การเพิ่มสมรรถนะอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม

Increasing Performance Shell and Tube Economizer Type Rectangular in Twisted

รศ. ดร.อุทัย ผ่องรัศมี

Assoc.Prof.Dr. Uthai Phongrasamee

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี

กุมภาพันธ์ 2557

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอการใส่แผ่นบิดอลูมิเนียมชนิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมในอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อที่ใช้ร่วมกับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว เพื่อศึกษาผลกระทบของการใส่แผ่นบิดต่อตัวแปรสมรรถนะทางความร้อนการประหยัดพลังงานและความเหมาะสมกับการลงทุน โดยการนำก๊าซร้อนทิ้งจากปล่องไอเสียของหม้อน้ำถ่ายโอนความร้อนให้แก่พื้นที่ผิวท่อ 3.55 ตารางเมตร ซึ่งท่อมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.033 เมตร ความยาวท่อ 34 เมตร ภายในท่อใส่แผ่นบิดอลูมิเนียมมีสัดส่วนการบิด (y/w) เท่ากับ 3 แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม แผ่นบิดมีพื้นที่รวม 0.56 ตารางเมตร ผลการวิจัยพบว่า ที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้ง 5 เมตรต่อวินาที ได้อัตราการถ่ายโอนความร้อนภายนอกและภายในท่อ 429 และ 212.85 กิโลวัตต์ มีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน 5,470 และ 24.82 วัตต์ต่อตารางเมตรองศาเซลเซียส มีความดันลด 28.77 และ 5.34 ปาสคาล และอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อมีสมรรถนะ 0.60 สามารถประหยัดพลังงานได้ 58,136.85 บาทต่อปี และมีระยะเวลาคืนทุน 2.6 ปี ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมกับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียวขนาดอัตราการผลิตไอน้ำ 500 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ที่ความดันใช้ไอน้ำไม่เกิน 7 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

คำสำคัญ : หม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว, อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม, การประหยัดพลังงานของหม้อน้ำ

Abstract

This article presents a study of the twisted rectangular-hole aluminums plate centered inside the shell-and-tube economizer for once-through boiler. The objective of this study aimed to measure the effect produced by the economizer with the plate inserted inside the tube, which enhanced heat transfer performance in terms of energy saving and payback period, or investment worthiness . The exhaust heat from once-though boiler tube was brought to transfer to the total 3.55 m^2 surface area of tube with 0.033 m diameter, 34 m in length, inserted with the twisted aluminums plate with the ratio of y/w = 3. The inserted plate had a rectangular hole area of 0.56 m^2. It was found that the designed economizer performed with 5 m/s feed speed, outer and inner tube's heat transfer ratio at 429 and 212.82 kW, heat transfer coefficient at 5,470 and 24.82 $W/m^{2o}C$, pressure drop at 28.77 and 5.34 Pa. The performance of the designed economizer was at 0.60, which could save the energy cost around 58,136.85 Baht/year and the payback was at 2.6 year period of investment. This condition is suitable for the once-through boiler that generates 500 kg/h steam rate with the maximum pressure of 7 $kg/cm.^2$

Keyword : Once - through boiler, Economizer shell and tube with twisted aluminums, Energy saving cost

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยการเพิ่มสมรรถนะอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และสถาบันวิจัยและส่งเสริมศิลปวัฒนธรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม และสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่สนับสนุนงบประมาณการวิจัย ครุภัณฑ์และวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้เป็นเครื่องมือการวิจัย จนทำให้วิจัยนี้สำเร็จตามวัตถุประสงค์ทุกประการ

อุทัย ผ่องรัศมี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(2)
Abstract	(3)
กิตติกรรมประกาศ	(4)
สารบัญ	(5)
สารบัญตาราง	(7)
สารบัญภาพ	(8)
สารบัญกราฟ	(10)
บทที่	
1 บทนำ	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
วัตถุประสงค์การวิจัย	3
ขอบเขตการวิจัย	3
นิยามศัพท์	5
ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย	6
2 งานวิจัยและทฤษฎีที่ใช้ในงานวิจัย	7
ผลงานวิจัยที่ผ่านมา	7
ทฤษฎีที่ใช้ในงานวิจัย	17
เทคนิคการไหลหมุนควง	50
ฟาล์วลิ่งแฟกเตอร์	52
การวิเคราะห์ความคุ้มค่าและการประหยัดพลังงาน	55
สรุปงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย	57
3 วิธีดำเนินการวิจัย	60
บทนำ	60
การออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม	61
การติดตั้งอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมร่วมกับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว	69

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

อุปกรณ์ประกอบการทดสอบ 72
วิธีการทดสอบ 74
การเก็บผลการทดสอบ 75
สมการวิเคราะห์ผลการทดสอบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม 77
การแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวแปร 81
การวิเคราะห์ความคุ้มค่าและการประหยัดพลังงาน 82
แนวทางการนำผลงานการวิจัยไปใช้ประโยชน์เพื่อประเมินสมรรถนะอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม 82
การเผยแพร่อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมให้แก่ภาคอุตสาหกรรม 83

4 ผลการออกแบบ และการวิเคราะห์ผลการทดสอบ 85
ผลการออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม 85
ผลกระทบที่เกิดจากการดูดความร้อนทิ้งต่อตัวแปรต่าง ๆ 87
การประหยัดพลังงานและความเหมาะสมการลงทุน 97

5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 101
สรุปผลการทดลอง 101
ข้อเสนอแนะ 102

บรรณานุกรม 103

ภาคผนวก 108
ภาคผนวก ก แบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อ 109
ภาคผนวก ข ตารางบันทึกผลการทดสอบงานวิจัย 119

ประวัติผู้วิจัย 130

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	แสดงเปอร์เซ็นต์ความร้อนที่สูญเสียออกจากปล่องไอเสียหม้อน้ำที่ใช้น้ำมันดีเซล	19
2.2	แสดงค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน	22
2.3	ความเร็วการไหลมาตรฐานของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน	27
2.4	ค่าคงที่สำหรับการถ่ายโอนความร้อนสำหรับอากาศไหลผ่านกลุ่มท่อตั้งแต่ 10 แถวขึ้นไป	38
2.5	ค่าแฟกเตอร์แก้ไข C_2 ของสมการสำหรับกลุ่มท่อน้อยกว่า 10 แถว ($N_2 < 10$)	39
2.6	ค่าคงที่สำหรับการไหลแบบตั้งฉากในกลุ่มท่อ	39
2.7	ค่าแฟกเตอร์แก้ไข C_2 ในกลุ่มท่อที่น้อยกว่า 20 แถว	40
2.8	ค่าฟาล์วลิ่งแฟกเตอร์สำหรับการใช้งานบางค่าของสมาคมผู้ผลิต	54
2.9	ค่าฟาล์วลิ่งแฟกเตอร์ของก๊าซ และไอชนิดต่าง ๆ	54
3.1	ผลการออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม	68
4.1	สรุปผลการออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม	86
4.2	เงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบ	87

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1.1	การออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อ	2
2.1	การสูญเสียพลังงานความร้อนของหม้อน้ำ	7
2.2	อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อขด	8
2.3	อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อ	9
2.4	แสดงการใช้หม้อน้ำรถยนต์เป็นอุปกรณ์นำความร้อนทิ้งกลับคืนในหม้อน้ำขนาดเล็ก	10
2.5	แสดงโรงจักรไฟฟ้าหลังติดตั้งอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อน	11
2.6	แสดงวงจรหม้อน้ำและวงจรน้ำป้อนพร้อมกับแสดงอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อน	12
2.7	(ก) ผังการทดลองชุดแลกเปลี่ยนความร้อน (ข) ท่อที่ติดตั้งแผ่นบิดที่ทางเข้าและแผ่นบิดแบบเต็มท่อ	15
2.8	ท่อทดสอบที่ติดตั้งแผ่นสกรูร่วมกับแผ่นบิด	16
2.9	ลักษณะของแผ่นบิดตามเกลียวท่อ	17
2.10	หม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียวชนิดท่อน้ำตั้ง	17
2.11	หม้อน้ำแบบหลอดน้ำชนิดท่อตั้งที่แสดงพื้นที่เก็บน้ำและไอน้ำ	18
2.12	แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบต่าง ๆ	24
2.13	อุณหภูมิการกลั่นตัวของกรดกำมะถัน	32
2.14	ลักษณะการจัดเรียงกลุ่มท่อแบบแถวเรียง	33
2.15	ลักษณะการจัดเรียงกลุ่มท่อแบบวางเยื้องกัน	34
2.16	รูปแบบการไหลข้ามทรงกระบอก	35
2.17	ความปั่นป่วนทำให้การแยกจากการไหลห่างออกไป	36
2.18	อุณหภูมิการไหลสวนทางกัน	41
2.19	การเสื่อมสลายของการไหลหมุนควงในท่อกลม	50
2.20	อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงที่ช่วงต้นท่อ	51
2.21	อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงและปั่นป่วนตลอดแนวการไหลผ่านท่อ	52
3.1	การออกแบบและสร้างอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อน (ส่วนท่อ)	63
3.2	แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมอยู่ภายในท่อ	64
3.3	การออกแบบและสร้างอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อน (ส่วนเปลือก)	65

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
3.4	การออกแบบและสร้างอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม	68
3.5	การติดตั้งอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือก และท่อ (Type *A*) ร่วมกับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว	69
3.6	การติดตั้งเครื่องดูดความร้อนทิ้งหลังจากที่ถ่ายโอนความร้อนให้แก่อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อน	70
3.7	ระบบถังน้ำป้อนให้แก่อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อน	71
3.8	ชุดควบคุมระบบหม้อน้ำ	72
3.9	อุปกรณ์วัดความเร็วความร้อนทิ้ง	73
3.10	เครื่องวิเคราะห์สมรรถนะหม้อน้ำ และอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อน	73
3.11	ขั้นตอนการทดสอบ	76

