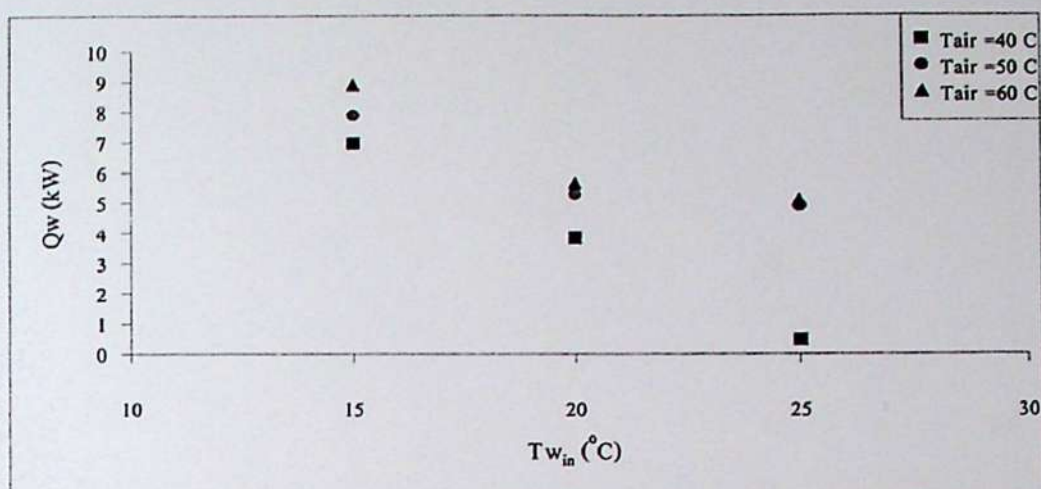


รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำที่ทางเข้า ($T_{w_{in}}$) กับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายใน (h_i) ที่ความเร็วอากาศ 4 m/s และอัตราการไหลของน้ำ 3.5 GPM

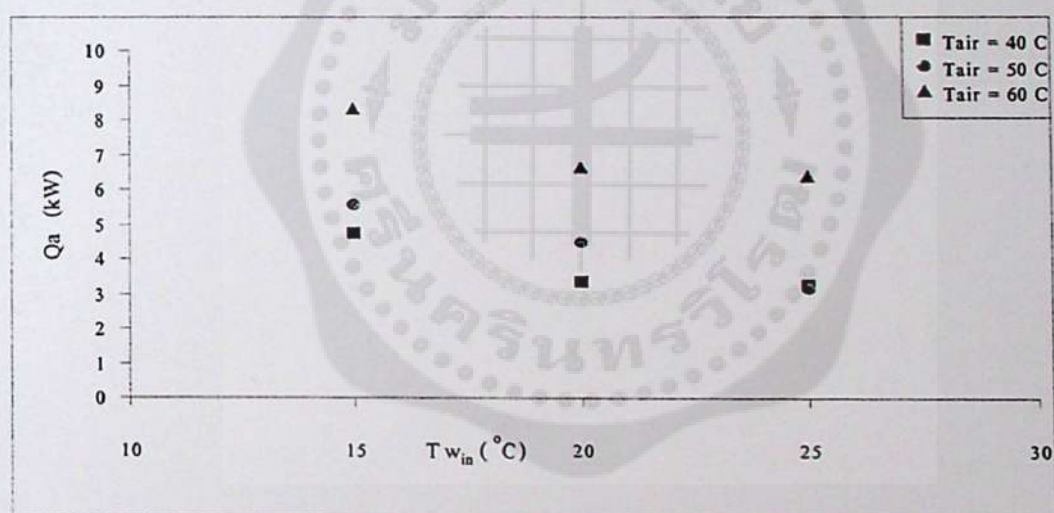


รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำที่ทางเข้า ($T_{w_{in}}$) กับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนนอก (h_o) ที่ความเร็วอากาศ 4 m/s และอัตราการไหลของน้ำ 3.5 GPM

จากรูปที่ 4.8 และ 4.9 จะพบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในและภายนอกจะมีค่าสูงขึ้น ที่อุณหภูมิน้ำเข้าเดียวกันและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นที่อุณหภูมิอากาศสูง แต่เมื่ออุณหภูมิน้ำเข้าสูงขึ้นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะต่ำลงเนื่องจากผลต่างของอุณหภูมิน้ำที่ได้มีค่าลดลงทำให้การถ่ายเทความร้อนลดลงด้วย

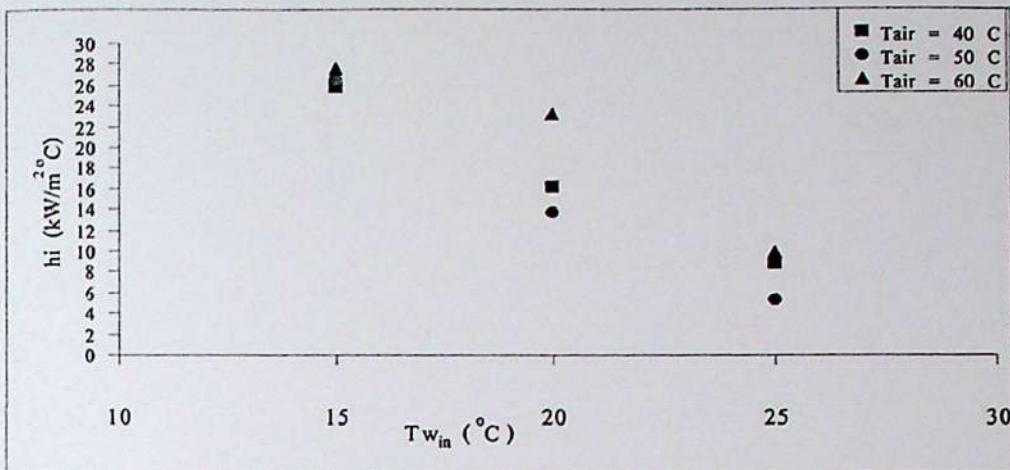


รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำที่ทางเข้า ($T_{w,in}$) กับค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของน้ำ (Q_w) ที่ความเร็วอากาศ 4 m/s และอัตราการไหลของน้ำ 3.5 GPM

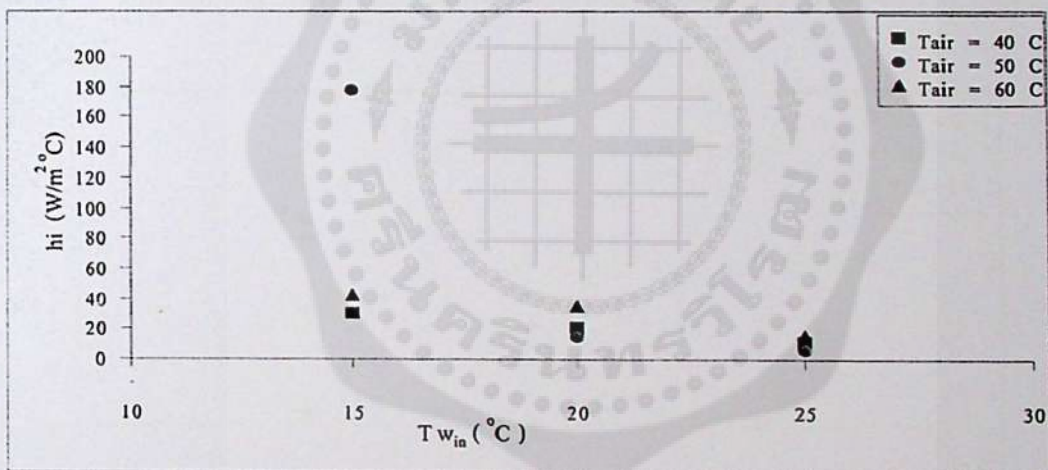


รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำที่ทางเข้า ($T_{w,in}$) กับค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของอากาศ (Q_a) ที่ความเร็วอากาศ 4 m/s และอัตราการไหลของน้ำ 3.5 GPM

จากรูปที่ 4.10 และ 4.11 เป็นการเปรียบเทียบให้เห็นว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของน้ำกับอากาศจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิอากาศเข้าสูงขึ้นอัตราการถ่ายเทความร้อนของน้ำและอากาศจะมีค่าสูงขึ้นด้วย แต่เมื่ออุณหภูมิน้ำเข้าสูงขึ้นอัตราการถ่ายเทความร้อนของน้ำและอากาศจะมีค่าต่ำลง ดังจะเห็นได้จากกราฟ

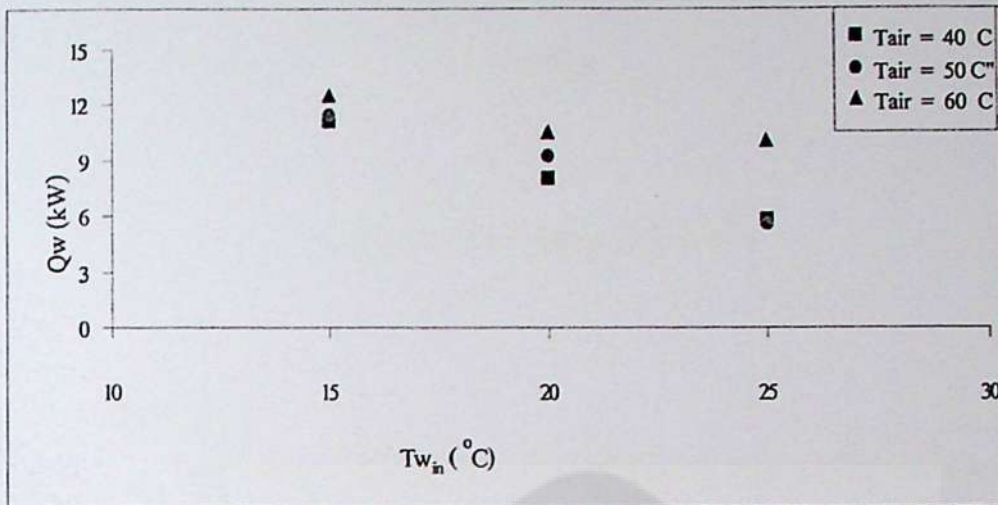


รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำที่ทางเข้า ($T_{w,in}$) กับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายนอก (h_o) ที่ความเร็วอากาศ 4 m/s และอัตราการไหลของน้ำ 4 GPM

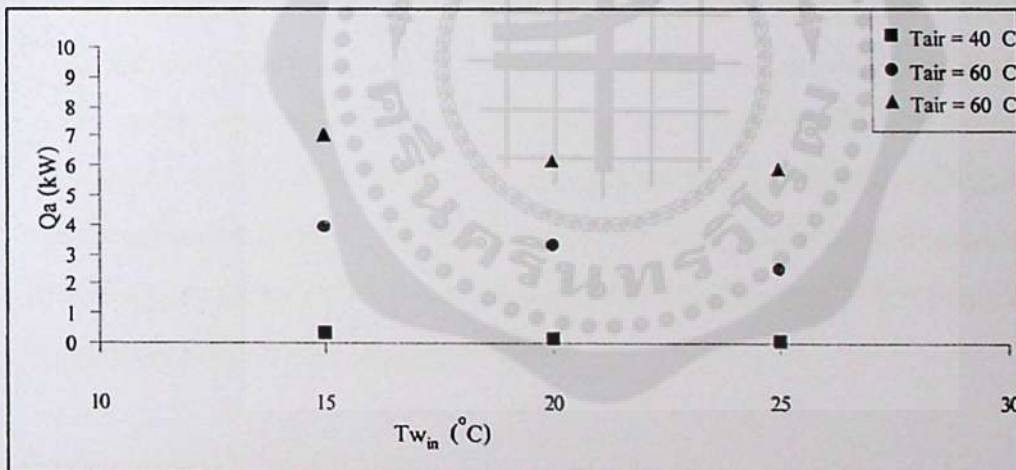


รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำที่ทางเข้า ($T_{w,in}$) กับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายใน (h_i) ที่ความเร็วอากาศ 4 m/s และอัตราการไหลของน้ำ 4 GPM

จากรูปที่ 4.12 และ 4.13 เป็นการเปรียบเทียบกันระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในและภายนอกกับอุณหภูมิน้ำเข้า ซึ่งจะพบว่าเมื่ออัตราการไหลของน้ำเพิ่มขึ้น สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะลดลง และที่อุณหภูมิของน้ำเพิ่มขึ้นก็จะทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดลงด้วย แต่เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิของอากาศให้สูงขึ้นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำที่ทางเข้า ($T_{w_{in}}$) กับค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของน้ำ (Q_w) ที่ความเร็วอากาศ 4 m/s และอัตราการไหลของน้ำ 4 GPM



รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำที่ทางเข้า ($T_{w_{in}}$) กับค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของอากาศ (Q_a) ที่ความเร็วอากาศ 4 m/s และอัตราการไหลของน้ำ 4 GPM

จากรูปที่ 4.14 และ 4.15 เป็นการเปรียบเทียบกันระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนของน้ำและอากาศ กับ อุณหภูมิน้ำเข้า ซึ่งจะพบว่าเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิของอากาศให้สูงขึ้นอัตราการถ่ายเทความร้อนของน้ำและอากาศจะสูงขึ้นด้วย ในขณะที่เมื่ออุณหภูมิน้ำเข้าสูงขึ้นอัตราการถ่ายเทความร้อนของน้ำและอากาศกลับมีค่าลดลง

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดลอง

ในการทดลองครั้งนี้จะเห็นว่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในและภายนอกท่อ เมื่ออัตราการไหลของน้ำเพิ่มขึ้นจะทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นด้วย ในขณะที่อุณหภูมิน้ำเข้าเพิ่มขึ้น และ อุณหภูมิของอากาศที่เข้าชุดทดสอบเพิ่มขึ้นด้วยทำให้มีการเปลี่ยนแปลงการถ่ายเทความร้อนของน้ำเย็นที่อยู่ภายในท่อทดสอบกับอากาศร้อนที่ไหลอยู่ด้านนอกมีการถ่ายเทความร้อนซึ่งกันและกัน ซึ่งจะเห็นได้จากอุณหภูมิของน้ำที่ทางออกจะมีค่าสูงขึ้น และ อุณหภูมิของอากาศทางออกจะมีค่าลดลง ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับตัวอื่น ๆ อีกด้วย เช่น เมื่ออัตราการไหลของน้ำเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายในและภายนอกเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ความเร็วของอากาศที่เข้าชุดทดสอบจะมีผลทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเปลี่ยนแปลง โดยที่เมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนของอากาศมีค่าลดลงทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของน้ำที่ท่อทดสอบและอุณหภูมิของอากาศทางเข้าชุดทดสอบด้วยซึ่งในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของน้ำและอากาศ จะมีค่ามากหรือน้อยก็จะขึ้นอยู่กับค่าความแตกต่างของอุณหภูมิที่ได้ด้วย

ข้อเสนอแนะสำหรับงานในอนาคต

1. ถ้ามีการสร้างชุดทดสอบไปใช้ในงานจริงไม่ควรจะติดตั้งครีบท่อทดสอบมากนักเพราะว่าในงานจริง ๆ นั้นปล่องควันนั้นจะมีเขม่าควันออกมาด้วย ซึ่งเขม่าควันดังกล่าวนี้จะไปเกาะที่ผิวท่อทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ไม่ดีเท่าที่ควร
2. ท่อทดสอบที่ใช้จะต้องมีการหุ้มฉนวนกันความร้อนอย่างดีเพื่อไม่ให้เกิดการถ่ายเทความร้อนออกจากชุดทดสอบได้
3. เครื่องมือที่ใช้วัดอุณหภูมิต่าง ๆ ของชุดทดสอบควรจะมีการเปรียบเทียบก่อนการทดสอบเพื่อที่จะได้ค่าที่ถูกต้องแม่นยำ

4. ระบบทำน้ำเย็นที่ใช้ควรจะใช้น้ำที่ผ่านการ Treat มาก่อนไม่ควรใช้ประปาหรือน้ำจากแหล่งน้ำตามธรรมชาติเพราะจะทำให้เกิดตะกอนเกาะที่ผนังท่อด้านในซึ่งจะทำให้การแลกเปลี่ยนความร้อนไม่ดีเท่าที่ควร

5. พัดลมที่ใช้เป่าลมภายในท่อทดสอบควรเลือกขนาดของพัดลมให้พอเหมาะกับชุดทดสอบเพราะถ้าใหญ่หรือมีขนาดเล็กเกินไปจะทำให้ชุดทดลองพังเสียหายหรือกำลังลมอาจจะไม่เพียงพอกับที่ต้องการใช้ทำให้มีค่าความผิดพลาดกับผลการทดลองที่ได้ออกมาด้วย



บรรณานุกรม

1. รศ. สุวัฒน์ ศรีษะนิคย์. การถ่ายเทความร้อน. พิมพ์ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. พิมพ์ครั้งที่ 5, ปี 2538.
2. รศ. ดร. วิวัฒน์ คั่นทะพานิชกุล. อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในอุตสาหกรรม. พิมพ์ที่ บริษัท ส.เอเชีย เพรส (1996) จำกัด ฉบับปรับปรุงใหม่ (หน่วย SI) พิมพ์ครั้งแรก มกราคม พ.ศ. 2536.
3. ดร. พงษ์ธร จริญญากรณ์. อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับงานอุตสาหกรรม : กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์ เอ็มเอนด์จี, 2542.
4. รศ. ดร. วิวัฒน์ คั่นทะพานิชกุล. อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในงานอุตสาหกรรม : กรุงเทพมหานคร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2536.
5. M. Necati OZISIK. Heat transfer. A BASIC APPROACH MCGRAW-HILL INTERNATIONAL EDITION, 1965.
6. F. P. Incropera and P. David Dewitt. Introduction to Heat Transfer. JOHN WILEY and SONS THIRD EDITION Copyright, 1965, 1990, 1996 in Canada.
7. J.C Ho and N.E Wijcysundera. Applied Thermal Engineering. VOL.16. NO.10. Copyright, 1996. in Great Britain.
8. R. K. Shah and S. D. Joshi. Convective Heat Transfer In Curve Ducts. JOHN WILEY and SONS THIRD EDITION Copyright, 1965, 1990, 1996 in Canada.
9. S. Kakaç and H. Liu. Heat Exchangers Selection, Rating, and Thermal Design. CRC Press LLC 1998 in The United State of America.