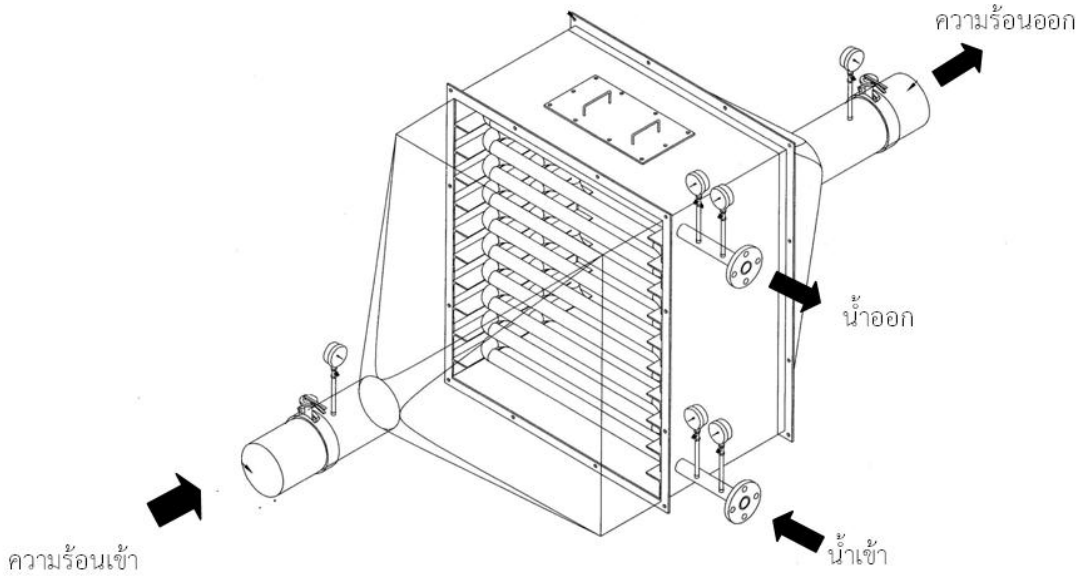
สารบัญกราฟ

ภาพที่		หน้า
2.1	แสดงความสัมพันธ์ $\%CO_2, \%O_2$ และ Excess Air สำหรับหม้อน้ำใช้น้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล	20
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายโอนความร้อน (ส่วนเปลือก) ต่อความเร็วดูดความร้อนทิ้ง	88
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน (ส่วนเปลือก) ต่อความเร็วดูดความร้อนทิ้ง	89
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดต่อความเร็วดูดความร้อนทิ้ง	90
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายโอนความร้อนต่อความเร็วการดูดความร้อนทิ้ง	92
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนภายในท่อต่อความเร็วดูดความร้อนทิ้ง	93
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดต่อความเร็วดูดความร้อนทิ้ง	94
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิผลอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อต่อความเร็วดูดความร้อนทิ้ง	95

บทที่ 1
บทนำ

1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

หม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว (Once - Through Boilers) เป็นหม้อน้ำขนาดเล็กที่มีอัตราการผลิตไอน้ำอยู่ระหว่าง 10 - 2,600 kg/h ที่ความดันการใช้ไอน้ำ 3 - 12 kg/cm^2 ในปัจจุบันหม้อน้ำชนิดนี้ได้รับการนิยมใช้ในภาคอุตสาหกรรมประมาณ 350 ลูก ข้อดีของหม้อน้ำชนิดนี้ สามารถผลิตไอน้ำได้รวดเร็ว ใช้เชื้อเพลิงที่มีซัลเฟอร์น้อย (ก๊าซแอลพีจีและน้ำมันดีเซล) และการซ่อมบำรุงไม่ต้องหยุดกระบวนการผลิต (ซ่อมเฉพาะลูก) ลักษณะการถ่ายโอนความร้อนจะเป็นแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว โดยจะถ่ายโอนความร้อนให้แก่พื้นผิวท่อเป็นลักษณะท่อน้ำตั้งแบบกรงกระรอก ซึ่งท่อน้ำส่วนล่างจะเป็นส่วนบรรจุน้ำ ส่วนบนของท่อจะเป็นส่วนเก็บไอน้ำ ความร้อนจะเกิดการสันดาปอยู่ส่วนบน (ตรงกลาง) จากการศึกษาผลงานวิจัย (อุทัย ผ่องรัศมี, 2556) การออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อสำหรับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว ที่มีอัตราการผลิตไอน้ำ 500 kg/h ที่ความดันการใช้ไอน้ำ 5 kg/cm^2 ผลการวิจัยพบว่า ด้านการออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อมีพื้นที่ผิวการถ่ายโอนความร้อน 3.55 m^2 ท่อมีความยาว 34 m ลักษณะการวางท่อเป็นแบบท่อเรียงแถว 5 แถวนอน 10 แถวตั้ง (จำนวน 50 กลับ) ลักษณะการไหลของความร้อนทิ้งไหลอยู่ในแนวตั้งฉากกับกลุ่มท่อผลการวิจัยพบว่า ด้านการวิเคราะห์สมรรถนะอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อใช้ร่วมกับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว มีสมรรถนะอยู่ระหว่าง 0.39 - 0.40 ที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้ง 7.20 - 7.65 m/s อุณหภูมิน้ำป้อนอยู่ระหว่าง 32 - 34 ^{o}C อุณหภูมิความร้อนทิ้งอยู่ระหว่าง 242 - 287 ^{o}C และอุณหภูมิน้ำป้อนที่ได้รับการถ่ายโอนความร้อนจากความร้อนทิ้งที่ปล่องไอเสียหม้อน้ำอยู่ระหว่าง 80 - 85 ^{o}C และด้านการประหยัดพลังงาน สามารถประหยัดพลังงานได้ 78,843.14 บาทต่อปี ระยะเวลาคืนทุน 2.66 ปี ดังภาพที่ 1.1



ภาพที่ 1.1 การออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อ

นอกจากนี้ยังสอดคลองกับงานวิจัย (ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์, 2547 : 3) ได้ใช้หม้อน้ำรถยนต์เป็นอุปกรณ์นำความร้อนทิ้งกลับคืนในหม้อน้ำขนาดเล็กแบบหลอดไฟที่มีอัตราการผลิตไอน้ำ 1, 2 และ 3 t/h ผลการวิจัยพบว่าสมรรถนะของหม้อไอน้ำสูงขึ้น สามารถลดการใช้พลังงานลงได้ 18,500, 83,000 และ 100,000 บาท/ปี มีระยะเวลาคืนทุน 2.5, 1.23 และ 0.9 ปี ตามลำดับ ส่วนผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากการใช้เชื้อเพลิงขึ้นอยู่กับจำนวนของหม้อน้ำรถยนต์กับขนาดของหม้อน้ำ

จากการศึกษางานวิจัยพบว่า ข้อเสนอแนะผลจากการวิจัยกล่าวว่าต้องการเพิ่มสมรรถนะอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนให้สูงขึ้น จะต้องเพิ่มพื้นที่การถ่ายโอนความร้อนให้แก่ของเหลวที่อยู่ภายในท่อ ดังนั้นจึงนำมาสู่การวิจัย อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม โดยมีคำถามการวิจัยว่า **“อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมมีสมรรถนะเท่าใด”** ในการใส่แผ่นบิดแบบตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม เพราะต้องการให้ของเหลวที่อยู่ภายในท่อเกิดการหมุนควง ซึ่งแผ่นบิดใช้วัสดุเป็นอลูมิเนียมที่มีลักษณะการบิดมีทิศทางตามเข็มนาฬิกาตรงกลางตัดเป็นสี่เหลี่ยมเพื่อดูพฤติกรรมการถ่ายโอนความร้อน ค่าตัวประกอบและสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายโอนความร้อน ค่าตัวประกอบ และสมรรถนะการเพิ่มการถ่ายโอนความร้อน เพื่อที่จะนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์และนำไปประยุกต์ใช้กับการพัฒนาทางอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมสำหรับหม้อน้ำขนาดเล็กต่อไป

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

การวิจัยมีเป้าหมายเพื่อการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ต้นแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม โดยนำความร้อนทิ้งจากปล่องไอเสียของหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียวมาเพิ่มอุณหภูมิให้แก่น้ำที่อยู่ภายในท่อก่อนน้ำจะเข้าสู่หม้อน้ำ ซึ่งมีวัตถุประสงค์การวิจัย ดังนี้

2.1 เพื่อออกแบบ สร้าง และทดสอบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม

2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบความเร็วของความร้อนทิ้งที่ออกจากอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมต่อตัวแปรต่างๆ ดังนี้

2.2.1 อัตราการถ่ายโอนความร้อน

2.2.2 ความดันลด

2.2.3 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน

2.2.4 ประสิทธิผลการถ่ายโอนความร้อน

2.3 เพื่อศึกษาความเหมาะสมการลงทุนและการประหยัดพลังงาน

3. ขอบเขตการวิจัย

ผู้วิจัยทำการออกแบบ การสร้าง การทดสอบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นรูปสี่เหลี่ยม ตามระบบการแลกเปลี่ยนความร้อน ทำการวิเคราะห์สมรรถนะทางความร้อนของอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นรูปสี่เหลี่ยม วิเคราะห์ความเหมาะสมการลงทุนและการประหยัดพลังงาน ซึ่งมีรายละเอียดของเขตการวิจัยดังนี้

3.1 ออกแบบและสร้างอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นรูปสี่เหลี่ยมที่สามารถนำความร้อนทิ้งจากปล่องไอเสียหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียวที่ใช้งานจริง ซึ่งมีอัตราการผลิตไอน้ำไม่เกิน 500 kg/h โดยพิจารณาองค์ประกอบตัวแปร ดังนี้

3.1.1 อุณหภูมิความร้อนทิ้งที่ออกจากปล่องไอเสียหม้อน้ำที่เข้าไปในอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อน

3.1.2 อุณหภูมิความร้อนทิ้งที่ออกจากอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อน

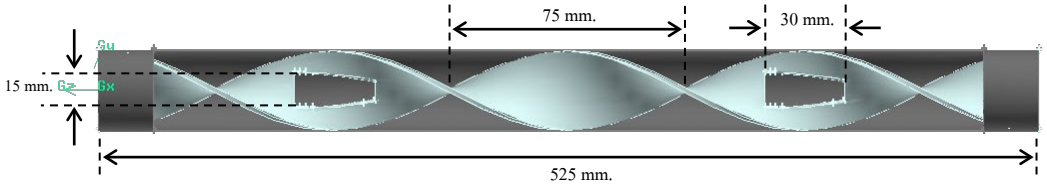
3.1.3 อุณหภูมิน้ำป้อนเข้าอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อน

3.1.4 อุณหภูมิน้ำป้อนที่ออกจากอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อน

3.1.5 อัตราส่วนมวลของน้ำ

3.1.6 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนของน้ำ

3.1.7 สัดส่วนของแผ่นบิด



3.1.8 ขนาดพื้นที่สี่เหลี่ยมของแผ่นบิด

3.2 ทดสอบสมรรถนะอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม ที่สร้างขึ้นโดยมีเงื่อนไข

3.2.1 อัตราส่วนมวลของน้ำป้อน

3.2.2 อุณหภูมิของน้ำป้อน

3.2.3 อุณหภูมิของความร้อนทิ้ง

3.2.4 อัตราส่วนมวลของความร้อนทิ้ง

3.2.5 ความดันไอน้ำของหม้อน้ำ

3.2.6 ความเร็วดูดความร้อนทิ้ง

3.3 ตัวแปรอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อ

3.3.1 ตัวแปรต้น

1) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ
2) หม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว
3) ความเร็วดูดความร้อนทิ้ง
4) แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม

3.3.2 ตัวแปรตาม

1) อัตราส่วนการถ่ายโอนความร้อน ภายในเปลือกและท่อ
2) ความดันลดภายในเปลือกและท่อ
3) สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน ภายในเปลือกและท่อ
4) ประสิทธิผลอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อ

3.4 ความเหมาะสมการลงทุน การประหยัดพลังงานและเผยแพร่ให้แก่ภาคอุตสาหกรรม

3.4.1 ต้นทุนการผลิตอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อ

3.4.2 ระยะเวลาคืนทุน

3.4.3 การประหยัดพลังงาน

4. นิยามศัพท์

4.1 หม้อน้ำ (Boiler) หมายถึง ภาชนะปิดสำหรับบรรจุน้ำที่มีปริมาณความจุเกิน 2 ลิตร ขึ้นไป เมื่อได้รับความร้อนจากการสันดาปของเชื้อเพลิงหรือแหล่งพลังงานความร้อนอื่น น้ำจะเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอน้ำภายใต้ความดันมากกว่า 1.5 เท่า ของความดันบรรยากาศปกติที่ระดับน้ำทะเล หรือภาชนะปิดสำหรับบรรจุน้ำซึ่งใช้ในการผลิตน้ำร้อนที่มีพื้นที่ผิวความร้อนตั้งแต่ 8 m^2 ขึ้นไป

4.2 หม้อน้ำขนาดเล็ก หมายถึง หม้อน้ำที่มีอัตราการผลิตไอน้ำระหว่าง 10 - 2,600 kg/h

4.3 ก๊าซร้อนทิ้งแบบไหลผ่านทางเดียวหมายถึง ความร้อนที่เกิดจากการสันดาปของเชื้อเพลิง (ดีเซล) กับอากาศ ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นจะถ่ายโอนความร้อนให้แก่หม้อน้ำแบบท่อน้ำ (แบบกรงกระรอก) จากส่วนบนลงล่างแล้วความร้อนจึงปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งอุณหภูมิก๊าซร้อนจะสูงกว่าอุณหภูมิน้ำในหม้อน้ำประมาณ 35 °C

4.4 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ (Shell and Tube Exchanger) หรืออุปกรณ์อุ่นน้ำป้อน (Economizer) หมายถึง เครื่องมือใด ๆ ที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลที่มีระดับพลังงาน ความร้อน (อุณหภูมิ) แตกต่างกัน 2 ชนิด (วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล, 2536 : 1)

4.5 แผ่นบิด หมายถึง แผ่นบิดที่ทำจากวัสดุอลูมิเนียมที่มีสัดส่วนการบิดความกว้างต่อความยาว (7.62/2.54 cm)

4.6 รูปสี่เหลี่ยม หมายถึง พื้นที่ของแผ่นบิดที่ถูกตัดมีสัดส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้าง (2.5/1.5 cm) ที่มีพื้นที่ 0.036 m^2 ต่อช่วงบิด

4.7 เลขเรย์โนลดส์ (Reynolds Number, Re_s, Re_t) หรือตัวเลขไร้หน่วย หมายถึง สัดส่วนของความเร็วการไหลกับเส้นผ่านศูนย์กลางท่อต่อค่าความหนืดของของไหล ณ อุณหภูมิคงที่ ตัวเลขที่ได้จะบอกลักษณะการไหลว่าเป็นแบบราบเรียบ, เปลี่ยนแปลงหรือปั่นป่วน

4.8 เลขนัสเซลท์ (Nusselt Number, , Nu_s, Nu_t) หรือตัวเลขไร้หน่วย หมายถึง คุณสมบัติของสารตัวกลางที่เกี่ยวข้องกับเลขเรย์โนลดส์กับเลขแพรนด์ทัลและความหนืดสัมบูรณ์ภายในท่อต่อความหนืดสัมบูรณ์ภายนอกท่อ

4.9 ความดันลด (Pressure Drop, ΔP_s, ΔP_t) หมายถึง แฟกเตอร์ตัวประกอบที่เกิดขึ้นจากความเสียดทานภายในท่อและภายนอกท่อ

4.10 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน (Coefficient of Performance, h_i, h_o) หมายถึง ความสามารถของวัสดุที่ใช้ในการถ่ายโอนความร้อนภายในท่อและภายนอกท่อ

4.11 อัตราการถ่ายโอนความร้อน (Heat Exchanger Flow Rate, $\dot{Q}_s$,$\dot{Q}_t$) หมายถึง อัตราการไหลของความร้อนทิ้งภายในเปลือกและอัตราการไหลของน้ำภายในท่อ เมื่อเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนขึ้น

4.12ประสิทธิผล (Effectiveness, ε) หมายถึง สัดส่วนของอัตราการถ่ายโอนความร้อนภายในเปลือกและท่อต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนสูงสุด ของอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อ

5. ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

5.1 ได้เครื่องต้นแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม สำหรับหม้อน้ำแบบให้ความร้อนไหลผ่านทางเดียวที่มีอัตราการผลิตไอน้ำระหว่าง 10-2,600 kg/h

5.2 ลดการใช้พลังงาน(เชื้อเพลิง) ซึ่งเป็นผลต่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น

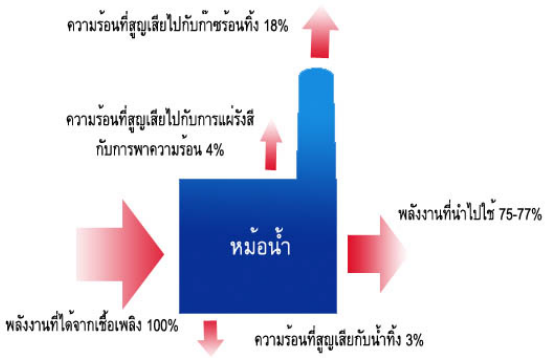
5.3 อุณหภูมิความร้อนทิ้งที่ปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมลดลงเป็นการลดภาวะโลกร้อน

5.4 อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม จดสิทธิบัตรหรืออนุสิทธิบัตร (ด้านสิ่งประดิษฐ์)

บทที่ 2
งานวิจัยและทฤษฎีที่ใช้ในงานวิจัย

1. ผลงานวิจัยที่ผ่านมา

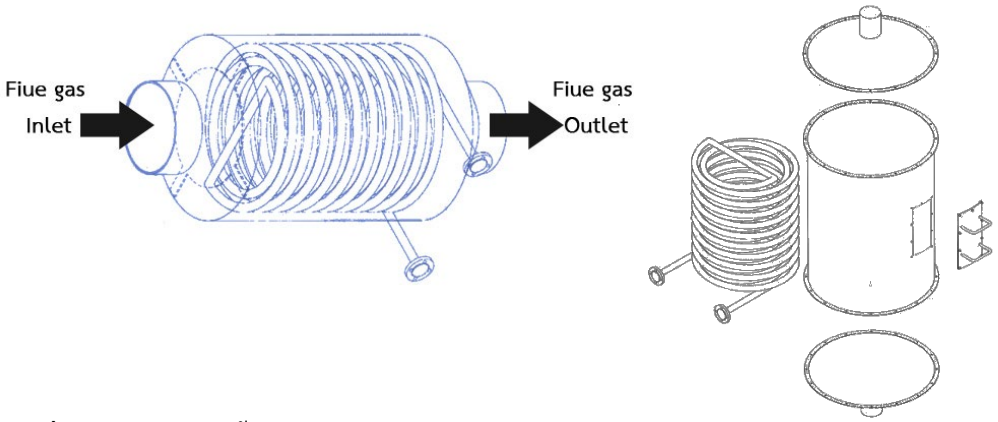
การสูญเสียความร้อนของระบบหม้อน้ำในภาคอุตสาหกรรม สามารถแบ่งประเภทการสูญเสียความร้อนได้ดังนี้ 1) การสูญเสียความร้อนจากการปล่อยน้ำร้อนทิ้ง 2) การสูญเสียความร้อนในระบบหม้อน้ำที่เกิดขึ้นจากการแผ่รังสีความร้อนและการพาความร้อน และ 3) การสูญเสียความร้อนที่ปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม ดังภาพที่ 2.1 ซึ่งที่ผ่านมามีนักวิจัยได้ทำการศึกษาการนำความร้อนทิ้งจากการปล่อยน้ำร้อนทิ้ง และการนำความร้อนทิ้งที่ปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม (ก๊าซร้อนทิ้งที่ปล่องไอเสีย) มาใช้อุ่นน้ำป้อนให้น้ำที่ใช้ในหม้อน้ำ โดยนำความร้อนทิ้งมาผ่านอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อน (Economizers) เพื่อให้การใช้พลังงานอย่างประหยัดและมีประสิทธิภาพ ซึ่งในปัจจุบันพบว่า มีรูปแบบการพัฒนาเพื่อการเพิ่มสมรรถนะอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนให้มีสมรรถนะสูงขึ้น โดยอาศัยทฤษฎีการถ่ายโอนความร้อน เช่น วิธีการเพิ่มการถ่ายโอนความร้อนที่ต้องการแหล่งพลังงานจากภายนอกมากระทำ เพื่อใช้ในการเพิ่มสมรรถนะการถ่ายโอนความร้อนให้แก่อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนเพิ่มขึ้น ซึ่งมีงานวิจัยเชิงประยุกต์ที่ได้ศึกษาดังนี้