ภาคผนวกที่ 1
ตารางข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

ตารางภาคผนวกที่ 1.1 แสดงคุณสมบัติของอากาศที่ความดันบรรยากาศที่อุณหภูมิต่าง ๆ

T	ρ	Cp	μ	ν	k	α	Pr
K	kg/m ³	kJ/kg K	kg/m s	m ² /s	W/m K	m ² /s x 10 ⁴	
100	3.6010	1.0266	0.6924x10 ⁻⁴	1.923	0.009246	0.02501	0.770
150	2.3675	1.0099	1.0283	4.343	0.013735	0.05745	0.753
200	1.7684	1.0061	1.3289	7.490	0.01809	0.10165	0.739
250	1.4128	1.0053	1.488	9.490	0.02227	0.13161	0.722
300	1.1774	1.0057	1.983	15.68	0.02624	0.22160	0.708
350	0.9980	1.0090	2.075	20.76	0.03003	0.2983	0.697
400	0.8826	1.0140	2.286	25.90	0.03365	0.3760	0.689
450	0.7833	1.0207	2.484	28.86	0.03707	0.4222	0.683
500	0.7048	1.0295	2.671	37.09	0.04038	0.5564	0.680
550	0.6423	1.0392	2.848	44.34	0.04360	0.6532	0.680
600	0.5879	1.0551	3.018	51.34	0.04659	0.7512	0.680
650	0.5430	1.0635	3.177	58.51	0.04953	0.8578	0.682
700	0.5030	1.0752	3.332	66.25	0.05230	0.9672	0.684
750	0.4709	1.0856	3.481	73.91	0.05509	1.0774	0.686
800	0.4405	1.0978	3.625	82.29	0.05779	1.1951	0.689
850	0.4149	1.1095	3.765	90.75	0.06028	1.3097	0.692
900	0.3925	1.1212	3.899	99.30	0.06279	1.4271	0.696
950	0.3716	1.1321	4.023	108.2	0.06525	1.5510	0.699
1000	0.3524	1.1417	4.152	117.8	0.06752	1.6779	0.702
1100	0.3204	1.1160	4.44	138.6	0.0732	1.969	0.704
1200	0.2947	1.1179	4.69	159.1	0.0782	2.251	0.707
1300	0.2707	1.1197	4.93	182.1	0.0837	2.583	0.705
1400	0.2515	1.1214	5.17	205.5	0.0891	2.920	0.705
1500	0.2355	1.1230	5.40	229.1	0.0946	3.262	0.705
1600	0.2211	1.1248	5.63	254.5	0.100	3.609	0.705
1700	0.2082	1.1267	5.85	280.5	0.105	3.977	0.705

ตารางภาคผนวกที่ 1.2 แสดงคุณสมบัติของน้ำที่ความดันบรรยากาศ

T °C	ρ kg/m ³	Cp kJ/kg	ν m ² /s x 10 ⁻⁶	k W/m K	α m ² /s x 10 ⁷	Pr
0	1002.28	4.2178	1.788x10 ⁻⁶	0.552	1.308	13.6
20	1000.52	4.1818	1.006	0.597	1.430	7.02
40	994.59	4.1784	0.685	0.628	1.512	4.32
60	985.46	4.1843	0.478	0.651	1.554	3.02
80	974.08	4.1964	0.364	0.668	1.636	2.22
100	960.63	4.2161	0.294	0.680	1.660	1.74
120	945.25	4.250	0.247	0.685	1.724	1.241
140	928.27	4.283	0.214	0.684	1.724	1.241
160	909.69	4.342	0.190	0.680	1.729	1.099
180	889.03	4.417	0.173	0.675	1.724	1.004
200	866.76	4.505	0.160	0.665	1.706	0.937
220	842.41	4.610	0.150	0.652	1.680	0.891
240	815.66	4.756	0.143	0.635	1.639	0.871
260	785.87	4.949	0.137	0.611	1.577	0.874
280	752.55	5.208	0.135	0.580	1.481	0.910
300	714.26	5.728	0.135	0.540	1.324	1.019

ตารางภาคผนวกที่ 1.3 แสดงค่าการนำความร้อนของวัสดุชนิดต่าง ๆ

Metal	Temperature K								
	200	300	400	500	600	800	1000	1200	1500
Aluminum									
Pure	237	237	240	236	231	218			
Duralumin	138	174	187	188					
Alloy 195,cast		168	174	180	185				
Copper									
Pure	413	401	393	386	379	366	352	399	
Commercial bronze	42	52	52	55					
Brass	74	111	134	143	146	150			
German silver		116	135	145	147				
Gold	323	317	311	304	298	284	270	255	
Iron									
Armco	81	73	66	59	53	42	32	29	31
Cast		51	44	39	36	27	23		
Carbon steel									
AISI 1010	64	59	54	49	39	31			
AISI 1042	52	50	48	45	37	29	26	30	
AISI 4130	43	42	41	40	37	31	27	31	
Stainless steel									
AISI 302		15	17	19	20	23	25		
AISI 304	13	15	17	18	20	23	25		
AISI 316		13	15	17	18	21	24		
AISI 410	25	25	26	27	27	29			
Lead	37	35	34	33	31				
Magnesium									
Pure	199	156	153	151	149	146			
Alloy A8			84						

ตารางภาคผนวกที่ 1.3 (ต่อ) แสดงค่าการนำความร้อนของวัสดุชนิดต่าง ๆ

Metal	Temperature K								
	200	300	400	500	600	800	1000	1200	1500
Inconel -X- 750	10.3	11.3	11.7	15.1	17.0	20.5	24.0	27.6	30.0
Nichrome		13	14	16	17	21			
Platinum	73	72	72	72	72	73	79	83	90
Silver	420	429	425	419	412	396	379	361	
Tantalum	58	58	58	59	59	59	60	61	62
Tin	73	67	62	60					
Titanium									
Pure	25	22	20	20	19	19	21	22	25
T-6A1-4V		5.8							
Tungsten	185	174	159	146	137	125	118	112	106
Zirconium									
Pure	25	23	22	21	21	21	23	26	29
Zircaloy-4	13.3	14.2	15.2	16.2	19.2	21.2	23.2		

ตารางภาคผนวกที่ 1.4 การเลือกขนาดท่อทองแดง

OD, mm	ID, mm		OD, mm	ID, mm	
	Type K	Type L		Type K	Type L
9.53	7.75	8.00	53.98	49.76	50.42
12.70	10.21	10.92	66.68	61.85	62.61
15.88	13.39	13.84	79.38	73.84	74.80
19.05	16.56	16.92	92.08	85.98	87.00
22.23	18.92	19.94	104.080	97.97	99.19
28.58	25.27	26.04	130.20	122.10	123.80
34.93	31.62	32.13	155.60	145.80	196.20
4.28	37.62	39.23	206.40	192.60	196.20
			257.20	240.00	244.50
			308.00	287.40	293.80



ภาคผนวกที่ 2
ตารางที่ได้จากการทดลอง

ตารางภาคผนวกที่ 2.1 แสดงผลการทดลองชุดทดสอบแบบขดก้นหอย (Spiral coil) แบบไหลสวนทาง ความเร็วของอากาศ 4 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 40 °C อัตราการไหลของน้ำ 3.5 GPM โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำทางเข้า

อุณหภูมิ น้ำ ในถัง (°C)	อุณหภูมิ น้ำที่ ทางออก (°C)	% ความชื้น ของ อากาศในท่อ		อุณหภูมิอากาศ ที่ทางออก (°C)				อุณหภูมิน้ำที่ชุดทดสอบในท่อด้านบน (°C)																	
		เข้า	ออก	1	2	3	เฉลี่ย	ท่อที่1						ท่อที่2						ท่อที่3					
								ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน
15	22.5	52.6	52.1	25.1	26.8	26.9	26.3	15.2	13.1	16.5	15.4	13.2	14.7	14.2	13.9	14.2	14.3	13.5	14.9	14.9	14.1	15.4	15.6	15.9	17.3
20	24.1	53.5	52.1	29.7	30.7	30.6	30.3	21.6	19.6	22.2	21.6	20.3	20.9	21.2	20.7	20.6	21.1	20.7	21.3	21.4	20.9	22.4	22.2	21.5	22.3
25	25.5	52.1	51.3	29.9	30.8	31.2	30.6	22.6	20.5	23.5	21.9	20.6	21.5	21.8	20.9	21.6	22.1	21.3	22.8	22.5	21.5	23.6	22.5	21.9	23.6

อุณหภูมิน้ำที่ชุดทดสอบในท่อด้านล่าง (°C)																				
ท่อที่1			ท่อที่2			ท่อที่3			ท่อที่4			ท่อที่5			ท่อที่6			ท่อที่7		
ผิวนอก	กลาง	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง	ผิวใน
16.8	12.4	16.2	16.5	12.4	13.4	15.5	14.1	17.4	13.9	16.1	19.9	18.5	14.2	19.3	17.9	14.6	19.7	21.9	19.8	23.5
21.1	19.7	22.9	22.3	20.3	21.3	21.1	21.1	23.1	24.2	23.4	25.6	24.4	23.7	25.3	26.9	24.1	19.7	27.2	24.6	28.2
23.5	20.5	24.3	25.5	22.5	24.6	23.9	21.5	25.7	27.2	22.9	26.6	27.5	23.5	28.9	27.9	25.8	23.3	28.9	25.8	30.2

ตารางภาคผนวกที่ 2.2 แสดงผลการทดลองชุดทดสอบแบบขดกันหอย (Spiral coil) แบบไหลสวนทาง ความเร็วของอากาศ 4 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 50 °C อัตราการไหลของน้ำ 3.5 GPM โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำทางเข้า

อุณหภูมิ น้ำ ในถัง (°C)	อุณหภูมิ น้ำ ทางออก (°C)	% ความชื้น ของอากาศ ในท่อ		อุณหภูมิอากาศ ที่ทางออก (°C)				อุณหภูมิน้ำที่ชุดทดสอบในท่อด้านบน (°C)																	
								ท่อที่1			ท่อที่2			ท่อที่3			ท่อที่4			ท่อที่5			ท่อที่6		
								ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน
15	23.5	53.1	52.4	31.7	34.2	34.4	33.4	13.9	12.3	16.4	14.5	12.5	13.8	13.2	12.5	13.4	13.5	13.4	14.2	16.2	14.6	15.3	15.7	15.3	17.1
20	25.7	52.1	48.5	36.2	37.8	36.1	36.7	22.1	21.1	23.6	22.2	20.8	21.8	21.6	21.4	21.4	21.3	21.6	21.8	21.9	21.9	22.6	23.1	22.6	24.2
25	30.3	51.2	46.5	39.5	40.2	42.5	40.7	24.5	22.5	26.6	25.7	22.8	25.6	26.2	23.1	25.4	25.5	22.2	24.6	26.7	23.5	25.7	29.8	25.8	30.2

อุณหภูมิน้ำที่ชุดทดสอบในท่อด้านล่าง (°C)																				
ท่อที่1			ท่อที่2			ท่อที่3			ท่อที่4			ท่อที่5			ท่อที่6			ท่อที่7		
ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน
15.3	12.9	17.4	19.9	14.3	15.9	17.8	16.4	20.7	25.4	18.6	24.5	22.2	21.3	23.3	26.5	29.6	24.2	23.6	23.2	29.3
22.3	20.7	23.7	24.8	21.6	22.4	24.6	22.9	24.4	27.7	26.9	27.5	28.2	26.3	27.2	32.1	28.3	34.1	33.1	29.1	33.2
25.4	23.5	28.7	29.5	25.2	28.6	30.1	25.5	29.8	31.2	28.9	32.2	32.5	29.9	32.1	35.5	30.2	35.4	36.8	30.5	35.9

ตารางภาคผนวกที่ 2.3 แสดงผลการทดลองชุดทดสอบแบบขดกันหอย (Spiral coil) แบบไหลสวนทาง ความเร็วของอากาศ 4 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 60 °C อัตราการไหลของน้ำ 3.5 GPM โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำทางเข้า

อุณหภูมิ น้ำ ในถัง (°C)	อุณหภูมิ น้ำ ทางออก (°C)	%ความชื้น ของอากาศ ในท่อ		อุณหภูมิอากาศ ที่ทางออก (°C)				อุณหภูมิน้ำที่ชุดทดสอบในท่อด้านบน (°C)																	
								ท่อที่1			ท่อที่2			ท่อที่3			ท่อที่4			ท่อที่5			ท่อที่6		
		เข้า	ออก	1	2	3	เฉลี่ย	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน
15	24.6	54.6	53.1	32.9	35.2	35.4	34.5	13.4	14.1	18.5	16.9	14.4	15.9	15.5	15.2	15.3	15.7	16.3	16.1	16.6	17.7	17.1	18.2	17.2	18.9
20	26.1	45.4	42.2	38.6	40.1	40.2	39.6	22.6	20.6	24.6	22.7	20.7	22.1	21.9	21.5	21.6	21.7	22.1	21.8	22.2	22.4	22.9	23.3	22.9	24.5
25	30.5	45.2	40.5	39.5	40.5	41.6	40.5	23.5	24.1	26.9	27.8	25.6	26.1	25.9	24.6	23.7	26.3	27.1	25.8	26.1	27.4	23.8	27.6	27.1	28.6

อุณหภูมิน้ำที่ชุดทดสอบในท่อด้านล่าง (°C)																				
ท่อที่1			ท่อที่2			ท่อที่3			ท่อที่4			ท่อที่5			ท่อที่6			ท่อที่7		
ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน
16.8	14.6	23.6	16.1	15.9	17.6	19.5	17.9	22.1	23.1	23.3	25.6	25.7	22.8	27.4	28.4	23.3	25.5	29.1	24.6	35.5
22.3	20.4	25.1	25.4	21.8	23.4	24.9	23.3	27.1	28.3	25.4	30.6	28.8	28.1	29.8	33.1	26.7	30.3	33.9	29.6	35.4
26.4	24.8	28.6	30.4	24.9	27.9	29.1	28.5	31.6	32.6	30.7	34.6	32.8	33.1	33.9	37.6	32.7	35.3	38.1	34.2	38.8

ตารางภาคผนวกที่ 2.4 แสดงผลการทดลองชุดทดสอบแบบขดกันหอย (Spiral coil) แบบไหลสวนทาง ความเร็วของอากาศ 4 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 40 °C อัตราการไหลของน้ำ 4 GPM โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำทางเข้า

อุณหภูมิ น้ำ ในถัง (°C)	อุณหภูมิ น้ำ ทางออก (°C)	%ความชื้น ของอากาศ ในท่อ		อุณหภูมิอากาศ ที่ทางออก (°C)				อุณหภูมิ น้ำที่ชุดทดสอบในท่อด้านบน (°C)																	
								ท่อที่1			ท่อที่2			ท่อที่3			ท่อที่4			ท่อที่5			ท่อที่6		
								ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน
15	23.2	45.8	42.5	29.7	30.6	30.7	30.3	18.5	17.2	20.3	20.7	18.8	19.5	18.9	16.7	20.5	16.7	19.3	20.1	20.5	20.1	19.9	21.5	20.5	20.4
20	24.4	43.5	40.2	30.9	31.7	31.9	31.5	22.9	20.9	23.2	23.9	20.8	21.7	22.4	21.4	21.3	21.9	21.6	21.4	22.3	21.9	22.1	23.3	22.3	23.1
25	29.5	43.2	40.1	38.7	39.9	41.2	39.9	24.7	21.5	25.6	26.4	23.1	27.8	28.4	24.5	28.9	30.5	25.6	32.6	33.5	32.1	35.4	36.8	32.6	37.4

อุณหภูมิน้ำที่ชุดทดสอบในท่อด้านล่าง (°C)																				
ท่อที่1			ท่อที่2			ท่อที่3			ท่อที่4			ท่อที่5			ท่อที่6			ท่อที่7		
ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน
19.8	18.7	19.9	21.6	19.7	20.3	22.2	20.1	23.5	20.4	20.1	23.6	21.5	20.4	22.5	24.7	21.3	22.9	23.9	22.7	24.9
21.6	20.4	23.1	23.5	21.1	21.9	23.1	21.8	24.5	25.1	23.1	26.1	25.1	24.6	25.4	27.7	23.6	25.5	28.1	25.3	28.7
24.1	22.8	26.7	29.8	24.8	30.1	24.9	22.9	30.5	31.9	29.8	33.2	31.9	29.7	33.8	35.1	32.4	34.6	35.8	30.1	36.1

ตารางภาคผนวกที่ 2.5 แสดงผลการทดลองชุดทดสอบแบบขดกันหอย (Spiral coil) แบบไหลสวนทาง ความเร็วของอากาศ 4 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 50 °C อัตราการไหลของน้ำ 4 GPM โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำทางเข้า

อุณหภูมิ น้ำ ในถัง (°C)	อุณหภูมิ น้ำ ทางออก (°C)	%ความชื้น ของอากาศ ในท่อ		อุณหภูมิอากาศ ที่ทางออก (°C)				อุณหภูมิ น้ำที่ชุดทดสอบในท่อด้านบน (°C)																	
								ท่อที่1			ท่อที่2			ท่อที่3			ท่อที่4			ท่อที่5			ท่อที่6		
								ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน
15	23.6	42.5	36.5	33.6	34.6	34.8	34.3	19.5	18.5	18.9	20.1	18.9	21.2	20.6	18.7	19.5	18.9	18.2	20.3	19.7	19.8	20.5	21.5	20.3	22.2
20	25.4	40.1	35.1	36.3	37.4	37.6	37.1	22.6	20.8	24.2	22.9	21.2	22.3	22.3	21.8	21.8	21.9	22.3	22.2	22.4	22.8	22.8	23.6	22.9	24.5
25	28.9	40.1	34.8	39.8	40.5	42.8	41.0	25.8	22.6	24.7	23.8	20.1	24.4	26.5	24.3	25.6	26.6	23.3	27.8	30.1	25.8	31.2	29.8	26.7	32.2

อุณหภูมิน้ำที่ชุดทดสอบในท่อด้านล่าง (°C)																				
ท่อที่1			ท่อที่2			ท่อที่3			ท่อที่4			ท่อที่5			ท่อที่6			ท่อที่7		
ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน
20.1	18.9	22.5	23.3	20.1	21.2	21.1	20.2	21.2	23.5	22.6	24.8	22.9	22.8	25.9	26.8	23.3	24.4	28.7	26.9	29.9
22.8	20.9	24.6	25.8	21.8	22.8	24.9	23.2	22.6	27.6	24.7	28.6	27.9	26.6	29.7	31.3	25.4	28.6	32.2	27.5	32.6
26.8	22.6	28.8	29.3	23.6	26.8	26.6	24.4	28.7	29.8	28.6	32.3	29.9	28.9	30.8	34.6	29.8	31.2	33.8	30.1	34.5

ตารางภาคผนวกที่ 2.6 แสดงผลการทดลองชุดทดสอบแบบขดกันหอย (Spiral coil) แบบไหลสวนทาง ความเร็วของอากาศ 4 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 60 °C อัตราการไหลของน้ำ 4 GPM โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำทางเข้า

อุณหภูมิ น้ำ ในถัง (°C)	อุณหภูมิ น้ำ ทางออก (°C)	%ความชื้น ของอากาศ ในท่อ		อุณหภูมิอากาศ ที่ทางออก (°C)				อุณหภูมิน้ำที่ชุดทดสอบในท่อค้ำบน (°C)																	
								ท่อที่1			ท่อที่2			ท่อที่3			ท่อที่4			ท่อที่5			ท่อที่6		
		เข้า	ออก	1	2	3	เฉลี่ย	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน
15	22.8	49.1	47.6	35.8	36.1	36.3	36.1	20.8	19.6	22.6	20.8	19.3	20.6	20.7	20.1	19.6	19.5	20.7	19.3	19.1	19.9	20.4	20.9	19.6	21.6
20	26.3	44.9	33.1	39.4	40.7	40.7	40.3	23.8	21.1	25.3	23.8	21.4	22.8	23.1	22.3	22.3	22.5	23.2	22.3	22.9	22.9	23.3	24.3	22.9	25.2
25	29.1	43.8	32.8	42.2	42.5	42.1	42.3	28.8	24.6	29.3	28.6	25.4	26.1	27.6	24.9	27.3	24.6	26.3	25.8	26.8	26.9	27.6	27.3	26.9	29.3

อุณหภูมิน้ำที่ชุดทดสอบในท่อค้ำล่าง (°C)																				
ท่อที่1			ท่อที่2			ท่อที่3			ท่อที่4			ท่อที่5			ท่อที่6			ท่อที่7		
ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน
20.2	19.4	21.5	22.4	20.6	21.1	22.4	21.6	24.6	25.7	23.1	25.6	26.2	25.6	29.4	33.6	27.2	30.6	32.4	29.9	35.1
23.2	21.4	26.2	27.2	22.4	23.9	25.7	24.1	18.5	19.1	25.9	31.1	29.1	28.5	31.4	33.6	27.1	31.9	34.4	29.9	35.7
28.1	25.1	30.2	31.1	23.3	28.6	29.2	29.1	29.6	31.2	29.9	33.6	34.2	33.1	35.4	33.6	30.2	34.9	35.4	36.2	39.7

ตารางภาคผนวกที่ 2.7 แสดงผลการทดลองชุดทดสอบแบบขดกันหอย (Spiral coil) แบบไหลสวนทาง ความเร็วของอากาศ 4 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 40 °C อัตราการไหลของน้ำ 4.5 GPM โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำทางเข้า

อุณหภูมิ น้ำ ในถัง (°C)	อุณหภูมิ น้ำ ทางออก (°C)	%ความชื้น ของอากาศ ในท่อ		อุณหภูมิอากาศ ที่ทางออก (°C)				อุณหภูมิ น้ำที่ชุดทดสอบในท่อด้านบน (°C)																	
								ท่อที่1			ท่อที่2			ท่อที่3			ท่อที่4			ท่อที่5			ท่อที่6		
								เข้า	ออก	1	2	3	เฉลี่ย	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน
15	23.1	49.3	45.1	29.6	30.1	30.2	30.0	18.9	20.1	20.4	20.1	19.2	18.6	19.3	18.6	18.5	18.4	22.6	19.6	20.1	22.1	20.6	20.1	20.6	19.9
20	24.3	45.2	46.1	30.9	31.5	31.8	31.4	22.6	20.1	23.4	22.8	21.1	22.9	22.3	22.8	21.5	21.9	22.6	21.6	22.2	23.5	22.2	23.1	22.1	23.3
25	30.1	46.2	45.1	33.9	33.6	34.1	33.9	27.6	24.2	28.4	26.6	25.6	26.8	24.2	24.8	24.5	24.9	27.6	24.8	26.9	28.6	28.2	23.9	26.3	28.3

อุณหภูมิน้ำที่ชุดทดสอบในท่อด้านล่าง (°C)																				
ท่อที่1			ท่อที่2			ท่อที่3			ท่อที่4			ท่อที่5			ท่อที่6			ท่อที่7		
ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน
18.3	17.6	19.4	20.2	19.3	20.2	23.1	20.1	20.6	20.2	20.9	21.2	20.2	20.4	21.3	22.6	23.6	21.6	22.1	23.2	21.7
21.8	20.6	23.6	24.2	21.2	22.2	23.2	22.1	24.6	25.1	23.1	26.1	25.1	24.4	25.3	27.7	23.5	25.7	28.1	25.2	28.6
24.8	23.7	26.3	27.3	25.3	26.2	28.2	26.1	28.7	29.1	28.2	30.1	29.3	30.3	29.7	26.6	30.6	29.6	31.2	30.1	29.9

ตารางภาคผนวกที่ 2.8 แสดงผลการทดลองชุดทดสอบแบบขดกันหอย (Spiral coil) แบบไหลสวนทาง ความเร็วของอากาศ 4 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 50 °C อัตราการไหลของน้ำ 4.5 GPM โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำทางเข้า

อุณหภูมิ น้ำ ในถัง (°C)	อุณหภูมิ น้ำ ทางออก (°C)	%ความชื้น ของอากาศ ในท่อ		อุณหภูมิอากาศ ที่ทางออก (°C)				อุณหภูมิน้ำที่ชุดทดสอบในท่อด้านบน (°C)																	
								ท่อที่1			ท่อที่2			ท่อที่3			ท่อที่4			ท่อที่5			ท่อที่6		
		เข้า	ออก	1	2	3	เฉลี่ย	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน
15	22.6	50.2	49.3	33.2	33.6	33.1	33.3	18.4	17.6	21.2	19.7	18.6	18.2	19.6	17.6	17.9	18.1	17.3	17.3	18.9	18.4	18.6	20.1	19.6	19.9
20	24.9	47.4	48.5	34.7	35.7	35.9	35.4	22.4	20.5	23.9	22.6	20.7	21.8	22.1	21.6	21.4	21.7	22.1	21.5	22.1	22.5	22.4	23.1	22.5	23.8
25	30.5	40.8	42.6	38.9	40.5	41.3	40.2	25.2	22.3	26.4	27.1	23.8	26.8	26.5	22.4	26.1	29.2	25.5	27.8	30.1	26.3	27.3	31.3	28.8	33.5

อุณหภูมิน้ำที่ชุดทดสอบในท่อด้านล่าง (°C)																				
ท่อที่1			ท่อที่2			ท่อที่3			ท่อที่4			ท่อที่5			ท่อที่6			ท่อที่7		
ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน
18.6	16.2	20.1	19.9	18.4	20.6	20.6	19.2	21.5	21.2	19.6	22.9	22.6	20.7	23.4	26.6	20.1	27.4	29.1	21.9	25.9
22.6	20.6	24.8	24.7	21.4	22.8	24.4	22.1	26.6	27.1	23.9	28.4	27.3	25.7	27.4	30.8	24.4	31.4	31.4	26.6	30.9
25.9	22.3	27.8	26.8	23.5	29.9	30.1	27.6	29.8	27.6	26.4	30.2	33.4	28.9	30.1	32.1	30.9	34.8	35.1	32.1	35.8

ตารางภาคผนวกที่ 2.9 แสดงผลการทดลองชุดทดสอบแบบขดกันหอย (Spiral coil) แบบไหลสวนทาง ความเร็วของอากาศ 4 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 60 °C อัตราการไหลของน้ำ 4.5 GPM โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำทางเข้า

อุณหภูมิ น้ำ ในถัง (°C)	อุณหภูมิ น้ำ ทางออก (°C)	%ความชื้น ของอากาศ ในท่อ		อุณหภูมิอากาศ ที่ทางออก (°C)				อุณหภูมิน้ำที่ชุดทดสอบในท่อด้านบน (°C)																	
								ท่อที่1			ท่อที่2			ท่อที่3			ท่อที่4			ท่อที่5			ท่อที่6		
		เข้า	ออก	1	2	3	เฉลี่ย	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน
15	23.6	50.1	49.8	36.3	37.8	39.1	37.7	19.8	18.35	20.6	20.5	18.7	21.5	19.9	19.1	20.9	18.7	17.6	20.3	20.6	20.1	22.2	23.1	21.6	22.9
20	25.8	49.2	48.3	39.2	40.5	40.6	40.1	23.4	21.2	25.1	23.5	21.1	22.5	22.8	22.3	22.1	22.2	20.9	22.2	22.7	21.8	23.1	23.8	22.6	24.7
25	31.6	48.6	47.7	40.1	42.5	41.8	41.5	24.6	22.3	23.7	25.9	23.9	28.9	29.9	25.6	30.1	31.6	26.9	31.3	30.9	30.1	32.5	33.6	30.9	35.5

อุณหภูมิน้ำที่ชุดทดสอบในท่อด้านล่าง (°C)																				
ท่อที่1			ท่อที่2			ท่อที่3			ท่อที่4			ท่อที่5			ท่อที่6			ท่อที่7		
ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน
20.2	19.9	23.3	21.4	19.8	20.3	22.2	20.9	23.8	24.2	21.4	25.7	26.6	24.1	26.9	27.1	24.3	29.2	23.4	21.1	25.9
23.1	21.3	26.3	25.7	22.2	23.7	25.3	23.7	28.2	28.3	25.4	30.4	28.4	27.8	29.8	32.8	26.1	30.2	33.5	28.9	35.1
29.9	26.3	28.9	26.7	25.9	28.8	26.7	26.2	28.7	30.2	29.8	33.5	35.1	30.2	34.3	36.6	31.1	35.9	33.8	31.5	38.7

ตารางภาคผนวกที่ 2.10 แสดงผลการทดลองชุดทดสอบแบบขดกันหอย (Spiral coil) แบบไหลสวนทาง ที่ความเร็วของอากาศ 5 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 40 °C และอัตราการไหลของน้ำ 3.5 GPM โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำทางเข้า

อุณหภูมิ น้ำ ในถัง (°C)	อุณหภูมิ น้ำ ทางออก (°C)	%ความชื้น ของอากาศ ในท่อ		อุณหภูมิอากาศ ที่ทางออก (°C)				อุณหภูมิน้ำที่ชุดทดสอบในท่อด้านบน (°C)																	
								ท่อที่1			ท่อที่2			ท่อที่3			ท่อที่4			ท่อที่5			ท่อที่6		
		เข้า	ออก	1	2	3	เฉลี่ย	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน
15	22.3	50.2	49.8	37.7	38.9	39.9	38.8	19.5	18.2	20.4	19.9	20.1	19.8	20.6	20.3	22.6	21.4	20.8	24.5	25.6	23.4	26.6	25.2	22.8	26.9
20	24.5	49.4	47.8	40.1	37.5	38.9	38.8	22.5	20.5	23.4	21.8	20.9	24.5	25.8	22.3	26.4	29.3	23.4	29.9	28.4	23.7	28.9	30.5	28.6	32.5
25	30.9	49.2	48.1	39.9	42.5	43.6	42.0	25.3	23.6	26.4	28.5	22.9	27.8	30.1	25.6	31.2	30.3	29.9	31.9	29.3	26.8	35.6	33.4	31.6	35.8