ภาพที่ 2.1 ระบบการสูญเสียความร้อนของหม้อน้ำ
(M.Gobbi, 2554 : 12)

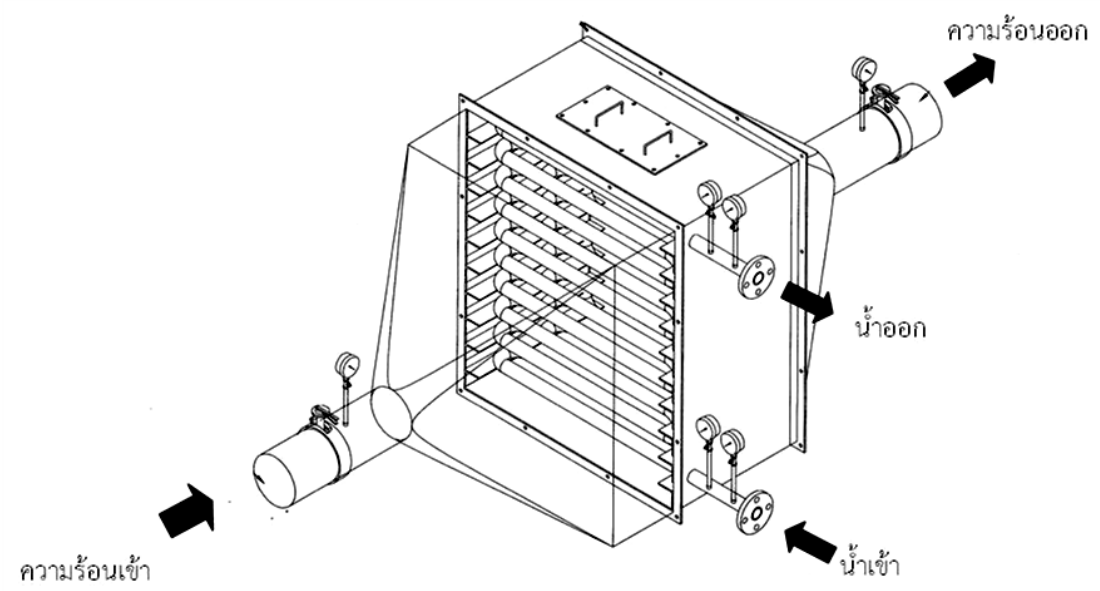
อุทัย ผ่องรัศมี (2554) ได้ออกแบบ สร้าง และทดสอบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อขดที่ใช้ร่วมกับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว ซึ่งมีพื้นที่การถ่ายโอนความร้อน 3.35 m^2 ท่อขดมีความยาว 34 m โดยการขดท่อซ้อนกัน จำนวน 2 วงกลม ท่อมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมนอก

64.5 cm และขนาดของวงกลมใน 54.5 cm มีความสูง 72.6 cm ส่วนเปลือกออกแบบเป็นรูปทรงกระบอก มีพื้นที่ผิว 54.42 cm^2 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 74.50 cm สำหรับบรรจุความร้อนทิ้งเพื่อการถ่ายโอนความร้อนทิ้งให้แก่น้ำที่อยู่ภายในท่อขด ความร้อนทิ้งจะไหลอยู่ในแนวตั้งฉากกับท่อขด (ภาพที่ 2.1) ผลการวิเคราะห์สมรรถนะอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อขด พบว่า ที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้ง 5.33 m/s มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนภายนอกและภายใน 54.42 $W/m^{2o}C$ และ 0.89 $W/ m^{2o}C$ ค่าความดันลด 87.42 Pa และ 0.65 Pa อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อขดมีสมรรถนะ 0.36 ก่อนการติดตั้งอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อขดสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงดีเซล 32.5 L/h หลังการติดตั้งอุปกรณ์อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อขดสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 31.01 L/h ซึ่งสามารถประหยัดพลังงานเชื้อเพลิงดีเซลได้ 1.49 L/h



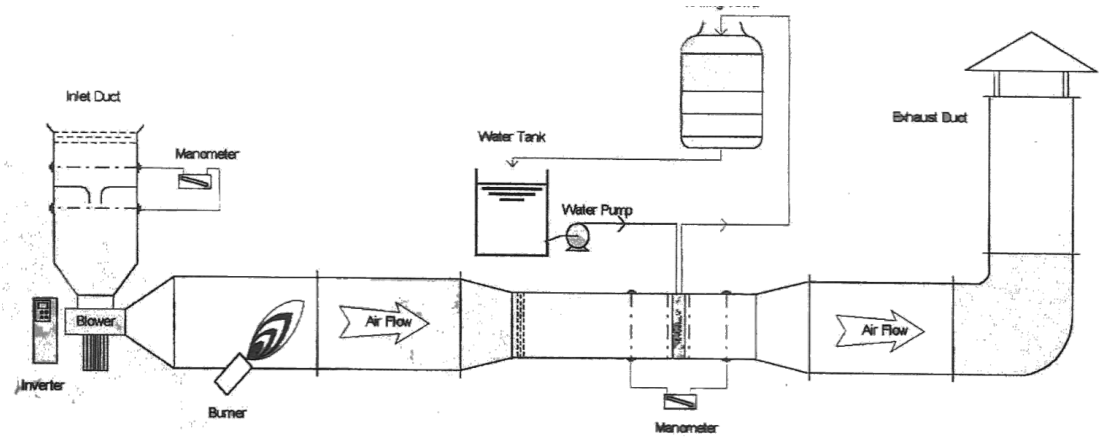
ภาพที่ 2.2 อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อขด

ต่อมาอุทัย ผ่องรัศมี (2555) ได้ออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อที่ใช้ร่วมกับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว ซึ่งมีพื้นที่ผิวการถ่ายโอนความร้อนของท่อ 3.55 m^2 ท่อมีความยาว 34 m การวางท่อเป็นแบบท่อเรียงแถว 5 แถวนอน 10 แถวตั้ง (จำนวน 50 กลับ) ระยะห่างระหว่างท่อแกนนอน 7.20 cm และแกนตั้ง 7.6 cm ส่วนออกแบบเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมมีพื้นที่ผิวสำหรับความร้อนทิ้ง 5.60 m^2 ความร้อนทิ้งไหลอยู่ในแนวตั้งฉากกับท่อเรียงแถวดังภาพที่ 2.3 ผลการวิจัยพบว่าที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้ง 7.65 m/s มีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนภายนอกและภายในท่อ 33.42 $W/m^{2o}C$ และ 5.71 $W/m^{2o}C$ ความดันลด 259 Pa และ 2.27 Pa และอุปกรณ์น้ำป้อนแบบเปลือกและท่อมีสมรรถนะ 0.40 ส่วนด้านความคุ้มค่าด้านการประหยัดพลังงาน ก่อนการติดตั้งอุปกรณ์น้ำป้อนแบบเปลือกและท่อ สิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง 32.50 L/h หม้อน้ำขนาดอัตราการผลิตไอน้ำ 500 kg/h หลังติดตั้งอุปกรณ์น้ำป้อนแบบเปลือกและท่อ สิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง 31.5 L/h สามารถประหยัดเชื้อเพลิงได้ 1.45 L/h



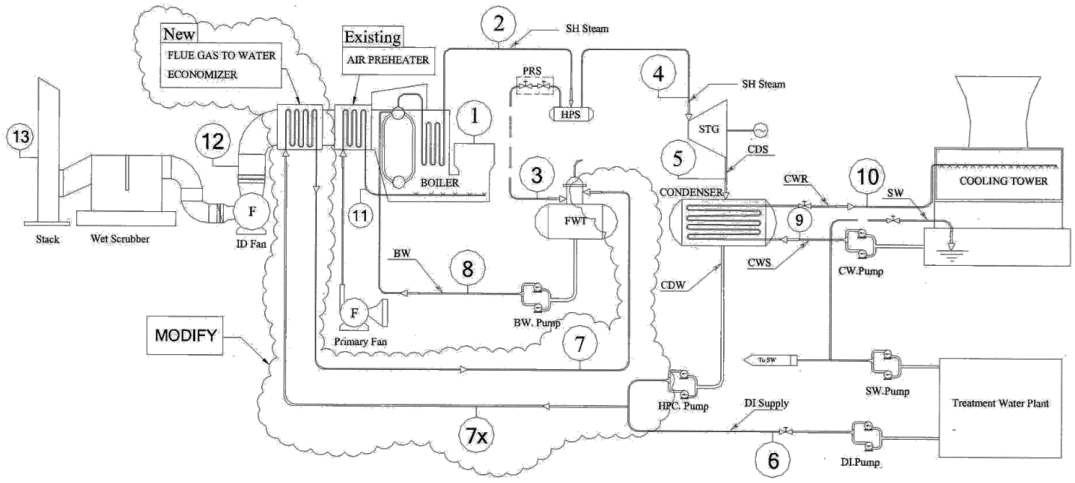
ภาพที่ 2.3 อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อ