อุณหภูมิน้ำที่ชุดทดสอบในท่อด้านล่าง (°C)																				
ท่อที่1			ท่อที่2			ท่อที่3			ท่อที่4			ท่อที่5			ท่อที่6			ท่อที่7		
ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน
19.8	19.1	22.3	19.9	18.9	20.2	20.3	19.3	23.6	21.2	19.4	21.8	22.2	20.1	20.4	22.1	21.3	23.6	24.3	21.1	26.5
23.9	20.6	23.1	20.3	22.6	20.9	21.5	20.6	29.9	22.5	20.4	22.5	23.2	20.3	21.5	24.5	22.5	26.7	31.8	25.6	30.5
25.6	23.4	27.3	25.9	20.3	25.4	26.6	23.4	30.5	32.2	26.4	31.9	33.5	31.1	30.9	35.4	29.5	34.5	33.9	31.1	35.8

ตารางภาคผนวกที่ 2.11 แสดงผลการทดลองชุดทดสอบแบบขดก้นหอย (Spiral coil) แบบไหลสวนทาง ความเร็วของอากาศ 5 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 50 °C อัตราการไหลของน้ำ 3.5 GPM โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำทางเข้า

อุณหภูมิ น้ำ ในถัง (°C)	อุณหภูมิ น้ำ ทางออก (°C)	%ความชื้น ของอากาศ ในท่อ		อุณหภูมิอากาศ ที่ทางออก (°C)				อุณหภูมิน้ำที่ชุดทดสอบในท่อด้านบน (°C)																	
								ท่อที่1			ท่อที่2			ท่อที่3			ท่อที่4			ท่อที่5			ท่อที่6		
								ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน
15	22.6	51.8	49.4	34.6	36.9	38.1	36.5	18.1	17.2	19.1	19.2	18.6	18.9	17.9	18.8	19.9	18.2	19.1	20.1	19.8	20.2	20.5	20.2	22.1	23.4
20	24.1	51.1	48.9	36.9	37.8	41.4	38.7	19.8	18.8	21.7	20.6	17.8	19.4	18.9	18.9	19.1	17.7	18.8	18.7	21.9	20.1	22.9	22.5	20.2	23.5
25	30.2	49.6	47.7	40.6	41.2	41.6	41.1	22.7	20.2	23.6	24.6	22.2	25.6	26.9	23.4	27.8	28.8	23.2	29.1	30.5	25.3	33.4	32.5	30.1	35.6

อุณหภูมิน้ำที่ชุดทดสอบในท่อด้านล่าง (°C)																			
ท่อที่1			ท่อที่2			ท่อที่3			ท่อที่4			ท่อที่5			ท่อที่6			ท่อที่7	
ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลางท่อ ผิวใน
20.1	19.9	21.8	21.6	20.2	21.1	22.2	21.8	24.6	25.8	22.6	26.5	24.7	25.4	26.3	29.9	24.2	30.1	31.2	27.6 32.2
21.3	20.1	23.3	22.7	20.6	22.3	23.9	21.9	26.1	26.9	23.5	28.9	26.6	25.7	28.1	30.6	25.2	33.3	31.4	27.9 34.4
22.4	21.5	23.6	26.7	23.5	24.8	26.5	24.8	26.9	27.8	25.4	29.3	30.2	28.7	31.1	29.8	26.7	32.3	33.4	29.3 33.9

ตารางภาคผนวกที่ 2.12 แสดงผลการทดลองชุดทดสอบแบบขดกันหอย (Spiral coil) แบบไหลสวนทาง ความเร็วของอากาศ 5 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 60 °C อัตราการไหลของน้ำ 3.5 GPM โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ น้ำทางเข้า

อุณหภูมิ น้ำ ในถัง (°C)	อุณหภูมิ น้ำ ทางออก (°C)	%ความชื้น ของอากาศ ในท่อ		อุณหภูมิอากาศ ที่ทางออก (°C)				อุณหภูมิ น้ำ ที่ชุดทดสอบในท่อค้ำบน (°C)																	
								ท่อที่1			ท่อที่2			ท่อที่3			ท่อที่4			ท่อที่5			ท่อที่6		
		เข้า	ออก	1	2	3	เฉลี่ย	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน
15	25.7	53.8	49.9	36.6	37.7	39.1	37.8	20.2	19.6	22.3	22.8	19.2	20.6	22.9	20.2	21.9	22.4	20.1	22.3	20.8	19.4	21.8	22.8	20.5	22.2
20	28.6	52.5	49.8	38.2	39.2	40.1	39.2	22.1	20.4	24.1	23.1	19.3	21.2	23.8	20.3	22.6	22.7	20.4	21.4	22.5	20.2	22.8	22.9	21.3	23.5
25	30.2	51.6	48.1	40.2	41.5	42.2	41.3	24.5	23.8	25.9	27.8	25.6	28.9	29.6	26.4	30.1	32.1	29.8	32.4	33.9	26.4	32.8	32.5	30.1	34.8

อุณหภูมิ น้ำ ที่ชุดทดสอบในท่อค้ำล่าง (°C)																				
ท่อที่1			ท่อที่2			ท่อที่3			ท่อที่4			ท่อที่5			ท่อที่6			ท่อที่7		
ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน
20.3	20.2	23.2	23.1	20.5	22.9	23.9	21.8	26.1	25.6	23.2	26.6	27.5	23.9	28.7	28.5	25.3	29.4	29.8	28.1	32.4
23.2	20.5	24.9	25.1	22.4	24.6	25.3	22.9	27.8	28.6	25.6	32.7	29.6	27.6	30.6	31.9	27.8	34.3	33.8	29.9	34.8
25.9	21.6	26.2	27.3	26.9	28.8	30.2	28.3	31.2	32.2	32.5	33.8	33.8	34.2	35.5	35.8	32.1	35.6	35.9	32.2	36.4

ตารางภาคผนวกที่ 2.13 แสดงผลการทดลองชุดทดสอบแบบขดกันหอย (Spiral coil) แบบไหลสวนทาง ความเร็วของอากาศ 5 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 40 °C อัตราการไหลของน้ำ 4 GPM โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำทางเข้า

อุณหภูมิ น้ำ ในถัง (°C)	อุณหภูมิ น้ำ ทางออก (°C)	%ความชื้น ของอากาศ ในท่อ		อุณหภูมิอากาศ ที่ทางออก (°C)				อุณหภูมิน้ำที่ชุดทดสอบในท่อด้านบน (°C)																	
								ท่อที่1			ท่อที่2			ท่อที่3			ท่อที่4			ท่อที่5			ท่อที่6		
								ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน
15	25.5	53.1	49.2	38.8	37.6	39.2	39.0	20.5	19.8	21.3	20.9	18.6	22.1	21.6	20.6	21.9	20.9	19.8	20.7	22.9	21.8	23.6	22.7	20.9	23.7
20	27.6	52.9	49.1	38.4	40.2	40.3	39.6	22.5	21.5	23.6	22.4	21.5	22.2	23.1	22.5	23.5	22.8	20.3	22.4	23.5	23.5	24.3	24.2	22.3	25.6
25	30.5	50.1	48.2	42.6	42.3	43.1	42.4	26.1	24.2	27.7	28.9	25.8	27.1	28.9	26.1	30.2	31.3	30.2	33.9	34.4	31.2	32.7	35.4	30.5	35.6

อุณหภูมิน้ำที่ชุดทดสอบในท่อด้านล่าง (°C)																				
ท่อที่1			ท่อที่2			ท่อที่3			ท่อที่4			ท่อที่5			ท่อที่6			ท่อที่7		
ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน
22.6	19.8	22.7	23.3	20.3	21.9	23.8	21.8	24.2	25.9	23.2	25.9	27.1	25.6	26.9	27.8	26.7	27.9	29.7	28.7	30.5
23.8	20.7	24.6	25.4	22.2	24.6	25.4	23.7	25.2	26.6	24.1	26.5	25.8	24.6	26.3	27.8	25.6	28.7	29.3	26.4	30.9
26.8	23.9	29.4	30.2	25.4	30.1	28.9	27.6	30.2	31.3	29.5	32.3	31.9	30.5	31.8	33.9	32.6	33.8	34.5	33.2	36.4

ตารางภาคผนวกที่ 2.14 แสดงผลการทดลองชุดทดสอบแบบขดกันหอย (Spiral coil) แบบไหลสวนทาง ความเร็วของอากาศ 5 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 50 °C อัตราการไหลของน้ำ 4 GPM โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำทางเข้า

อุณหภูมิ น้ำ ในถัง (°C)	อุณหภูมิ น้ำ ทางออก (°C)	%ความชื้น ของอากาศ ในท่อ		อุณหภูมิอากาศ ที่ทางออก (°C)				อุณหภูมิน้ำที่ชุดทดสอบในท่อด้านบน (°C)																	
								ท่อที่1			ท่อที่2			ท่อที่3			ท่อที่4			ท่อที่5			ท่อที่6		
		เข้า	ออก	1	2	3	เฉลี่ย	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน
15	25.8	50.2	49.3	36.8	38.5	39.4	38.2	18.9	16.7	18.1	19.2	18.3	20.1	19.8	18.5	20.5	19.8	19.5	21.6	20.5	19.8	23.2	23.9	22.2	23.8
20	28.7	50.1	49.1	37.9	40.6	42.1	40.2	22.8	20.5	24.2	22.6	21.7	22.8	23.4	22.6	23.5	21.9	20.9	21.5	23.4	21.3	23.5	24.4	21.6	25.8
25	30.3	49.8	48.2	42.1	42.2	43.6	42.6	24.2	21.9	26.9	25.8	23.1	28.9	30.2	26.7	31.3	30.4	29.8	31.2	29.9	28.6	32.5	33.9	26.6	35.3

อุณหภูมิน้ำที่ชุดทดสอบในท่อด้านล่าง (°C)																				
ท่อที่1			ท่อที่2			ท่อที่3			ท่อที่4			ท่อที่5			ท่อที่6			ท่อที่7		
ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน
26.6	20.1	21.5	22.5	20.6	24.9	20.1	22.6	23.5	21.5	23.6	24.5	20.7	23.6	25.6	22.3	24.7	26.3	25.8	27.9	30.5
24.3	20.9	25.9	25.8	23.5	23.8	25.6	23.3	27.6	28.6	22.6	28.5	27.6	25.9	27.6	31.8	25.6	32.5	32.6	26.9	31.3
26.5	222.5	26.8	27.8	23.4	25.6	28.7	25.4	30.1	32.3	29.9	33.6	35.2	30.9	34.9	34.5	29.8	33.8	35.6	24.6	36.8

ตารางภาคผนวกที่ 2.15 แสดงผลการทดลองชุดทดสอบแบบขดกันหอย (Spiral coil) แบบไหลสวนทาง ความเร็วของอากาศ 5 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 60 °C อัตราการไหลของน้ำ 4 GPM โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำทางเข้า

อุณหภูมิ น้ำ ในถัง (°C)	อุณหภูมิ น้ำ ทางออก (°C)	%ความชื้น ของอากาศ ในท่อ		อุณหภูมิอากาศ ที่ทางออก (°C)				อุณหภูมิ น้ำที่ชุดทดสอบในท่อด้านบน (°C)																	
								ท่อที่1			ท่อที่2			ท่อที่3			ท่อที่4			ท่อที่5			ท่อที่6		
		เข้า	ออก	1	2	3	เฉลี่ย	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน
15	26.8	53.4	51.6	35.8	38.9	40.5	38.4	22.6	20.5	23.8	22.6	20.5	21.4	21.8	20.9	21.6	22.6	20.1	23.0	22.4	21.3	22.9	23.7	23.0	24.0
20	29.9	52.7	50.8	38.8	41.6	42.7	41.0	24.5	22.1	25.2	24.5	22.1	23.6	23.8	23.2	23.6	25.1	24.3	24.5	23.7	22.5	24.6	24.9	23.8	24.9
25	34.5	51.6	50.0	40.5	41.6	43.7	41.9	26.5	23.8	29.8	30.1	26.9	30.0	31.2	25.7	29.8	31.2	29.0	31.2	33.8	30.0	34.5	36.7	31.5	38.7

อุณหภูมิน้ำที่ชุดทดสอบในท่อด้านล่าง (°C)																				
ท่อที่1			ท่อที่2			ท่อที่3			ท่อที่4			ท่อที่5			ท่อที่6			ท่อที่7		
ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน
22.4	23.6	25.9	24.3	22.2	24.8	23.3	21.6	25.6	27.8	26.9	28.9	29.2	27.3	28.8	29.7	26.6	28.9	30.1	29.9	32.4
24.6	22.3	26.9	25.8	24.2	25.7	25.8	24.7	28.9	30.9	30.4	31.9	32.9	30.2	33.2	31.5	30.6	32.2	34.5	33.6	35.9
26.8	25.4	29.8	29.7	25.6	30.0	30.3	29.9	31.2	32.4	30.5	33.6	34.4	30.5	34.5	35.4	31.5	35.6	37.9	33.0	37.9

ตารางภาคผนวกที่ 2.16 แสดงผลการทดลองชุดทดสอบแบบขดกันหอย (Spiral coil) แบบไหลสวนทาง ความเร็วของอากาศ 5 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 40 °C อัตราการไหลของน้ำ 4.5 GPM โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำทางเข้า

อุณหภูมิ น้ำ ในถัง (°C)	อุณหภูมิ น้ำ ทางออก (°C)	%ความชื้น ของอากาศ ในท่อ		อุณหภูมิอากาศ ที่ทางออก (°C)				อุณหภูมิ น้ำที่ชุดทดสอบในท่อด้านบน (°C)																	
								ท่อที่1			ท่อที่2			ท่อที่3			ท่อที่4			ท่อที่5			ท่อที่6		
		เข้า	ออก	1	2	3	เฉลี่ย	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน
15	28.8	53.4	50.2	31.8	33.5	36.8	34.0	22.9	21.3	23.8	23.2	22.1	22.9	23.2	22.8	23.5	22.5	22.2	22.6	23.2	23.5	23.3	24.2	23.1	23.9
20	32.4	52.6	49.1	37.6	38.6	39.6	38.6	25.6	24.3	27.9	27.6	26.7	27.2	26.8	25.3	27.8	26.5	26.3	26.5	27.6	24.3	26.9	26.3	24.2	29.1
25	36.7	51.2	49.8	41.1	42.3	42.5	42.0	29.8	25.8	32.1	32.8	28.9	31.6	29.9	25.9	32.5	31.3	30.5	37.3	39.2	30.2	39.6	38.9	37.1	38.7

อุณหภูมิน้ำที่ชุดทดสอบในท่อด้านล่าง (°C)																							
ท่อที่1			ท่อที่2			ท่อที่3			ท่อที่4			ท่อที่5			ท่อที่6			ท่อที่7					
ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน			
23.6	21.5	24.8	25.2	24.3	24.9	24.6	23.5	25.1	25.9	23.6	27.1	26.2	25.6	27.3	26.7	24.5	26.6	29.8	26.7	29.9			
25.9	24.8	29.7	26.8	25.8	28.9	29.3	28.9	30.0	32.3	30.2	31.5	33.6	31.5	34.2	33.8	31.5	34.6	36.5	32.4	36.8			
28.6	26.4	29.8	30.1	28.9	31.0	31.6	30.2	32.5	33.8	32.2	35.6	36.6	34.5	36.8	37.8	35.4	36.7	38.7	32.5	40.0			

ตารางภาคผนวกที่ 2.17 แสดงผลการทดลองชุดทดสอบแบบขดกันหอย (Spiral coil) แบบไหลสวนทาง ความเร็วของอากาศ 5 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 50 °C อัตราการไหลของน้ำ 4.5 GPM โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำทางเข้า

อุณหภูมิ น้ำ ในถัง (°C)	อุณหภูมิ น้ำ ทางออก (°C)	%ความชื้น ของอากาศ ในท่อ		อุณหภูมิอากาศ ที่ทางออก (°C)				อุณหภูมิน้ำที่ชุดทดสอบในท่อด้านบน (°C)																	
								ท่อที่1			ท่อที่2			ท่อที่3			ท่อที่4			ท่อที่5			ท่อที่6		
								ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน
15	29.8	52.8	49.1	39.2	38.8	42.1	40.0	22.5	21.2	23.9	23.5	22.8	23.5	23.6	23.4	23.9	22.9	22.5	23.1	23.6	23.6	23.9	24.9	23.8	25.5
20	32.1	51.6	50.2	42.2	42.1	42.9	42.4	26.3	26.3	27.9	28.2	26.9	23.6	28.9	27.8	26.8	28.1	26.8	27.9	27.8	27.2	28.3	29.8	28.6	29.5
25	35.6	50.2	49.8	42.5	43.1	43.5	43.0	29.8	26.9	30.0	31.2	29.8	31.2	32.5	30.5	31.2	33.4	33.0	34.9	35.0	34.6	35.3	36.2	33.9	38.9

อุณหภูมิน้ำที่ชุดทดสอบในท่อด้านล่าง (°C)																				
ท่อที่1			ท่อที่2			ท่อที่3			ท่อที่4			ท่อที่5			ท่อที่6			ท่อที่7		
ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน
24.2	22.9	25.1	25.8	23.9	25.3	24.6	23.8	25.8	26.9	23.8	27.6	26.5	25.8	27.6	30.3	25.6	27.8	30.6	27.3	31.5
26.5	23.5	27.8	26.2	24.5	28.9	26.5	25.8	28.9	29.7	30.0	29.9	30.2	29.8	31.5	32.5	26.8	33.5	34.6	33.9	36.8
28.9	25.8	30.1	31.3	29.8	32.3	32.9	30.2	33.8	33.6	31.6	34.5	34.9	32.2	35.1	35.6	32.6	36.6	36.9	33.8	37.3

ตารางภาคผนวกที่ 2.18 แสดงผลการทดลองชุดทดสอบแบบขดกันหอย (Spiral coil) แบบไหลสวนทาง ความเร็วของอากาศ 5 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 60 °C อัตราการไหลของน้ำ 4.5 GPM โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำทางเข้า

อุณหภูมิ น้ำ ในถัง (°C)	อุณหภูมิ น้ำที่ ทางออก (°C)	% ความชื้น ของ อากาศในท่อ		อุณหภูมิอากาศ ที่ทางออก (°C)				อุณหภูมิน้ำที่ชุดทดสอบในท่อด้านบน (°C)																	
								ท่อที่1			ท่อที่2			ท่อที่3			ท่อที่4			ท่อที่5			ท่อที่6		
		เข้า	ออก	1	2	3	เฉลี่ย	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน
15	30.5	52.7	50.9	40.2	41.6	42.1	41.3	23.6	21.8	25.3	23.7	21.5	22.8	22.4	22.6	22.2	22.8	21.6	23.1	23.2	24.9	24.2	24.5	23.2	25.6
20	35.8	51.5	50.2	42.5	42.3	43.5	42.8	24.6	22.5	26.7	26.6	23.6	25.8	26.5	24.9	25.9	27.9	24.4	29.1	28.8	23.7	27.3	29.6	23.7	29.9
25	40.8	50.2	49.5	43.5	44.6	43.8	44.0	28.8	25.8	26.9	30.2	25.9	30.3	31.3	29.8	31.3	32.6	30.0	33.8	34.2	32.2	35.0	35.7	34.2	36.9

อุณหภูมิน้ำที่ชุดทดสอบในท่อด้านล่าง (°C)																				
ท่อที่1			ท่อที่2			ท่อที่3			ท่อที่4			ท่อที่5			ท่อที่6			ท่อที่7		
ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน
23.8	21.3	26.4	25.9	22.4	23.9	23.7	24.1	26.2	26.4	25.4	30.6	28.6	27.9	29.9	32.9	26.9	30.6	33.9	32.2	35.6
25.6	22.5	27.6	27.8	22.6	26.5	25.3	24.9	28.9	29.6	27.7	30.7	29.3	29.9	31.2	33.4	33.1	33.5	34.6	33.8	35.8
27.8	25.9	28.9	29.9	26.3	30.1	31.6	28.9	32.0	32.8	29.9	33.7	33.9	31.5	34.0	34.4	32.5	35.5	35.9	33.8	37.8

ตารางภาคผนวกที่ 2.19 แสดงผลการทดลองชุดทดสอบแบบขดกันหอย (Spiral coil) แบบไหลสวนทาง ความเร็วของอากาศ 6 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 40 °C อัตราการไหลของน้ำ 3.5 GPM โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำทางเข้า

อุณหภูมิ น้ำ ในถัง (°C)	อุณหภูมิ น้ำที่ ทางออก (°C)	% ความชื้น ของ อากาศในท่อ		อุณหภูมิอากาศ ที่ทางออก (°C)				อุณหภูมิน้ำที่ชุดทดสอบในท่อค้ำบน (°C)																	
								ท่อที่1			ท่อที่2			ท่อที่3			ท่อที่4			ท่อที่5			ท่อที่6		
		เข้า	ออก	1	2	3	เฉลี่ย	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน
15	23.4	48.4	47.1	34.4	33.9	35.5	34.6	21.9	19.6	23.6	22.2	19.8	21.7	21.3	20.5	20.8	20.6	20.5	20.5	20.3	20.3	20.6	19.9	19.6	20.4
20	25.3	45.7	42.5	32.2	33.8	33.9	33.3	24.6	22.8	27.9	25.2	22.2	23.3	24.8	22.4	22.6	23.0	22.1	22.2	22.8	21.9	22.3	22.2	21.4	22.0
25	27.9	44.9	40.5	36.8	30.3	37.4	34.8	27.9	25.3	27.8	28.3	26.8	26.7	31.9	26.1	26.2	26.6	25.2	26.1	26.6	25.3	36.1	25.7	25.7	29.7

อุณหภูมิน้ำที่ชุดทดสอบในท่อค้ำล่าง (°C)																				
ท่อที่1			ท่อที่2			ท่อที่3			ท่อที่4			ท่อที่5			ท่อที่6			ท่อที่7		
ผิวนอก ท่อ	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก ท่อ	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก ท่อ	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก ท่อ	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก ท่อ	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก ท่อ	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก ท่อ	กลาง ท่อ	ผิวใน
27.6	25.2	27.2	28.1	24.4	21.9	28.0	23.8	26.4	28.8	23.6	26.9	26.7	23.3	25.1	25.2	23.4	24.3	27.0	21.0	26.1
28.2	24.9	31.2	28.9	25.6	31.5	27.1	24.1	32.0	28.3	23.4	30.5	27.1	23.1	28.2	28.9	22.6	29.5	21.0	22.5	29.5
29.8	29.7	33.5	30.8	29.6	32.8	28.9	28.8	31.1	29.6	28.9	32.1	28.9	29.0	32.6	31.1	26.6	29.6	29.9	26.9	31.4

ตารางภาคผนวกที่ 2.20 แสดงผลการทดลองชุดทดสอบแบบขดกันหอย (Spiral coil) แบบไหลสวนทาง ความเร็วของอากาศ 6 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 50 °C อัตราการไหลของน้ำ 3.5 GPM โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำทางเข้า

อุณหภูมิ น้ำ ในถัง (°C)	อุณหภูมิ น้ำที่ ทางออก (°C)	% ความชื้น ของ อากาศในท่อ		อุณหภูมิอากาศ ที่ทางออก (°C)				อุณหภูมิ น้ำที่ชุดทดสอบในท่อด้านบน (°C)																	
								ท่อที่1			ท่อที่2			ท่อที่3			ท่อที่4			ท่อที่5			ท่อที่6		
		เข้า	ออก	1	2	3	เฉลี่ย	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน
15	25.1	48.2	46.9	38.2	37.7	38.1	38.0	24.2	19.8	25.4	24.8	24.9	23.2	25.1	21.9	23.1	22.2	21.8	21.7	21.8	21.2	21.9	21.3	20.6	22.4
20	26.2	47.8	46.6	38.4	38.8	39.1	38.8	24.7	22.5	26.2	25.3	22.6	24.3	23.8	23.0	24.4	23.3	23.1	23.5	23.2	22.5	23.3	22.6	22.1	23.4
25	29.1	46.5	30.1	39.8	40.7	40.3	40.3	27.8	27.1	29.8	28.7	26.1	27.9	27.4	26.6	27.1	26.9	26.7	26.9	26.7	24.7	27.1	25.7	25.7	28.2

อุณหภูมิน้ำที่ชุดทดสอบในท่อด้านล่าง (°C)																							
ท่อที่1			ท่อที่2			ท่อที่3			ท่อที่4			ท่อที่5			ท่อที่6			ท่อที่7					
ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง ท่อ	ผิวใน			
29.8	28.0	31.5	30.8	27.2	30.2	28.1	26.2	30.4	29.2	25.9	31.1	27.7	25.9	28.9	29.9	24.9	27.4	29.1	22.8	30.2			
31.5	29.4	32.8	32.4	28.7	31.9	29.3	27.7	31.5	30.4	27.4	32.4	28.9	27.6	29.8	30.9	27.8	28.7	30.2	28.3	31.4			
33.9	32.3	35.5	35.2	31.7	30.3	33.4	30.6	34.3	33.4	30.7	35.0	32.1	30.7	32.9	33.9	28.1	31.8	33.2	28.6	34.3			

ตารางภาคผนวกที่ 2.21 แสดงผลการทดลองชุดทดสอบแบบขดกันหอย (Spiral coil) แบบไหลสวนทาง ความเร็วของอากาศ 6 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 60 °C อัตราการไหลของน้ำ 3.5 GPM โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำทางเข้า

อุณหภูมิ น้ำ ในถัง (°C)	อุณหภูมิ น้ำที่ ทางออก (°C)	% ความชื้น ของ อากาศในท่อ		อุณหภูมิอากาศ ที่ทางออก (°C)				อุณหภูมิน้ำที่ชุดทดสอบในท่อด้านบน (°C)																	
								ท่อที่1			ท่อที่2			ท่อที่3			ท่อที่4			ท่อที่5			ท่อที่6		
		เข้า	ออก	1	2	3	เฉลี่ย	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน
15	25.7	47.2	42.9	38.3	38.6	38.8	38.6	25.1	22.5	26.3	25.9	21.8	23.9	24.8	22.6	22.8	23.1	22.2	22.5	22.7	21.9	22.6	22.2	21.3	22.3
20	26.9	46.6	42.8	39.4	39.7	39.5	39.5	26.4	24.2	27.6	27.2	23.3	25.3	26.2	23.9	24.3	24.4	23.5	23.9	24.1	22.6	24.1	23.4	22.7	23.6
25	29.6	42.3	31.1	40.4	41.4	41.2	41.0	29.7	28.0	30.7	30.4	26.9	28.7	28.8	27.5	27.7	27.9	26.2	26.5	27.3	27.1	27.6	26.8	26.2	27.2

อุณหภูมิน้ำที่ชุดทดสอบในท่อด้านล่าง (°C)																				
ท่อที่1			ท่อที่2			ท่อที่3			ท่อที่4			ท่อที่5			ท่อที่6			ท่อที่7		
ผิวนอก	กลาง	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง	ผิวใน
31.3	28.7	30.2	32.3	28.0	31.9	28.9	27.1	30.2	31.1	26.7	32.0	28.6	25.2	29.5	30.8	23.7	28.1	29.9	23.5	31.3
32.2	30.6	33.7	33.6	29.7	27.9	30.4	28.4	32.2	31.6	28.2	33.2	30.1	28.3	30.6	32.1	27.6	29.4	31.2	25.2	32.1
34.9	33.1	36.0	36.2	32.2	31.0	33.0	31.2	34.7	34.2	31.2	35.6	32.9	32.2	33.4	34.8	30.6	33.2	33.9	28.6	34.8

ตารางภาคผนวกที่ 2.22 แสดงผลการทดลองชุดทดสอบแบบขดก้นหอย (Spiral coil) แบบไหลสวนทาง ความเร็วของอากาศ 6 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 40 °C อัตราการไหลของน้ำ 4 GPM โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำทางเข้า

อุณหภูมิ น้ำ ในถัง (°C)	อุณหภูมิ น้ำที่ ทางออก (°C)	% ความชื้น ของ อากาศในท่อ		อุณหภูมิอากาศ ที่ทางออก (°C)				อุณหภูมิน้ำที่ชุดทดสอบในท่อด้านบน (°C)																	
								ท่อที่1			ท่อที่2			ท่อที่3			ท่อที่4			ท่อที่5			ท่อที่6		
		เข้า	ออก	1	2	3	เฉลี่ย	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน
15	24.0	48.2	47.3	31.5	32.6	31.3	31.8	23.5	24.2	21.9	24.8	22.4	21.1	23.5	20.2	22.1	23.1	21.9	22.7	21.9	20.4	21.2	22.0	20.9	24.9
20	25.8	47.4	46.2	33.5	32.6	32.8	33.0	28.2	28.8	22.7	27.7	23.0	25.8	26.9	23.4	24.3	24.9	23.5	23.8	24.8	23.3	23.6	23.9	23.4	23.7
25	28.3	45.6	40.8	33.7	34.2	34.5	34.1	29.5	27.7	28.9	29.9	27.1	27.9	28.5	27.5	27.4	27.9	29.2	27.2	27.8	25.3	27.3	27.3	26.4	27.0

อุณหภูมิน้ำที่ชุดทดสอบในท่อด้านล่าง (°C)																				
ท่อที่1			ท่อที่2			ท่อที่3			ท่อที่4			ท่อที่5			ท่อที่6			ท่อที่7		
ผิวนอก	กลาง	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง	ผิวใน
25.6	23.2	26.9	24.8	23.8	25.7	24.6	22.5	23.1	26.6	24.5	28.0	25.5	24.0	24.9	26.6	22.3	27.5	24.6	22.3	27.9
29.5	26.8	29.2	29.4	26.7	29.8	27.3	25.9	28.4	28.1	25.8	28.9	27.1	25.2	28.2	28.4	25.4	29.2	27.8	24.0	28.2
31.9	29.7	31.4	30.9	29.3	29.0	29.8	28.2	30.7	30.6	28.8	31.2	29.8	28.9	30.0	30.9	28.7	29.6	30.5	27.6	30.8

ตารางภาคผนวกที่ 2.23 แสดงผลการทดลองชุดทดสอบแบบขดกันหอย (Spiral coil) แบบไหลสวนทาง ความเร็วของอากาศ 6 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 50 °C อัตราการไหลของน้ำ 4 GPM โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำทางเข้า

อุณหภูมิ น้ำ ในถัง (°C)	อุณหภูมิ น้ำที่ ทางออก (°C)	% ความชื้น ของ อากาศในท่อ		อุณหภูมิอากาศ ที่ทางออก (°C)				อุณหภูมิน้ำที่ชุดทดสอบในท่อด้านบน (°C)																	
								ท่อที่1			ท่อที่2			ท่อที่3			ท่อที่4			ท่อที่5			ท่อที่6		
		เข้า	ออก	1	2	3	เฉลี่ย	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน
15	25.8	48.6	47.3	37.8	38.8	39.5	38.7	23.3	22.5	26.4	3.4	21.6	23.9	21.4	20.5	20.9	23.0	21.8	21.0	22.2	20.1	21.9	21.1	21.1	23.5
20	27.6	47.3	46.9	39.1	39.3	38.2	38.9	25.6	23.8	27.3	26.2	23.6	25.4	26.3	24.1	24.6	24.3	23.3	24.4	24.2	23.0	24.5	23.8	23.2	24.2
25	29.5	45.3	39.2	40.2	41.1	40.9	40.7	29.3	27.9	30.6	30.2	27.3	28.8	28.9	27.7	28.0	28.1	25.6	27.8	27.9	25.7	28.1	27.2	26.7	27.6

อุณหภูมิน้ำที่ชุดทดสอบในท่อด้านล่าง (°C)																				
ท่อที่1			ท่อที่2			ท่อที่3			ท่อที่4			ท่อที่5			ท่อที่6			ท่อที่7		
ผิวนอก	กลาง	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง	ผิวใน
	ท่อ			ท่อ			ท่อ			ท่อ			ท่อ			ท่อ			ท่อ	
29.9	27.2	30.2	31.3	28.9	30.2	28.8	27.0	30.1	31.6	26.6	31.3	30.0	26.1	29.8	28.5	26.7	27.6	29.8	24.2	30.9
31.4	29.9	31.3	32.8	29.2	32.2	29.8	28.2	32.1	32.9	28.2	33.0	31.1	27.7	31.4	29.8	27.6	29.6	31.8	25.6	32.2
32.4	34.2	35.6	34.7	31.8	31.1	32.6	31.0	30.6	33.7	31.6	35.5	32.6	31.2	33.4	34.3	31.3	32.3	33.9	29.1	33.8

ตารางภาคผนวกที่ 2.24 แสดงผลการทดลองชุดทดสอบแบบขดก้นหอย (Spiral coil) แบบไหลสวนทาง ความเร็วของอากาศ 6 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 60 °C อัตราการไหลของน้ำ 4 GPM โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำทางเข้า