นอกจากนี้ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ (2547) ได้ศึกษาการใช้หม้อน้ำรถยนต์เป็นอุปกรณ์นำความร้อนทิ้งกลับคืนในหม้อน้ำขนาดเล็ก ศึกษาเฉพาะหม้อน้ำแบบหลอดไฟ ขนาด 1, 2 และ 3 t/h ของภาคอุตสาหกรรมในเขตภาคเหนือ โดยใช้หม้อน้ำรถยนต์ขนาด 0.21 m □ 0.22 m บรรจุน้ำแล้วให้ก๊าซร้อนวิ่งผ่านเพื่อให้น้ำเกิดความร้อนวัตถุประสงค์ของการวิจัยในครั้งนี้เพื่อศึกษาสมรรถนะของหม้อน้ำ การลดการใช้พลังงาน และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง ผลของการวิจัยพบว่า การนำหม้อน้ำรถยนต์ขนาด 0.21 m □ 0.22 m ใช้เป็นอุปกรณ์การนำความร้อนทิ้งกลับคืนในหม้อน้ำขนาดเล็ก จำนวน 3 เครื่อง ขนาด 1, 2 และ 3 t/h จะช่วยทำให้สมรรถนะโดยรวมของหม้อไอน้ำสูงขึ้น ลดการใช้พลังงานสูงได้จำนวน 18,500 Baht/y (ระยะเวลาคืนทุน 2.35 y), 23,000 Baht/y (ระยะเวลาคืนทุน 2.23 y) และ 100,000 Baht/y (ระยะเวลาคืนทุน 0.9 y) ตามลำดับ และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากการใช้เชื้อเพลิง จะขึ้นอยู่กับจำนวนหม้อน้ำรถยนต์กับขนาดหม้อน้ำ และสมการคำนวณสมรรถนะหม้อน้ำรถยนต์ สามารถใช้สมการถ่ายโอนความร้อนแบบของไหลตั้งฉาก



ภาพที่ 2.4 แสดงการใช้หม้อน้ำรถยนต์เป็นอุปกรณ์นำความร้อนทิ้งกลับคืนในหม้อน้ำขนาดเล็ก

ต่อมาสมเกียรติ บุญณสะ (2548) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของประสิทธิภาพของระบบการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ โดยใช้อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนเพื่อการลดต้นทุนของการผลิตไฟฟ้าที่ใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง โรงจักรไฟฟ้ามีกำลังการผลิตเฉลี่ยประมาณ 6.1 MW (61%) หลักการวิเคราะห์ใช้หลักสมดุลมวล และพลังงาน ข้อมูลที่ใช้วิเคราะห์ได้แก่ อุณหภูมิ อัตราการไหล ความดัน อุณหภูมิของความร้อนทิ้งจากปล่องไอเสีย 24 °C (ความร้อนสูญเสีย 13.75%) เพื่อลดการสูญเสียจึงได้ติดตั้งอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนโดยใช้ความร้อนจากปล่องไอเสียมาถ่ายโอนความร้อนให้แก่น้ำในอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อน ในการวิจัยนี้ เพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของระบบนำความร้อนทิ้งกับราคาต้นทุนการผลิตไฟฟ้า และประสิทธิภาพของระบบผลิตไอน้ำ ซึ่งก่อนการติดตั้งอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนมีประสิทธิภาพ 12.7 % และต้นทุนการผลิตไฟฟ้าอยู่ที่ 18.7 Baht/kW.h หลังการติดตั้งอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนพบว่าระบบมีประสิทธิภาพในการนำความร้อนกลับ 67% ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพรวมของระบบเพิ่มขึ้น 1.12 เท่า และสามารถลดต้นทุนการผลิตไฟฟ้าได้ 0.79 Baht/kW.h ซึ่งทำให้โรงไฟฟ้าประหยัดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานได้ถึง 10.54 MW/y และเมื่อติดตั้งอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนมีระยะเวลาคืนทุนประมาณ 0.5 y และลดความร้อนสูญเสียจากความร้อนทิ้งสู่สิ่งแวดล้อมลงได้ 45.3%

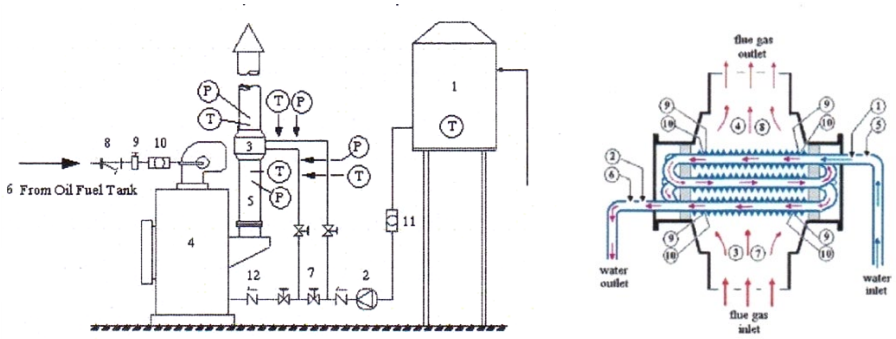


ภาพที่ 2.5 แสดงโรงจักรไฟฟ้าหลังติดตั้งอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อน

ต่อมา จตุรงค์ สมตระกูล (2550) ได้ทำการศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของระบบความร้อนทิ้งกลับคืน โดยได้จัดกลุ่มท่อติดครีบสี่ด้าน วางในแนวเดียวกัน และถ่ายโอนความร้อนระหว่างน้ำกับก๊าซ CO_2 ที่ไหลภายในท่อ และน้ำไหลภายในเปลือกสี่เหลี่ยม ซึ่งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ออกแบบเป็นชุดท่อใช้วัสดุทองแดงจำนวน 10 ท่อ วางเรียงในแนวเดียวกัน 2 แถว 5 กลับ โดยมีค่า Full text (*ST*) เท่ากับ7.5 mm ท่อทองแดงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 12.8 mm และภายใน 11.10 mm หนา 1.70 mm ท่อมีความสูง 30 cm ครีบยาว 20 mm ยาว 56 cm สูง 26 cm หนา 1 mm ส่วนเปลือกมีขนาด 20 cm ยาว 56 cm สูง 57 cm การทดลองใช้ก๊าซ CO_2 ที่อัตรา 0.002 kg/s, 0.01 kg/s และ 0.012 kg/s และน้ำที่อัตรา 0.005 kg/s, 0.02 kg/s และ 0.035 kg/s อุณหภูมิน้ำที่ 29 °C และ 43 °C ผลจากการศึกษาพบว่า น้ำที่อัตราการไหลเชิงมวล 0.005 kg/s และก๊าซ CO_2 ที่อัตราการไหลเชิงมวล 0.012 kg/s ได้น้ำที่ทางออกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งมีอุณหภูมิต่ำสุด 19.3 °C

ต่อมา ประดิษฐ์ เทอดทูล และคณะ (2543) ได้ศึกษา ออกแบบและสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนสำหรับหม้อน้ำสำเร็จรูปกำลังผลิตน้ำไม่เกิน 1 t/h เพื่อดึงความร้อนสูญเสียจากปล่องควันหม้อไอน้ำกลับคืน โดยมีเป้าหมายที่จะอนุรักษ์พลังงานในอุตสาหกรรมไทย ซึ่งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ศึกษานี้จะแบ่งเป็น 2 ชนิดด้วยกันคือ อุปกรณ์อุ่นอากาศแบบเทอร์โมไซฟอนและอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเทอร์โมไซฟอน เริ่มงานวิจัยโดยตรวจวัดข้อมูลหม้อไอน้ำของสถานประกอบการ 2 แห่ง ในจังหวัดเชียงใหม่ (โรงแรมและโรงอบไม้) เพื่อนำมาเป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบ ได้สร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับออกแบบที่เหมาะสมที่สุดโดยอ้างอิงจากแนวทางการคำนวณของ *ESDU.* หมายเลข 81038. และโปรแกรมจำลองสภาพการทำงานที่สภาวะคงตัว

และสภาวะแปรเปลี่ยน โดยใช้ภาษา Turbo Pascal Version 7.0 เขียน เมื่อใช้ข้อมูลที่ทำการตรวจวัดมาประกอบกับโปรแกรมที่สร้างขึ้นจะสามารถออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนทั้ง 2 ชนิดได้ โดยกำหนดให้อุณหภูมิความร้อนขาออกนั้นสูงกว่าอุณหภูมิน้ำค้างของความร้อนเพื่อลดปัญหาการกัดกร่อน ทำกาสร้างและทดสอบหาสมรรถนะของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนทั้ง 2 ประเภทในห้องปฏิบัติการ พบว่ามีอัตราการดึงความร้อนสูญเสียได้สูง (12.5 และ 8.7 kW) มีค่าประสิทธิผลทางความร้อนใกล้กับที่ออกแบบไว้ (0.45 และ 0.33) โดยมีความดันตกคร่อมน้อยมาก (7 และ 11 Pa) ในเชิงเศรษฐศาสตร์พบว่ามีค่าช่วงเวลาคุ้มทุนสั้น (1012 และ 1490 วัน) และมีค่า *IRR* สูง (28 และ 13%) เมื่อเทียบกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนทั่วไป (ช่วงเวลาคุ้มทุน 1505 วัน *IRR* 21%) และเมื่อทำการแปรเปลี่ยนเงื่อนไขต่าง ๆ พบว่าสมรรถนะของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนใกล้กับที่จำลองสภาพไว้ หลังจากนั้นได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องอุ่นน้ำป้อนที่เหมาะสมให้กับเครื่องยนต์ดีเซลขนาด 1 MW ของโรงไฟฟ้าดีเซลแม่ฮ่องสอน การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เมื่อนำไปทดสอบจริงกับเครื่องยนต์พบว่าได้ค่าสมรรถนะใกล้กับที่คำนวณไว้ (51.7 kW) ซึ่งแสดงว่าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนนี้มีความเหมาะสมที่จะใช้เพื่อดึงความร้อนสูญเสียในอุตสาหกรรมไทยเนื่องจากค่าสมรรถนะทางความร้อนสูงกว่าและมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ มากกว่า