อุณหภูมิ น้ำ ในถัง (°C)	อุณหภูมิ น้ำที่ ทางออก (°C)	% ความชื้น ของ อากาศในท่อ		อุณหภูมิอากาศ ที่ทางออก (°C)				อุณหภูมิน้ำที่ชุดทดสอบในท่อด้านบน (°C)																	
								ท่อที่1			ท่อที่2			ท่อที่3			ท่อที่4			ท่อที่5			ท่อที่6		
								ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน
15	25.9	45.3	42.8	40.1	40.5	40.3	40.3	25.7	23.3	27.8	24.8	22.4	25.1	22.1	23.6	21.8	20.5	20.1	26.6	23.3	21.5	24.8	23.6	20.1	25.1
20	28.1	44.8	40.7	40.6	40.4	40.7	40.6	27.6	26.1	29.0	28.4	24.8	26.6	24.4	24.9	25.9	25.8	24.3	25.6	25.7	24.5	25.7	25.8	20.4	25.3
25	30.9	42.5	40.2	41.5	42.3	42.5	42.1	29.7	25.5	30.2	32.2	28.9	31.5	32.0	30.0	31.8	32.4	31.1	32.5	33.6	28.7	29.8	27.9	28.0	29.5

อุณหภูมิน้ำที่ชุดทดสอบในท่อด้านล่าง (°C)																				
ท่อที่1			ท่อที่2			ท่อที่3			ท่อที่4			ท่อที่5			ท่อที่6			ท่อที่7		
ผิวนอก	กลาง	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง	ผิวใน
30.1	29.5	32.5	30.8	29.7	27.3	29.1	28.1	31.3	30.2	28.9	31.8	30.0	28.7	30.6	32.3	25.1	31.5	30.5	25.3	30.4
33.4	31.1	34.6	34.5	29.3	29.2	31.2	30.4	33.4	32.3	29.3	34.2	31.1	28.8	31.5	33.0	26.8	33.4	32.4	25.4	31.8
34.5	33.5	36.7	37.5	31.6	34.6	33.9	32.4	35.9	37.0	33.8	38.4	35.5	31.2	34.1	35.2	29.8	32.4	36.6	33.8	36.9

ตารางภาคผนวกที่ 2.25 แสดงผลการทดลองชุดทดสอบแบบขดกันหอย (Spiral coil) แบบไหลสวนทาง ความเร็วของอากาศ 6 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 40 °C อัตราการไหลของน้ำ 4.5 GPM โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำทางเข้า

อุณหภูมิ น้ำ ในถัง (°C)	อุณหภูมิ น้ำที่ ทางออก (°C)	% ความชื้น ของ อากาศในท่อ		อุณหภูมิอากาศ ที่ทางออก (°C)				อุณหภูมิน้ำที่ชุดทดสอบในท่อด้านบน (°C)																	
								ท่อที่1			ท่อที่2			ท่อที่3			ท่อที่4			ท่อที่5			ท่อที่6		
		เข้า	ออก	1	2	3	เฉลี่ย	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน
15	25.8	45.6	44.8	34.6	35.9	33.7	34.7	23.9	22.8	26.8	25.9	22.9	24.9	23.8	20.8	24.5	23.6	22.1	22.8	23.7	23.4	23.5	23.6	21.1	23.9
20	27.1	44.6	44.5	35.6	36.0	35.8	35.8	26.6	25.7	27.5	27.0	24.6	25.6	27.2	25.8	25.8	25.4	24.2	24.9	25.3	24.3	25.2	24.5	23.2	24.7
25	32.5	44.3	43.8	39.8	38.7	37.4	38.6	29.8	26.3	29.7	30.1	29.7	31.0	32.2	28.7	30.5	31.2	30.0	32.1	30.5	29.9	30.1	28.7	26.9	31.5

อุณหภูมิน้ำที่ชุดทดสอบในท่อด้านล่าง (°C)																				
ท่อที่1			ท่อที่2			ท่อที่3			ท่อที่4			ท่อที่5			ท่อที่6			ท่อที่7		
ผิวนอก	กลาง	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง	ผิวใน
25.9	23.8	29.7	27.5	25.4	28.3	26.4	23.7	29.7	28.6	26.5	30.1	25.4	23.6	27.9	26.8	25.8	27.7	26.9	25.7	26.6
28.7	27.7	31.9	29.2	27.6	32.2	27.8	27.1	31.2	28.7	27.3	32.1	27.7	27.4	30.4	29.2	27.5	28.9	28.8	27.7	29.7
29.9	28.6	30.5	30.2	28.7	31.2	30.9	30.0	30.8	31.2	31.1	33.5	32.5	31.9	30.9	32.9	30.9	33.8	30.9	29.7	34.8

ตารางภาคผนวกที่ 2.26 แสดงผลการทดลองชุดทดสอบแบบขดกันหอย (Spiral coil) แบบไหลสวนทาง ความเร็วของอากาศ 6 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 50 °C อัตราการไหลของน้ำ 4.5 GPM โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำทางเข้า

อุณหภูมิ น้ำ ในถัง (°C)	อุณหภูมิ น้ำที่ ทางออก (°C)	% ความชื้น ของ อากาศในท่อ		อุณหภูมิอากาศ ที่ทางออก (°C)				อุณหภูมิน้ำที่ชุดทดสอบในท่อด้านบน (°C)																	
								ท่อที่1			ท่อที่2			ท่อที่3			ท่อที่4			ท่อที่5			ท่อที่6		
		เข้า	ออก	1	2	3	เฉลี่ย	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน
15	26.7	46.5	35.2	36.7	38.9	37.0	37.5	23.2	22.2	24.7	25.4	23.1	24.0	25.2	23.4	23.2	22.2	22.1	23.5	25.3	24.8	26.7	23.4	22.8	24.7
20	27.8	45.1	34.3	38.6	39.5	39.1	39.1	25.9	26.2	28.6	27.7	25.3	26.9	26.6	25.4	26.1	25.9	24.8	25.8	26.3	24.2	26.2	24.6	23.9	25.8
25	30.8	42.6	34.2	39.8	40.2	41.5	40.5	29.8	28.2	29.9	30.1	29.1	30.0	30.2	29.7	28.6	29.7	25.7	27.9	29.7	28.7	30.1	28.9	25.7	29.7

อุณหภูมิน้ำที่ชุดทดสอบในท่อด้านล่าง (°C)																				
ท่อที่1			ท่อที่2			ท่อที่3			ท่อที่4			ท่อที่5			ท่อที่6			ท่อที่7		
ผิวนอก	กลาง	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง	ผิวใน
29.8	28.3	30.5	31.2	28.1	29.5	27.6	26.9	28.8	27.9	25.4	25.8	28.9	26.7	25.9	27.8	25.5	29.7	26.9	26.6	27.9
32.5	30.5	33.9	32.3	29.8	29.1	30.6	28.9	32.3	31.8	29.0	32.6	30.6	29.1	31.4	32.5	26.2	30.5	32.3	26.8	33.2
33.9	31.5	34.8	35.6	30.2	34.9	33.2	31.5	33.2	33.9	31.1	33.8	30.8	31.0	31.9	33.9	30.8	32.8	33.8	32.2	35.9

ตารางภาคผนวกที่ 2.27 แสดงผลการทดลองชุดทดสอบแบบขดกันหอย (Spiral coil) แบบไหลสวนทาง ความเร็วของอากาศ 6 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 60 °C อัตราการไหลของน้ำ 4.5 GPM โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำทางเข้า

อุณหภูมิ น้ำ ในถัง (°C)	อุณหภูมิ น้ำที่ ทางออก (°C)	% ความชื้น ของ อากาศในท่อ		อุณหภูมิอากาศ ที่ทางออก (°C)				อุณหภูมิน้ำที่ชุดทดสอบในท่อด้านบน (°C)																	
								ท่อที่1			ท่อที่2			ท่อที่3			ท่อที่4			ท่อที่5			ท่อที่6		
		เข้า	ออก	1	2	3	เฉลี่ย	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน	ผิว นอก	กลาง ท่อ	ผิว ใน
15	25.9	48.2	36.5	37.8	38.9	39.2	38.6	24.5	23.4	26.9	27.7	23.4	26.3	27.5	25.3	26.0	25.4	24.3	26.2	28.8	22.2	25.5	25.4	22.8	23.9
20	28.6	47.8	35.8	39.5	40.3	40.2	40.0	28.6	26.8	29.6	29.2	25.9	27.6	29.6	26.2	26.7	26.9	24.5	26.5	24.7	25.3	26.7	25.8	24.8	26.3
25	35.8	46.5	35.0	40.6	42.1	41.5	41.4	30.1	29.8	31.2	32.3	29.9	33.4	30.9	30.1	33.8	31.8	30.7	32.1	29.7	27.9	29.8	30.1	30.0	33.9

อุณหภูมิน้ำที่ชุดทดสอบในท่อด้านล่าง (°C)																				
ท่อที่1			ท่อที่2			ท่อที่3			ท่อที่4			ท่อที่5			ท่อที่6			ท่อที่7		
ผิวนอก	กลาง	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง	ผิวใน	ผิวนอก	กลาง	ผิวใน
	ท่อ			ท่อ			ท่อ			ท่อ			ท่อ			ท่อ			ท่อ	
30.8	29.8	31.2	31.5	28.7	26.5	27.9	28.3	30.2	31.5	30.5	31.9	30.8	30.0	31.9	31.5	28.5	30.8	31.5	25.9	35.9
32.9	31.1	34.2	33.7	30.5	29.9	31.4	29.5	33.5	32.6	29.5	34.1	31.3	29.7	32.3	33.6	27.2	33.9	33.2	27.4	34.2
34.6	32.2	35.7	36.7	31.6	32.1	33.9	32.9	35.7	33.9	32.6	36.8	35.7	33.9	34.6	37.7	32.0	35.9	36.8	32.9	36.6



ภาพนกที่ 3
แสดงตัวอย่างการคำนวณ

ตัวอย่างการคำนวณ

ระบบอากาศ (Air - Side)

ข้อมูลจากการทดลอง (Data from experimental)

ความเร็วของอากาศ (V)	4	m/s
ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศทางเข้า (ϕ_{in})	52.6	% RH
ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศทางออก (ϕ_{out})	52.0	% RH
อุณหภูมิของอากาศทางเข้า (T_{in})	40	°C
อุณหภูมิของอากาศทางออก (T_{out})	26.23	°C
กำลังวัตต์ของชุดฮีตเตอร์อากาศ (W_u)	5500	W
ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศ (C_p)	1.00656	kJ/kg K
ค่าความหนาแน่นของอากาศ (ρ_a)	1.13021	kg/m ³
ค่าความหนืดจลน์ของอากาศ (ν)	17.01604x10 ⁻⁶	m ² /s

การคำนวณทางทฤษฎี (Calculation procedure)

คำนวณหาค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของอากาศนอกชุดทดสอบ (Re_{do})

$$\begin{aligned}
 Re_{do} &= \frac{VD_o}{\nu} \\
 &= \frac{4 \times 0.3}{17.01604 \times 10^{-6}} \\
 &= 70521.696
 \end{aligned}$$

คำนวณหาอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ ; m_a (kg/s)

$$\begin{aligned}
 m_a &= \rho VA \\
 &= 1.13021 \times \frac{\pi}{4} (0.3)^2 \times 4 \\
 &= 0.31955 \quad \text{kg/s}
 \end{aligned}$$

คำนวณค่าความเร็วของอากาศเชิงมวล ; $G_{\max}$ (kg/s m^2)

$$\begin{aligned} G_{\max} &= \frac{m_a}{A_{\text{inlet}}} \\ &= \frac{0.031955}{\frac{\pi (0.14)^2}{4}} \\ &= 20.7589 \quad \text{kg/sm}^2 \end{aligned}$$

คำนวณค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ ภายในชุดทดสอบ ; Re_{di}

$$\begin{aligned} Re_{di} &= \frac{G_{\max} D_i}{\rho_v} \\ &= \frac{20.7598 \times (9.525 \times 10^{-3})}{1.13021 \times (17.01604 \times 10^{-6})} \\ &= 10281.4111 \end{aligned}$$

คำนวณค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์บนผิวทรีป : Re_s

$$\begin{aligned} Re_s &= \frac{G_{\max} L_{fs}}{\rho_v} \\ &= \frac{20.7589 \times (15 \times 10^{-3})}{1.13021 \times (17.01604 \times 10^{-6})} \\ &= 16191.19855 \end{aligned}$$

คำนวณหาค่าการถ่ายเทความร้อนรวม ; Q_T (kW)

$$\begin{aligned} Q_T &= m_a C_{p_a} (T_{\text{ain}} - T_{\text{aout}}) \\ &= 0.31955 \times 1.00656 \times (40 - 26.23) \\ &= 4.40655 \quad \text{kW} \end{aligned}$$

คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย ; Q_{Tave} (kW)

จากสูตร

$$Q_T = h_{o,ave} A_{tot} (T_{a,in} - T_{a,out})$$

$$\begin{aligned} \therefore h_{o,ave} &= \frac{Q_T}{A_{tot} (T_{a,in} - T_{a,out})} \\ &= \frac{4.40655}{0.21528 \times (40 - 26.3)} \\ &= 1.49408 \quad \text{kW/m}^2\text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$

ระบบน้ำ (Water-Side)

ข้อมูลจากการทดลอง (Data from experimental)

อัตราการไหลของน้ำ ($\dot{m}_w$)	0.22102	kg/s
อุณหภูมิน้ำที่ทางเข้า ($T_{w,in}$)	15	$^\circ\text{C}$
อุณหภูมิน้ำทางออก ($T_{w,out}$)	22.5	$^\circ\text{C}$
อุณหภูมิผิวคอยล์ด้านใน ($T_{wall,inner}$)	16.5	$^\circ\text{C}$
อุณหภูมิผิวคอยล์ด้านนอก ($T_{wall,outer}$)	15.2	$^\circ\text{C}$
อุณหภูมิน้ำภายในท่อทดสอบ ($T_{w,bulk}$)	13.1	$^\circ\text{C}$
พื้นที่หน้าตัดของท่อทดสอบ (A)	7.1256×10^{-5}	m^2
คุณสมบัติของน้ำที่อุณหภูมิ 15°C		
$\rho = 1000.96$		kg/m^3
$C_p = 4.1908$		$\text{kJ/kg } ^\circ\text{C}$
$\nu = 1.2015 \times 10^{-6}$		m^2/s
$Pr = 6.7922$		

การคำนวณทางทฤษฎี (Calculation procedure)

คำนวณหาค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของน้ำ ; Re

$$\begin{aligned} Re &= \frac{V_w D_i}{\nu} \\ \therefore \dot{m}_w &= \rho \nu A \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \therefore V &= \frac{m_w}{\rho A} \\
 &= \frac{0.00006309 \times 3.5 \rho}{\rho \times (3.1669 \times 10^{-5})} \\
 &= 6.97254 \quad m/s \\
 \therefore Re &= \frac{6.97254 \times (9.525 \times 10^{-3})}{(1.2015 \times 10^{-6})} \\
 &= 55275.4420
 \end{aligned}$$

คำนวณหาค่าไดนามิกเบอร์ ; De

$$\begin{aligned}
 De &= Re \left[\frac{a}{R} \right]^{0.5} \\
 &= 55275.4420 \times \left[\frac{9.525/2}{175} \right]^{0.5} \\
 &= 9118.6531
 \end{aligned}$$

คำนวณหาค่าเรย์โนลด์สเบอร์วิกฤต ; Re_{crit}

$$\begin{aligned}
 Re_{crit,min} &= 2100 \left[1 + 12 \left(\frac{R_{min}}{a} \right)^{0.5} \right] \\
 Re_{crit,max} &= 2100 \left[1 + 12 \left(\frac{R_{max}}{a} \right)^{0.5} \right]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Re_{crit,min} &= 2100 \left[1 + 12 \left(\frac{100}{3.175} \right)^{0.5} \right] \\
 &= 6590.2695
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Re_{crit,max} &= 2100 \left[1 + 12 \left(\frac{280}{3.175} \right)^{0.5} \right] \\
 &= 27300
 \end{aligned}$$