ภาพที่ 2.6 แสดงวงจรหม้อน้ำและวงจรน้ำป้อนพร้อมกับแสดงอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อน

นอกจากนี้ยังมีนักวิจัยต่างประเทศที่ได้ศึกษา เช่น L. Cabeza - Gome. Etal (2549 : 6) ทำการวิจัย การจัดเรียงของการไหลอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตัดกัน ในปัจจุบันสามารถนำมาใช้กับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบกะทัดรัด ซึ่งส่วนมากจะใช้กับอุตสาหกรรมเครื่องเย็นและอุตสาหกรรมรถยนต์ ในการศึกษาจะใช้ของไหลสองชนิดเป็นการไหลสวนทางตัด ประเด็นที่สนใจคือ การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ทางความร้อน จำนวนหลายค่าได้แก่ ค่าอัตราความจุความร้อน ค่า *NTU* และรูปแบบการผันกลับของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน โดยค่านี้สร้างจากค่าพารามิเตอร์

ได้แก่ อุณหภูมิทางเข้า และค่าความจุความร้อนที่ค่า *NTU* ต่าง ๆ ผลจากการศึกษาพบว่า สามารถเพิ่มประสิทธิผลทางความร้อน และมีการสร้าง เอนโทรปีน้อยตามขอบเขตการทดลองในช่วงระยะเวลาการทดลอง

สอดคล้องกับงานวิจัยของ Y.Suzue K. Morimoto Etal (2549 : 10) ทำการวิจัย อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสมรรถนะสูงด้วยการใช้ผนังแผ่คลื่นลาดเอียง ในการศึกษาใช้สมการ และการจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีพื้นที่ผิวของผนังที่มีลักษณะเป็นผิวลาดเอียง เพื่อพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และได้มีการศึกษาผลกระทบของลักษณะรูปทรงทางเรขาคณิตเพื่อใช้ประกอบการออกแบบท่อกลม (Duct) ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบกะทัดรัด (Complex Heat Exchanger) โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่มีพื้นที่ผิวของผนังที่มีลักษณะเป็นผิวลาดเอียง จะมีความสัมพันธ์ และเพิ่มตามค่า Reynolds Number ที่ค่าความสูงของคลื่น และค่าความเร็วเฉลี่ยในขณะที่ค่าของแฟกเตอร์ j/f มีค่าอิ่มตัว เมื่อ Reynolds Number เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของ Pressure Dray

และ M. Akyurt, Etal (2553 : 14) ทำการวิจัยแบบจำลองการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้โดยการหมุนเปลี่ยนน้ำในท่อเหล็ก โดยการนำระบบความร้อนทิ้งมาใช้ประกอบด้วยการหมุนวนความร้อนแบบธรรมชาติสองสถานะ ซึ่งรับความร้อนจากปล่องไอเสียของระบบกังหันก๊าซแล้วส่งไปยังเครื่องผลิตไอของเครื่องสร้างความเย็นแบบดูดกลับแอมโมเนียกับน้ำ (Absorption Chillex : NH_3 - H_2O) และได้ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิน้ำ การทำงาน และรูปทรงของการระเหย (Evaporator) ต่อประสิทธิภาพของระบบ ซึ่งสามารถแก้ไขข้อเสียของการใช้ท่อความร้อนแบบทองแดง ได้อีกทั้งระบบท่อความร้อนชนิดเหล็กยังเป็นระบบที่ง่ายราคาต่ำ และยังมีสมรรถนะที่ดีกว่า

Dupe et.el (1996) ได้ทำการสร้างอุปกรณ์อุ่นอากาศจำลองเพื่อทดสอบค่าประสิทธิผลของอุปกรณ์อุ่นอากาศแบบเทอร์โมไซฟอน พบว่าค่าประสิทธิผลของอุปกรณ์อุ่นอากาศแบบเทอร์โมไซฟอนนี้มีค่าขึ้นอยู่กับตัวแปรต่าง ๆ คือ ชนิด ขนาด คุณสมบัติของวัสดุและมุมเอียงของเทอร์โมไซฟอน ชนิดและปริมาณสารทำงานภายในเทอร์โมไซฟอน รูปแบบการจัดวาง และปริมาณของเทอร์โมไซฟอน ทั่วไปจะนิยมเอาท่อเหล็กและท่อทองแดงมาใช้เป็นเทอร์โมไซฟอน และท่อทองแดงจะให้ค่าประสิทธิผลสูงกว่าท่อเหล็กที่สภาวะเดียวกันประมาณ 10 % แต่มีข้อจำกัดคือ ท่อทองแดงไม่นิยมนำมาใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่า 200 °C เนื่องจากคุณสมบัติของท่อทองแดงเอง ดังนั้นสำหรับอุตสาหกรรมต่าง ๆ ที่อุณหภูมิสูงกว่า 200 °C จึงนิยมใช้อุปกรณ์อุ่นอากาศแบบเทอร์โมไซฟอนที่เป็นท่อเหล็ก แม้ว่าค่าประสิทธิผลที่ได้จะต่ำกว่าที่เลือกใช้ท่อทองแดงก็ตาม

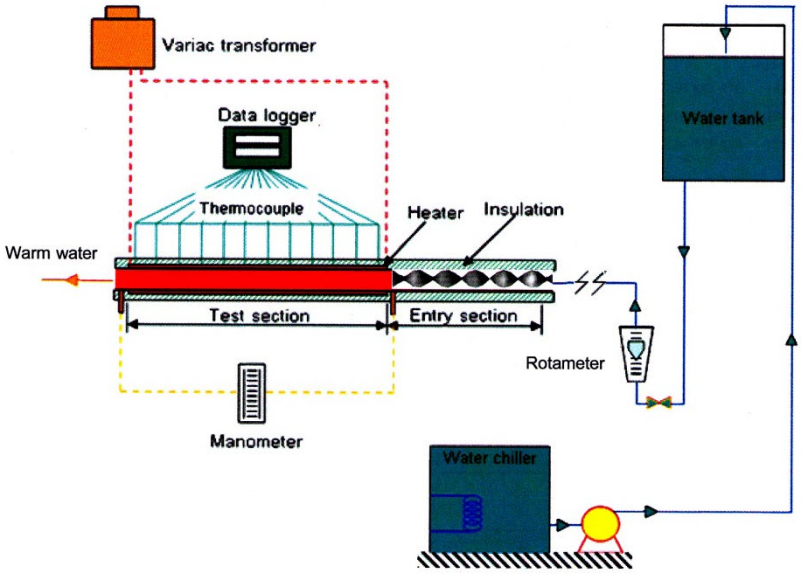
Sun and Shyu (1996) ได้เอาอุปกรณ์อุ่นอากาศแบบเทอร์โมไซฟอนมาประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรม 3 ประเภท ได้ผลดังนี้

1. นำไปเป็นอุปกรณ์ดึงความร้อนกลับสำหรับหม้อไอน้ำขนาดกำลังผลิตไอน้ำ 10.8 t/h ของบริษัทผลิตรถยนต์ โดยใช้เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบก๊าซกับอากาศ เพื่อนำความร้อนจากไอเสียมาให้กับอากาศก่อนเข้าห้องเผาไหม้ของหม้อน้ำ โดยใช้ท่อเหล็กกล้าไร้สนิม และท่อทองแดง เพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศ จาก 15°C เป็น 161°C สามารถช่วยประหยัดเชื้อเพลิงได้ 4.2% และประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำเพิ่มขึ้น 3.6%

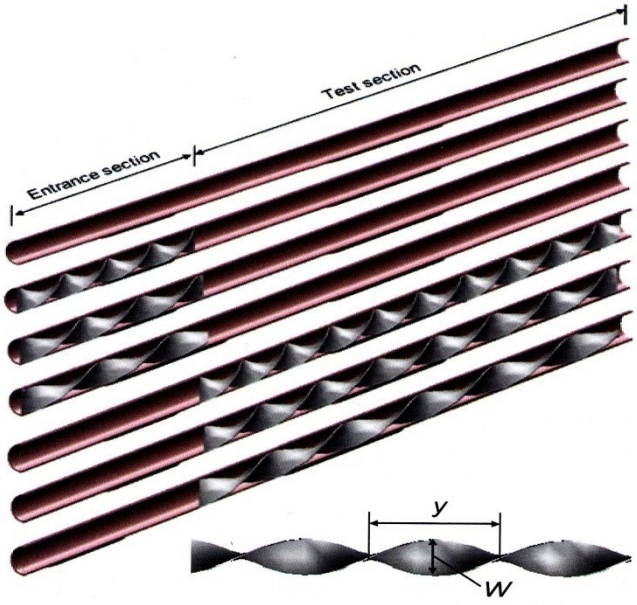
2. นำไปใช้เป็นอุปกรณ์ดึงความร้อนกลับสำหรับเตาหลอมในอุตสาหกรรมเหล็ก โดยใช้ท่อเหล็กกล้าไร้สนิมแบบมีครีบเป็นเทอร์โมไซฟอน มีดาวน์เทอร์ม เอ (Downthem A : Eutectic mixture of 73.5% diphenyl ether and 26.5% diphenyl, The Dow Chemical co., Birmingham, England) เป็นสารทำงาน สามารถลดอุณหภูมิของไอเสียจาก 416 °C เหลือเพียง 165 °C และเพิ่มอุณหภูมิของอากาศจาก 28 °C เป็น 165 °C หรือคิดเป็นความร้อนที่ดึงกลับมาได้ประมาณ 30 MW ค่าประสิทธิผลของอุปกรณ์อุ่นอากาศประมาณ 50 %