คำนวณหาค่า Effective radius of curvature ; R_c

$$\begin{aligned}
 R_c &= R \left[1 + \left(\frac{b}{2\pi R} \right)^2 \right]^{-0.5} \\
 &= (175 \times 10^{-3}) \times \left[1 + \left(\frac{25}{2\pi \times 175} \right)^2 \right]^{-0.5} \\
 &= 0.17495
 \end{aligned}$$

คำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนของน้ำ ; Q (kW)

$$\begin{aligned}
 Q &= m_w C_p (T_{win} - T_{wout}) \\
 &= 0.22103 \times 4.1980 \times (22.5 - 15) \\
 &= 6.9591 \quad \text{kW}
 \end{aligned}$$

คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของน้ำ ; hi_{in} (kW/m²°C)

$$\begin{aligned}
 Q_i &= hi_{in} A_i (T_{wall, inner+1} - T_{w, bulk}) \\
 \therefore hi_{in} &= \frac{Q_i}{A_i (T_{wall, inner+1} - T_{w, bulk})} \\
 &= \frac{6.9591}{0.21528 \times (16.5 - 13.1)} \\
 &= 9.5076 \quad \text{kW / m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้านนอกท่อ ; hi_{out} (W/m²°C)

$$\begin{aligned}
 Q_i &= hi_{out} A_i (T_{wall, outer=1} - T_{w, bulk, j}) \\
 \therefore hi_{out} &= \frac{Q_i}{A_i (T_{wall, outer=1} - T_{w, bulk, j})} \\
 &= \frac{6.9591}{0.21528 \times (15.2 - 13.1)} \\
 &= 15.3932 \quad \text{kW / m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

คำนวณหาค่าการถ่ายเทความร้อนรวม ; Q_T (kW)

$$\begin{aligned} Q_t &= m_w C_p (T_{w,out} - T_{w,in}) \\ &= 0.22103 \times 4.59058 \times (24.8 - 15) \\ &= 9.94349 \quad \text{kW} \end{aligned}$$

คำนวณหาค่าการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย ; h_{Tave} ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

$$\begin{aligned} Q_t &= h_{i,ave} A_t (T_{w,out} - T_{w,in}) \\ \therefore h_{i,ave} &= \frac{Q_t}{A_t (T_{w,out} - T_{w,in})} \\ &= \frac{9.9439}{0.21528 \times (22.5 - 15)} \\ &= 6.1587 \quad \text{kW/m}^2 \cdot ^\circ C \end{aligned}$$



ภาคผนวกที่ 4
แสดงตารางข้อมูลที่ได้จากการคำนวณ

ตารางภาคผนวกที่ 4.1 แสดงผลการคำนวณของชุดทดสอบแบบขดกันหอยที่อัตราการไหลของน้ำ
3.5 GPM ความเร็วของอากาศ 4 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 40 °C

อุณหภูมิ น้ำทาง เข้า ($T_{w_{in}}$) (°C)	อัตราการถ่ายเท ความร้อนของ อากาศ (Q_a) (kW)	อัตราการถ่ายเทความร้อนของ น้ำ (Q_w) (kW)	สัมประสิทธิ์การ ถ่ายเทความร้อน ภายใน ($h_{i_{inner}}$) (kW/m ² °C)	สัมประสิทธิ์การ ถ่ายเทความร้อน ภายนอก ($h_{i_{outer}}$) (kW/m ² °C)
15	4.716	6.947	16.135	11.127
20	3.339	3.787	8.796	1.955
25	3.236	0.461	1.190	1.071

ตารางภาคผนวกที่ 4.2 แสดงผลการคำนวณของชุดทดสอบแบบขดกันหอยที่อัตราการไหลของน้ำ
3.5 GPM ความเร็วของอากาศ 4 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 50 °C

อุณหภูมิ น้ำทาง เข้า ($T_{w_{in}}$) (°C)	อัตราการถ่ายเท ความร้อนของ อากาศ (Q_a) (kW)	อัตราการถ่ายเทความร้อนของ น้ำ (Q_w) (kW)	สัมประสิทธิ์การ ถ่ายเทความร้อน ภายใน (h_i) (kW/m ² °C)	สัมประสิทธิ์การ ถ่ายเทความร้อน ภายนอก (h_o) (kW/m ² °C)
15	5.558	7.872	30.474	33.244
20	4.453	5.265	16.306	14.387
25	3.114	4.888	5.975	5.822

ตารางภาคผนวกที่ 4.3 แสดงผลการคำนวณของชุดทดสอบแบบขดกันหอยที่อัตราการไหลของน้ำ
3.5 GPM ความเร็วของอากาศ 4 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 60 °C

อุณหภูมิ น้ำทาง เข้า (T_{w_i}) (°C)	อัตราการถ่ายเท ความร้อนของ อากาศ (Q_a) (kW)	อัตราการถ่ายเทความร้อนของ น้ำ (Q_w) (kW)	สัมประสิทธิ์การ ถ่ายเทความร้อน ภายใน (h_i) (kW/m ² °C)	สัมประสิทธิ์การ ถ่ายเทความร้อน ภายนอก (h_o) (kW/m ² °C)
15	8.291	8.891	31.770	12.906
20	6.633	5.635	13.087	10.067
25	6.340	5.073	15.709	14.727

ตารางภาคผนวกที่ 4.4 แสดงผลการคำนวณของชุดทดสอบแบบขดกันหอยที่อัตราการไหลของน้ำ
4 GPM ความเร็วของอากาศ 4 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 40 °C

อุณหภูมิ น้ำทาง เข้า (T_{w_i}) (°C)	อัตราการถ่ายเท ความร้อนของ อากาศ (Q_a) (kW)	อัตราการถ่ายเทความร้อนของ น้ำ (Q_w) (kW)	สัมประสิทธิ์การ ถ่ายเทความร้อน ภายใน (h_i) (kW/m ² °C)	สัมประสิทธิ์การ ถ่ายเทความร้อน ภายนอก (h_o) (kW/m ² °C)
15	3.339	8.680	36.656	28.801
20	2.926	4.646	15.415	14.387
25	0.034	4.743	6.885	4.790

ตารางภาคผนวกที่ 4.5 แสดงผลการคำนวณของชุดทดสอบแบบขดกันหอยที่อัตราการไหลของน้ำ
4 GPM ความเร็วของอากาศ 4 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 50 °C

อุณหภูมิ น้ำทาง เข้า (T_{w_i}) (°C)	อัตราการถ่ายเท ความร้อนของ อากาศ (Q_a) (kW)	อัตราการถ่ายเทความร้อนของ น้ำ (Q_w) (kW)	สัมประสิทธิ์การ ถ่ายเทความร้อน ภายใน (h_i) (kW/m ² °C)	สัมประสิทธิ์การ ถ่ายเทความร้อน ภายนอก (h_o) (kW/m ² °C)
15	5.256	9.104	0.210	23.494
20	4.319	5.702	13.243	13.243
25	3.348	4.111	5.786	5.161

ตารางภาคผนวกที่ 4.6 แสดงผลการคำนวณของชุดทดสอบแบบขดกันหอยที่อัตราการไหลของน้ำ
4 GPM ความเร็วของอากาศ 4 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 60 °C

อุณหภูมิ น้ำทาง เข้า (T_{w_i}) (°C)	อัตราการถ่ายเท ความร้อนของ อากาศ (Q_a) (kW)	อัตราการถ่ายเทความร้อนของ น้ำ (Q_w) (kW)	สัมประสิทธิ์การ ถ่ายเทความร้อน ภายใน (h_i) (kW/m ² °C)	สัมประสิทธิ์การ ถ่ายเทความร้อน ภายนอก (h_o) (kW/m ² °C)
15	7.771	8.257	25.570	19.177
20	6.405	6.652	44.143	15.450
25	5.755	4.321	10.037	6.922

ตารางภาคผนวกที่ 4.7 แสดงผลการคำนวณของชุดทดสอบแบบขดกันหอยที่อัตราการไหลของน้ำ
4.5 GPM ความเร็วของอากาศ 4 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 40 °C

อุณหภูมิ น้ำทาง เข้า (T_{w_i}) (°C)	อัตราการถ่ายเท ความร้อนของ อากาศ (Q_a) (kW)	อัตราการถ่ายเทความร้อนของ น้ำ (Q_w) (kW)	สัมประสิทธิ์การ ถ่ายเทความร้อน ภายใน (h_i) (kW/m ² °C)	สัมประสิทธิ์การ ถ่ายเทความร้อน ภายนอก (h_o) (kW/m ² °C)
15	3.336	9.647	29.875	22.406
20	2.869	5.109	33.900	11.865
25	2.035	6.060	14.075	9.707

ตารางภาคผนวกที่ 4.8 แสดงผลการคำนวณของชุดทดสอบแบบขดกันหอยที่อัตราการไหลของน้ำ
4 GPM ความเร็วของอากาศ 5 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 40 °C

อุณหภูมิ น้ำทาง เข้า (T_{w_i}) (°C)	อัตราการถ่ายเท ความร้อนของ อากาศ (Q_a) (kW)	อัตราการถ่ายเทความร้อนของ น้ำ (Q_w) (kW)	สัมประสิทธิ์การ ถ่ายเทความร้อน ภายใน (h_i) (kW/m ² °C)	สัมประสิทธิ์การ ถ่ายเทความร้อน ภายนอก (h_o) (kW/m ² °C)
15	0.344	11.115	30.372	25.816
20	0.138	8.025	20.709	16.207
25	0.069	5.797	10.771	8.687

ตารางภาคผนวกที่ 4.9 แสดงผลการคำนวณของชุดทดสอบแบบขดกันหอยที่อัตราการไหลของน้ำ
4 GPM ความเร็วของอากาศ 5 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 50 °C

อุณหภูมิ น้ำทาง เข้า ($T_{w,i}$) (°C)	อัตราการถ่ายเท ความร้อนของ อากาศ (Q_a) (kW)	อัตราการถ่ายเทความร้อนของ น้ำ (Q_w) (kW)	สัมประสิทธิ์การ ถ่ายเทความร้อน ภายใน (h_i) (kW/m ² °C)	สัมประสิทธิ์การ ถ่ายเทความร้อน ภายนอก (h_o) (kW/m ² °C)
15	3.951	11.433	177.023	26.553
20	3.281	9.186	14.714	13.765
25	2.477	5.586	6.487	5.190

ตารางภาคผนวกที่ 4.10 แสดงผลการคำนวณของชุดทดสอบแบบขดกันหอยที่อัตราการไหลของน้ำ
4 GPM ความเร็วของอากาศ 5 m/s อุณหภูมิอากาศเข้า 60 °C

อุณหภูมิ น้ำทาง เข้า ($T_{w,i}$) (°C)	อัตราการถ่ายเท ความร้อนของ อากาศ (Q_a) (kW)	อัตราการถ่ายเทความร้อนของ น้ำ (Q_w) (kW)	สัมประสิทธิ์การ ถ่ายเทความร้อน ภายใน (h_i) (kW/m ² °C)	สัมประสิทธิ์การ ถ่ายเทความร้อน ภายนอก (h_o) (kW/m ² °C)
15	7.023	12.491	41.446	27.631
20	6.178	10.453	34.684	23.123
25	5.885	10.013	15.004	9.896



ภาคผนวกที่ 5
ตารางเงื่อนไขในการทดสอบ

เงื่อนไขในการทดสอบ

ในการทดลองเพื่อที่จะให้ได้ค่าต่าง ๆ ตามที่ต้องการจะต้องทำการวัดค่าต่าง ๆ ตามเงื่อนไขดังตารางต่อไปนี้

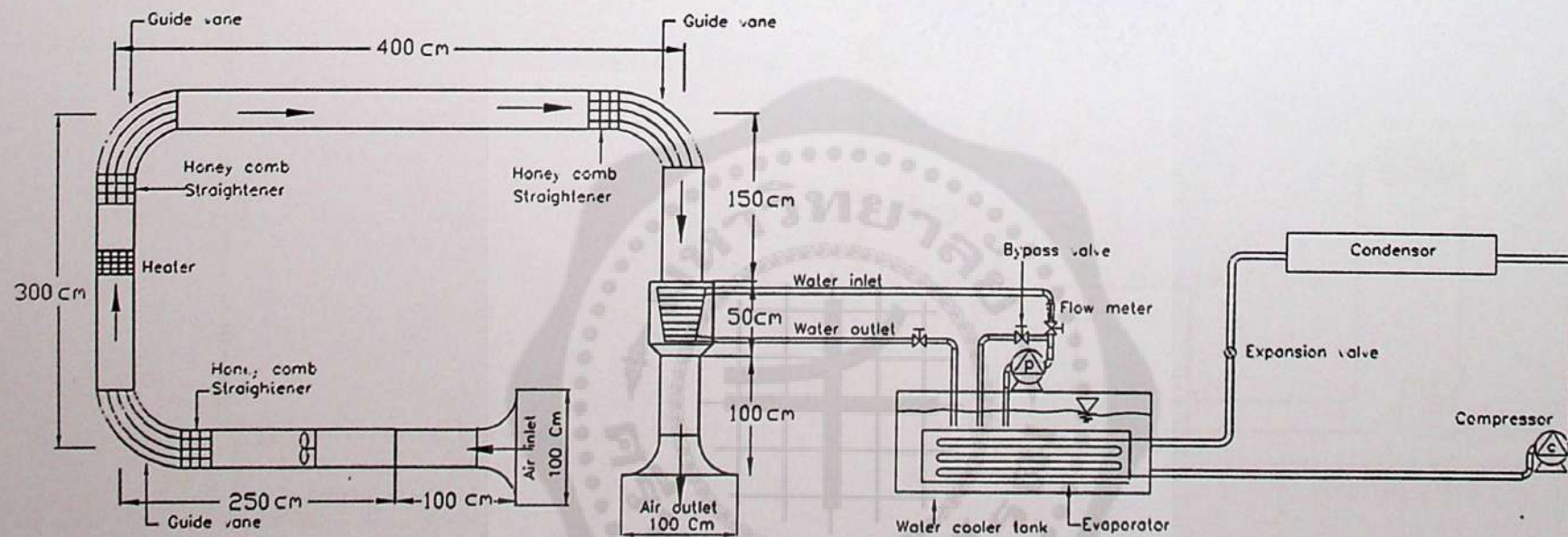
ความเร็วของ อากาศ m/s	อัตราการไหล ของน้ำ GPM	อุณหภูมิของ อากาศ °C	อุณหภูมิน้ำในถัง °C
4	3.5	40	15
			20
			25
		50	15
			20
			25
		60	15
			20
			25
	4	40	15
			20
			25
		50	15
			20
			25
		60	15
			20
			25
	4.5	40	15
			20
			25

ความเร็วของ อากาศ m/s	อัตราการไหล ของน้ำ GPM	อุณหภูมิของ อากาศ °C	อุณหภูมิน้ำในถัง °C
4	4.5	50	15
			20
			25
		60	15
			20
			25
5	3.5	40	15
			20
			25
		50	15
			20
			25
		60	1
			20
			25
	4	40	15
			20
			25
		50	15
			20
			25
		60	15
			20
			25

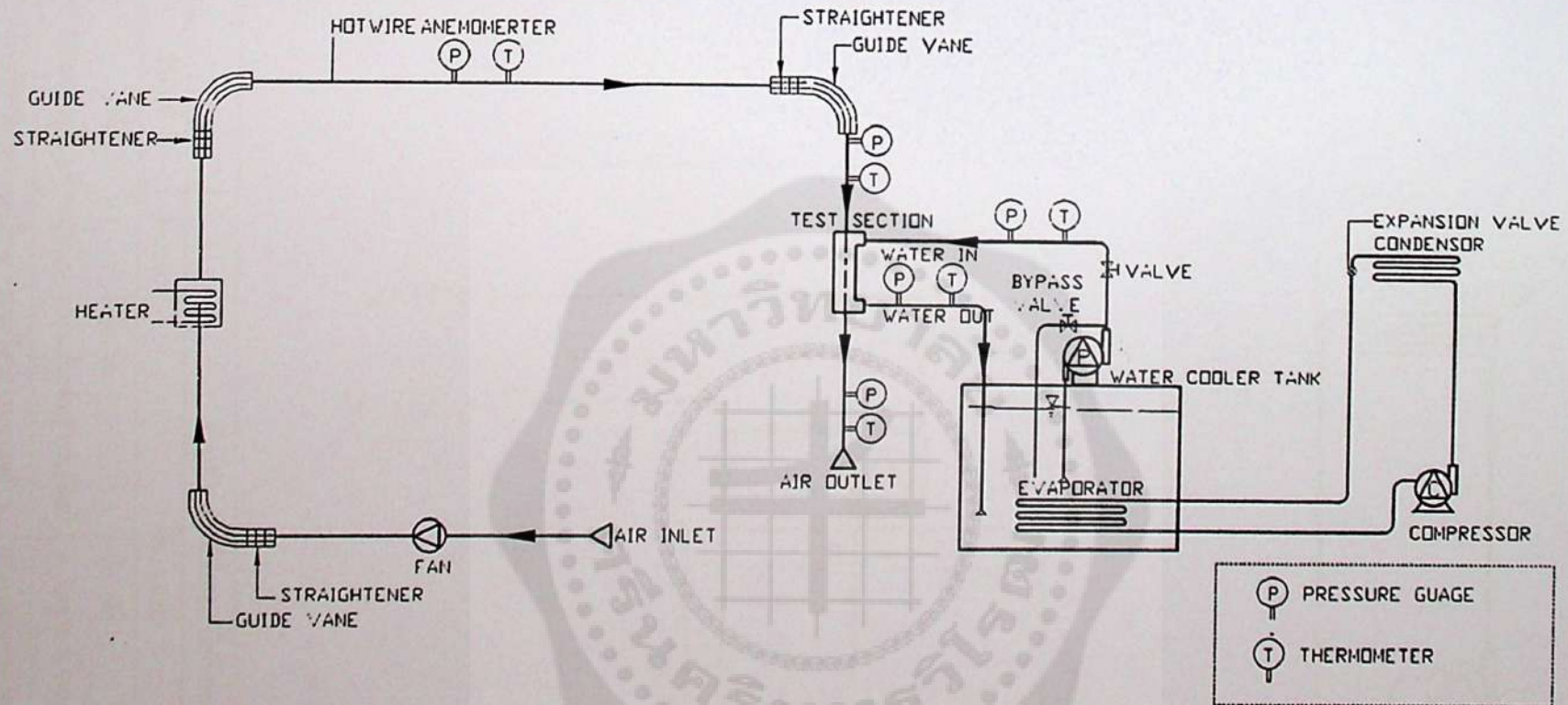
ความเร็วของ อากาศ m/s	อัตราการไหล ของน้ำ GPM	อุณหภูมิของ อากาศ °C	อุณหภูมิน้ำในถัง °C
5	4.5	40	15
			20
			25
		50	15
			20
			25
		60	15
			20
			25
6	3.5	40	15
			20
			25
		50	15
			20
			25
		60	15
			20
			25
	4	40	15
			20
			25
		50	15
			20
			25

ความเร็วของ อากาศ m/s	อัตราการไหล ของน้ำ GPM	อุณหภูมิของ อากาศ °C	อุณหภูมิน้ำในถัง °C
6	4	60	15
			20
			25
	4.5	40	15
			20
			25
		50	15
			20
			25
		60	15
			20
			25

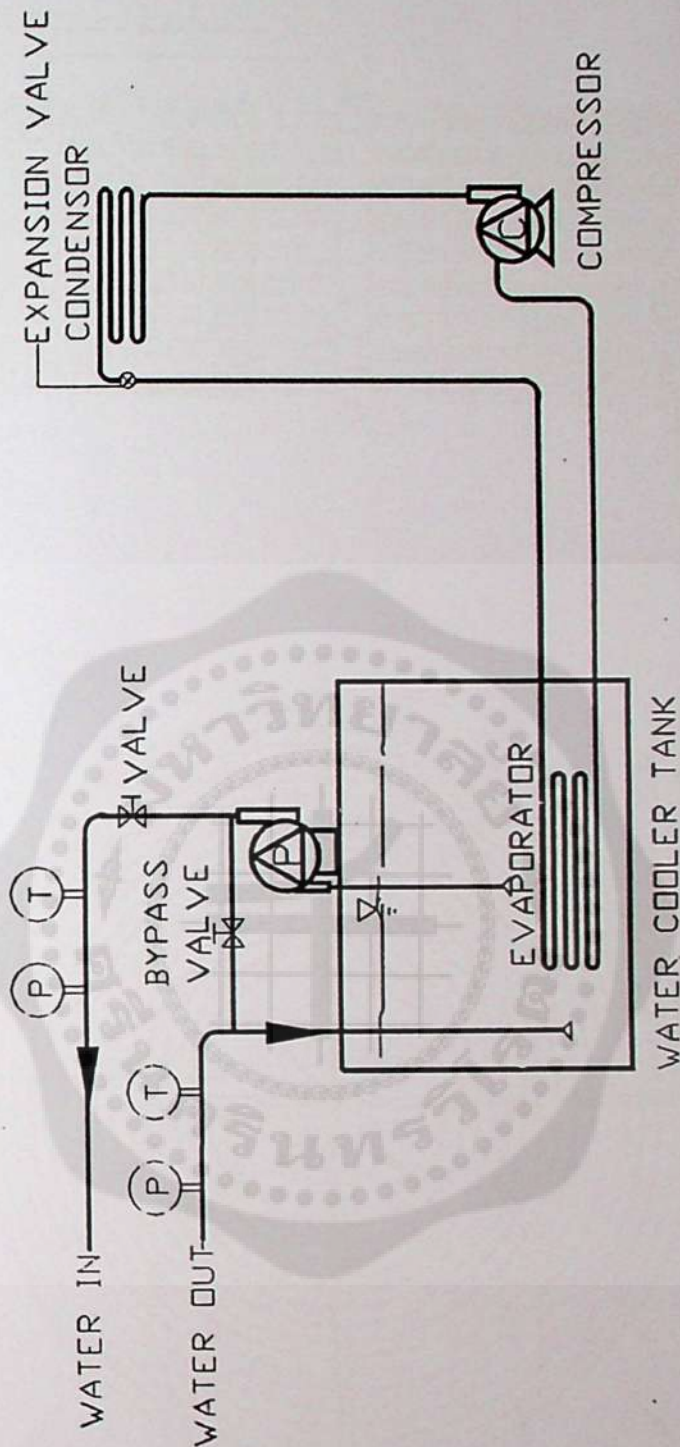




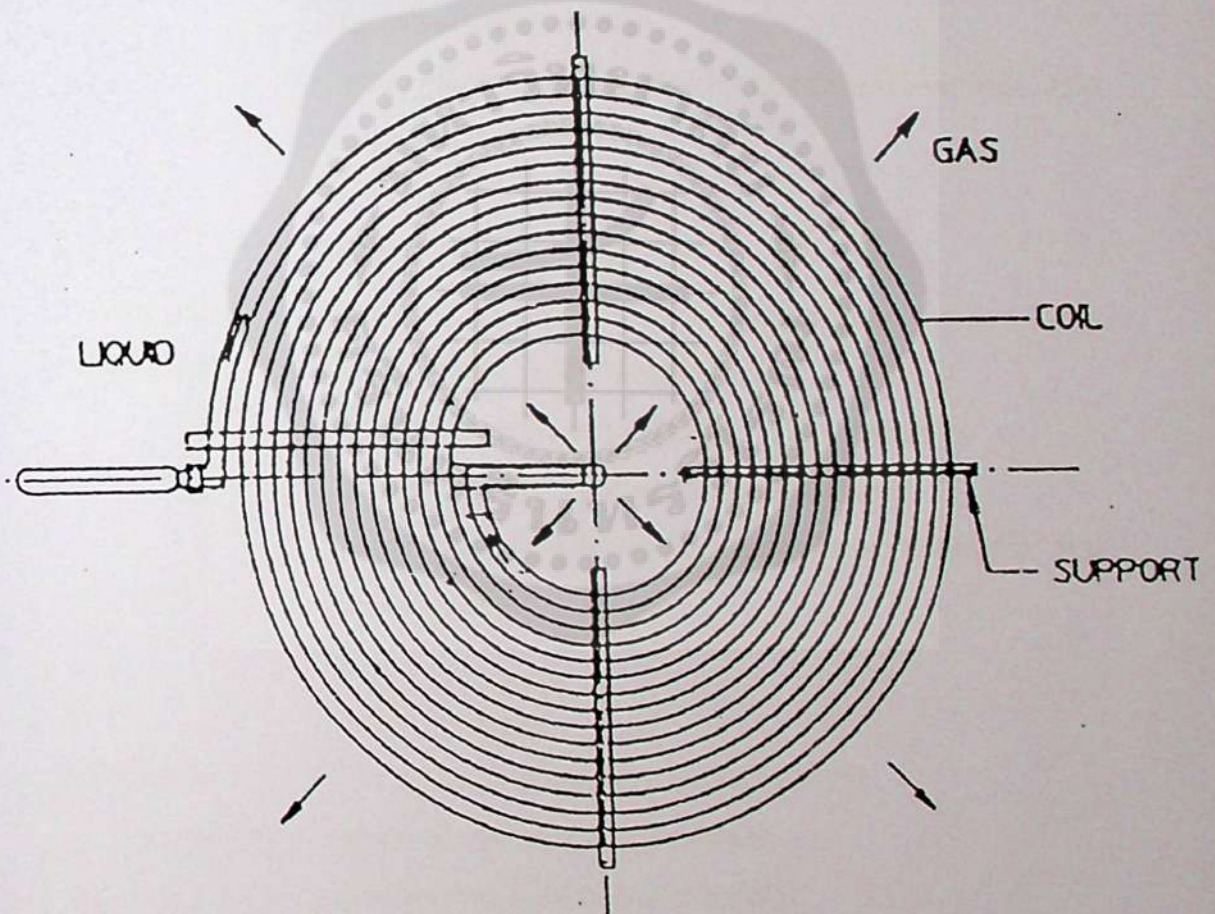
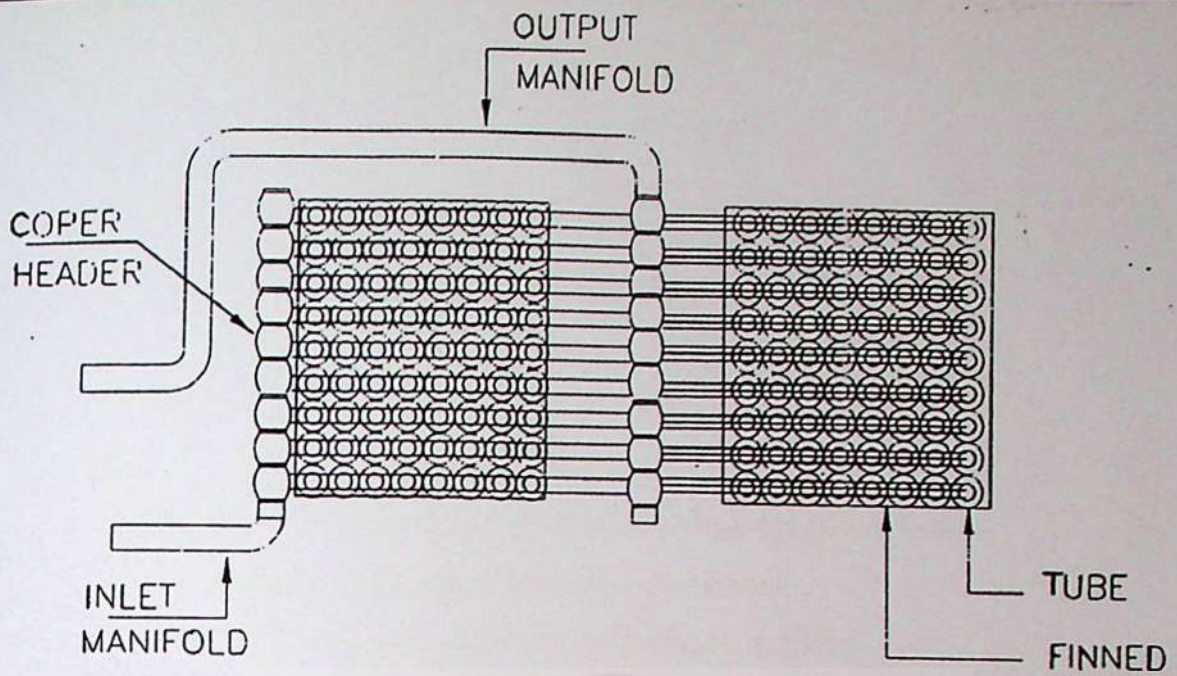
1	1	ไดอะแกรมการทำงานของอุปกรณ์, มิลลิเมตร			-	
ลำดับ	จำนวน	ชื่อ, ขนาด			มาตรฐาน	
ผู้เขียน	ผู้ตรวจ	ผู้อนุมัติ	ชื่อเพิ่ม	วันที่	มาตราส่วน	
นายพรประเสริฐ	นายประดิษฐ์	อ. ไพศาล		15/05/2001	1: 10	
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ			สมรรถภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบจลน์หอย			
			หมายเลขแบบ MT 2001-001	แก้ไขครั้งที่	แผ่นที่ 1	



3	1	โคอะแกรมการทำงานของอุปกรณ์, มิลลิเมตร			-	
ลำดับ	จำนวน	ชื่อ, ขนาด			มาตรฐาน	
ผู้เขียน นายพรประเสริฐ		ผู้ตรวจ นายประดิษฐ์	ผู้อนุมัติ อ. ไพศาล	ชื่อแฟ้ม	วันที่ 15/05/2001	มาตราส่วน 1: 10
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ				สมรรถภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดกันหอย		
				หมายเลขแบบ MT 2001-003		แก้ไขครั้งที่



3	1	ด้านข้าง และด้านบน , มิลลิเมตร			-	
ลำดับที่	จำนวน	ชื่อ , ขนาด			มาตรฐาน	
ผู้เขียน นายพรประเสริฐ เปื้องสูงเนิน	ผู้ตรวจ นายประคินธุ์ เชมรู้รัมย์	ผู้อนุมัติ อ. ไทศาล นาคผล	ชื่อแฟ้ม	วันที่ 15/05/2001	มาตรฐาน 1: 10	
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ		สมรรถภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบจลน์หอย				
		หมายเลขแบบ MT2001-003		แก้ไขครั้งที่	แผ่นที่ 3	



3	1	ด้านข้าง และด้านบน , มิลลิเมตร			-	
ลำดับที่	จำนวน				มาตรฐาน	
ผู้เขียน นายสมาน รักชื่อ		ผู้ตรวจ นายประคิษฐ์ เชนฐรัมย์	ผู้อนุมัติ อ. ไพศาล นามผล	ชื่อเพิ่ม	วันที่ 15/05/2001	มาตรฐาน 1: 10
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ			สมรรถภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดกันหอย			
			หมายเลขแบบ MT2001-002		แก้ไขครั้งที่	แผ่นที่ 3

ประวัติผู้จัดทำโครงการวิศวกรรมศาสตร์

1. ชื่อ นายประดิษฐ์ เชษฐรัมย์
ที่อยู่ปัจจุบัน 12 หมู่ 14 ต.ปราสาท กิ่ง อ. บ้านด่าน จ.บุรีรัมย์ 31000
ประวัติการศึกษา ประกาศนียบัตรวิชาชีพ สาขาช่างยนต์
จากวิทยาลัยเทคนิคบุรีรัมย์ 2537 จ.บุรีรัมย์
ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาช่างยนต์(สาขางานรองเครื่องทำ
ความเย็นและปรับอากาศ)
จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 2539
จ.นครราชสีมา
2. ชื่อ นายพรประเสริฐ เปื้องสูงเนิน
ที่อยู่ปัจจุบัน 90 หมู่ 5 ต. เสมอ อ. สูงเนิน จ. นครราชสีมา 30170
ประวัติการศึกษา ประกาศนียบัตรวิชาชีพ สาขาช่างยนต์
จากวิทยาลัยเทคนิคนครราชสีมา 2531 จ.นครราชสีมา
ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาช่างจักรกลหนัก
จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 2533
จ.นครราชสีมา
3. ชื่อ นายสมาน รักชื่อ
ที่อยู่ปัจจุบัน 115 หมู่ 6 ต. บ้านสา อ. แจ้ห่ม จ. ลำปาง 52120
ประวัติการศึกษา ประกาศนียบัตรวิชาชีพ สาขาช่างยนต์
จากวิทยาลัยเทคนิคลำปาง 2537 จ.ลำปาง
ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาช่างเทคนิคอุตสาหกรรม
จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคพายัพ 2539 จ. เชียงใหม่