3. นำไปใช้เป็นอุปกรณ์ดึงความร้อนกลับสำหรับหม้อน้ำในอุตสาหกรรมทอผ้า โดยใช้ท่อทองแดงแบบมีครีบเป็นเทอร์โมไซฟอน มีน้ำเป็นสารทำงานสามารถลดอุณหภูมิไอเสียจาก 168 °C เหลือเพียง 104 °C และเพิ่มอุณหภูมิอากาศจาก 36 °C เป็น 116 °C หรือคิดเป็นความร้อนที่ดึงกลับมาได้ประมาณ 192 MW ค่าประสิทธิผลของอุปกรณ์อุ่นอากาศประมาณ 56%

พยุงเดช ทองชุม และคณะ (2542) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการเสื่อมสลายของการไหลหมุนควงต่อการถ่ายเทความร้อนในท่อที่มีการติดตั้งแผ่นบิดที่ทางเข้า โดยได้ทดสอบในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน $5{,}000 < Re$ 15,000 เพื่อสร้างระดับความแตกต่างของการไหลหมุนควงภายในท่อ เพื่อทดสอบตัวแปรคือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน เลขนัสเซลต์ และตัวประกอบความเสียดทาน ซึ่งได้นำมาพิจารณาเปรียบเทียบกับกรณีการไหลแบบท่อเปล่าที่เงื่อนไขเดียวกัน ผลการวิจัยพบว่า แผ่นบิดทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนสูงที่บริเวณทางเข้าท่อและค่อย ๆ ลดลงความยาวของท่อ และท่อที่ใส่แผ่นบิดที่ทางเข้ายังให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าท่อเปล่า



(ก)

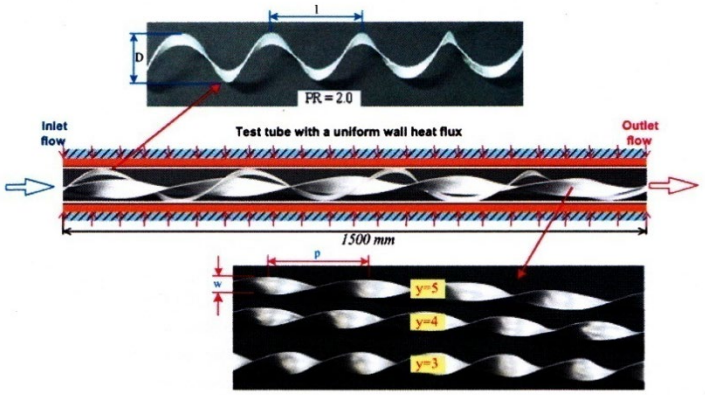


(ข)

ภาพที่ 2.7 (ก) ผังการทดลองชุดแลกเปลี่ยนความร้อน (ข) ท่อที่ติดตั้งแผ่นบิดที่ทางเข้าและแผ่นบิดแบบเต็มท่อ

กิตติศักดิ์ สุดดวง และคณะ ได้ศึกษาอิทธิพลการติดตั้งแผ่นสกรูร่วมกับแผ่นบิดที่มีผลต่ออัตราถ่ายโอนความร้อน ความเสียดทาน และสมรรถนะการถ่ายโอนความร้อน ท่อมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 64 และ 67 mm สำหรับสกรูทำจากเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก ภายใน 37 และ 63 mm

หนา ½ mm โดยมีระยะบิดเท่ากับ 2 แผ่นบิดทำจากอลูมิเนียม มีความยาวต่อความกว้างเท่ากับ 36.5 mm ถูกนำมาบิดในอัตราส่วนเท่ากับ 3, 4 และ 5 โดยมีทิศทางการหมุนทวนเข็มนาฬิกา โดยใช้อากาศเป็นของไหลที่เลขเรย์โนลดส์ 6,000-20,000 จากผลการวิจัยพบว่า สำหรับท่อแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มขึ้น 125.7% เมื่อเปรียบเทียบกับท่อเปล่าในขณะที่ทำการติดตั้งแผ่นบิดสกรูร่วมกับแผ่นบิดท่อแลกเปลี่ยนความร้อน พบว่า ค่าการถ่ายโอนความร้อนเพิ่มขึ้นจากท่อที่ติดตั้งแผ่นบิดสกรูเพียงอย่างเดียว ประมาณ 4.4% ซึ่งน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าความเสียดทานเพิ่มขึ้น 94.8-288.4% อันเนื่องมาจากการใส่แผ่นบิดตรงกลางท่อ ซึ่งเมื่อเทียบกับการติดตั้งแผ่นสกรูเพียงอย่างเดียว มีการถ่ายโอนความร้อน 22.9-46.3% โดยค่าสมรรถนะการถ่ายโอนความร้อนแบบติดตั้งแผ่นสกรูมีค่าสูงสุด 1.48 ที่ตัวเลขเรย์โนลดส์เท่ากับ 6,000



ภาพที่ 2.8 ท่อทดสอบที่ติดตั้งแผ่นสกรูร่วมกับแผ่นบิด

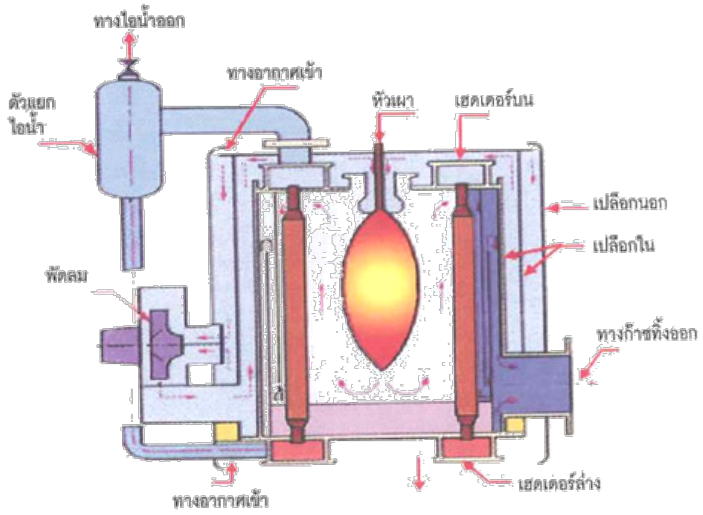
ธีระศักดิ์ ธาดาสัตย์ และคณะ (2554) ได้ศึกษาผลกระทบแผ่นบิดเดียวแบบตามและทวนท่อฝังร่องเกลียว มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.8 mm ท่อยาว 600 mm ใช้น้ำเป็นของไหลในการแลกเปลี่ยนความร้อนที่เลขเรย์โนลดส์ 5,000-15,000 แผ่นบิดทำจากอลูมิเนียม บิดแบบตามและบิดแบบทวนเกลียวท่อ ความกว้าง 8 mm ความหนา 0.4 mm อัตราส่วนระยะบิดเท่ากับ 3, 4 และ 5 ผลการวิจัยพบว่าการติดตั้งแผ่นบิดเดี่ยวแบบทวนเกลียวท่อที่ติดตั้งในท่อผิวร่องเกลียวที่อัตราส่วนระยะบิด เท่ากับ 3 ก่อให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วน ทำให้ชั้นชิดผิวผนังท่อบางลง และหน่วงการไหลแบบปั่นป่วนทำให้ยาวนาน เป็นผลให้การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น 49.5% อัตราส่วนการเพิ่มการถ่ายโอนความร้อน 2.06 เท่าที่เลขเรย์โนลดส์ 5,000 อัตราส่วนตัวประกอบความเสียดทาน 1.14 ที่เลขเรย์โนลดส์ 5,000 ผลการทดสอบทั้งหมดเปรียบเทียบกับท่อเปล่าผิวเรียบ

ภาพที่ 2.9 ลักษณะของแผ่นบิดตามเกลียวท่อ

2. ทฤษฎีที่ใช้ในงานวิจัย

ในงานวิจัยเรื่องการเพิ่มสมรรถนะให้แก่อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นรูปสี่เหลี่ยมซึ่งใช้ร่วมกับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว มีทฤษฎีที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยดังนี้

2.1 หม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว



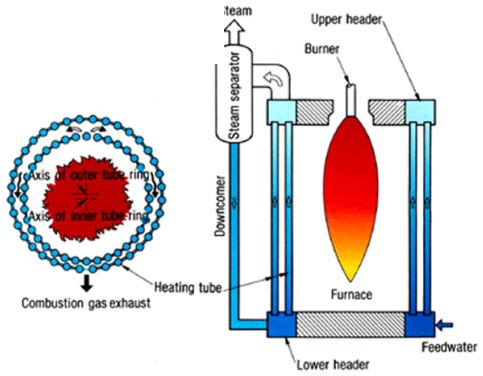
ภาพที่ 2.10 หม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียวชนิดท่อน้ำตั้ง

สำหรับระบบหม้อน้ำที่ติดตั้งร่วมกับอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมจะเป็นแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียวแบบท่อน้ำตั้งมีขนาดอัตราการผลิตไอน้ำ 500 kg/h โครงสร้างภายในจะมีส่วนที่สำคัญ 3 ส่วน ดังนี้

2.1.1 เตาหรือห้องเผาไหม้ (Furnace) เป็นส่วนที่มีอุณหภูมิสูงสุดที่ติดตั้งหัวพ่นไฟ (เชื้อเพลิง) จะติดตั้งอยู่ตั้งอยู่ตรงกลางส่วนบนของส่วนเก็บไอน้ำ เชื้อเพลิงที่ใช้เป็นน้ำมันดีเซล ในการฉีดของเชื้อเพลิงจะใช้หัวฉีดความดันสูงจำนวน 2 หัว เพื่อฉีดน้ำมันให้เป็นฝอยละอองกระจายออกไป

ความดันน้ำมันเกิดจากปั๊ม (Pump) น้ำมันเชื้อเพลิงความดันสูง 5-20 บาร์(70 - 300 lb/in^2) ความหนืดของน้ำมันมีค่าประมาณ 10 - 20 cSt หัวพ่นไฟแบบฉีดน้ำมันความดันสูงเหมาะกับเชื้อเพลิงดีเซล (จรัล จิรวิบูลย์, 2553 : 211) แต่ถ้าเป็นน้ำมันเตาจะต้องอุ่นน้ำมันให้ร้อนขึ้นเพื่อลดความหนืดของน้ำมันลงให้ถึงจุดที่จะฉีดออกไปเป็นฝอยละอองได้ดี น้ำมันที่มีความหนืดเหมาะสมจะถูกอัดด้วยความดันสูงผ่านช่องเล็ก ๆ ในหัวฉีด (Swirl Chamber) แล้วพ่นผ่านรูหัวฉีดเป็นฝอยน้ำมันออกมา หัวฉีดบางชนิดจะมีการหมุนรอบตัวของฝอยน้ำมันด้วย

2.1.2 ส่วนเก็บน้ำ (Water Space) หม้อน้ำแบบไหลผ่านทางเดียวมีพื้นที่ส่วนเก็บน้ำอยู่ด้านล่าง ทำหน้าที่เก็บน้ำภายในหม้อน้ำสำหรับใช้ระเหยกลายเป็นไอน้ำ



ภาพที่ 2.11 หม้อน้ำแบบหลอดน้ำชนิดท่อตั้งที่แสดงพื้นที่เก็บน้ำและไอน้ำ

2.1.3 ส่วนเก็บไอน้ำ (Steam Space) หม้อน้ำแบบไหลผ่านทางเดียวมีพื้นที่การเก็บไอน้ำอยู่ส่วนบนปกติจะอยู่เหนือส่วนเก็บน้ำ ซึ่งไอน้ำที่ผลิตได้จะถูกเก็บสะสมไว้ในส่วนที่เก็บไอน้ำ หม้อน้ำที่มีส่วนเก็บไอน้ำมาก ๆ จะมีไอน้ำสะสมเพื่อใช้งานมากกว่าหม้อน้ำที่มีส่วนเก็บไอน้ำน้อย

2.2 การประเมินคุณภาพพลังงานความร้อนทิ้งจากปล่องไอเสียหม้อน้ำ

การสูญเสียพลังงานความร้อนทิ้งที่ปล่องไอเสียเป็นสิ่งที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ในกระบวนการผลิตไอน้ำ แต่มีวิธีการใช้ประสิทธิภาพของการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตไอน้ำเพิ่มขึ้นได้ นั่นคือการนำความร้อนทิ้งจากปล่องไอเสียหม้อน้ำกลับมาใช้ใหม่อีก ปริมาณความร้อนทิ้งจากปล่องไอเสียหม้อน้ำจะอยู่ระหว่าง 200 - 380 °C ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการสันดาปและการออกแบบหม้อน้ำ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะขอกล่าวถึงหม้อน้ำแบบหลอดน้ำขนาด อัตราการผลิตไอน้ำ 500 kg/h ซึ่งใช้น้ำมันเชื้อเพลิงเหลว (Diesel) เมื่อทำปฏิกิริยากับอากาศ (Air) แล้วได้พลังงานความร้อนออกมาอยู่ในรูปของก๊าซชนิดต่าง ๆ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซคาร์บอนมอนน็อกไซด์

(CO) และไอน้ำ (H_2O) นอกจากนี้ยังมีปริมาณอากาศส่วนเกิน (Excess Air) ที่เหลือจากการสันดาปซึ่งอยู่ในรูปของก๊าซออกซิเจน (O_2) ที่เหลือจากการสันดาปอีก กล่าวได้ว่าถ้าก๊าซต่าง ๆ ที่กล่าวมามีอุณหภูมิสูง ๆ ออกทิ้งที่ปล่องไอเสียนั้นแสดงว่าพลังงานความร้อนจะสูญเสียไปที่ปล่องไอเสียของหม้อน้ำเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามถ้าอุณหภูมิปริมาณความร้อนที่ปล่องไอเสียต่ำ ความร้อนสูญเสียออกทางปล่องไอเสียอาจจะมากก็ได้ ถ้ามีปริมาณอากาศส่วนเกินมากเกินไป ดังนั้นการตรวจสอบว่าการเผาไหม้มีประสิทธิภาพสูงหรือไม่หรือมีปริมาณความร้อนออกไปทางปล่องไอเสียหม้อน้ำมากเพียงใด จะต้องทราบปริมาณอากาศส่วนเกินจากเปอร์เซ็นต์ก๊าซออกซิเจน (% O_2) หรือเปอร์เซ็นต์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (% CO_2) ในปล่องไอเสียหม้อน้ำ หม้อน้ำที่ดีอุณหภูมิปล่องไฟควรสูงกว่าอุณหภูมิไอน้ำไม่เกิน 35°C (จรัล จิรวิบูลย์, 2553 : 220)

ตารางที่ 2.1 แสดงเปอร์เซ็นต์ความร้อนที่สูญเสียออกจากปล่องไอเสียหม้อน้ำที่ใช้น้ำมันดีเซล

% CO_2	อุณหภูมิไอเสียที่ปล่องไฟ - อุณหภูมิห้อง (°C)																								
	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	325	350	375	400	450	500	550
3.0	25.5	27.1	28.7	30.3	32.3	34.2	35.1	36.6	38.2	39.8	42.3	44.2	45.2	46.3	47.8	49.5	51.1	52.6	54.3	58.3	62.0	66.4				
3.5	22.8	24.3	25.6	27.0	28.4	30.0	32.3	33.6	33.9	35.2	36.6	38.0	39.4	40.9	42.8	44.5	45.8	47.5	47.8	50.8	54.4	58.0	61.5			
4.0	20.9	22.1	23.9	25.1	25.7	26.9	28.9	31.2	31.7	32.0	33.0	35.1	35.9	36.7	38.4	39.7	41.1	42.6	42.9	45.9	48.5	52.0	55.1	60.9	67.1	
4.5	19.4	20.5	21.5	22.6	23.7	24.8	26.6	27.8	28.0	29.2	30.2	31.4	32.5	33.6	35.3	36.5	37.6	38.8	39.0	41.5	44.1	47.1	50.0	55.2	60.9	66.3
5.0	18.2	19.2	20.2	21.2	22.1	23.0	24.7	25.8	26.0	27.0	28.0	29.0	29.9	30.9	32.5	33.6	34.7	35.7	35.9	38.3	40.5	43.4	45.8	50.7	55.8	60.6
5.5	17.2	18.1	19.0	19.9	20.8	21.6	23.1	24.1	24.3	25.3	26.1	27.0	28.0	28.9	30.4	31.2	32.2	33.4	33.6	35.6	37.7	40.1	42.6	47.0	51.8	56.0
6.0	16.3	17.1	17.9	18.8	19.7	20.6	21.8	22.8	23.0	23.8	24.7	25.5	26.4	27.3	28.4	29.3	30.2	31.2	31.4	33.4	35.3	37.7	39.7	44.0	48.0	52.3
6.5	15.5	16.4	17.2	18.0	18.8	19.5	20.7	21.6	21.8	22.6	23.4	24.2	25.0	25.7	26.8	27.6	28.6	29.4	29.6	31.6	33.3	35.5	37.4	41.2	45.1	49.3
7.0	15.1	15.8	16.5	17.3	18.0	18.7	19.9	20.7	20.9	21.6	22.3	23.0	23.7	24.5	25.5	26.3	27.1	27.9	28.1	30.0	31.6	33.6	35.4	39.0	42.7	46.2
7.5	14.5	15.2	15.9	16.7	17.3	17.9	19.1	19.9	20.1	20.6	21.2	21.9	22.7	23.4	24.4	25.1	25.8	26.6	26.8	28.4	30.0	32.0	33.7	36.9	40.3	43.8
8.0	14.1	14.7	15.4	16.1	16.7	17.3	18.3	19.1	19.3	19.9	20.6	21.2	21.8	22.5	23.4	24.1	24.8	25.6	25.7	27.2	28.7	30.6	32.2	35.4	38.5	41.7
8.5	13.7	14.3	14.9	15.6	16.2	16.7	17.7	18.4	18.6	19.2	19.9	20.4	21.0	21.6	22.5	23.2	23.8	24.5	24.6	26.1	27.5	29.3	30.8	33.8	36.9	39.9
9.0	13.3	13.9	14.5	15.2	15.8	16.2	17.2	17.8	17.9	18.5	19.2	19.8	20.4	20.9	21.7	22.3	23.0	23.7	23.8	25.1	26.5	28.2	29.5	32.4	35.3	38.2
9.5	13.1	13.6	14.1	14.8	15.4	15.9	16.7	17.3	17.4	18.0	18.5	19.1	19.7	20.2	21.0	21.6	22.3	22.8	22.9	24.3	25.6	27.1	28.5	31.3	34.0	36.9
10.0	12.7	13.2	13.8	14.3	14.8	15.4	16.2	16.8	16.9	17.4	18.0	18.5	19.1	19.7	20.4	20.9	21.5	22.1	22.2	23.6	24.7	26.2	27.5	30.2	32.9	35.4
11.0	12.3	12.7	13.2	13.7	14.1	14.7	15.4	16.1	16.2	16.7	17.1	17.6	18.1	18.5	19.3	19.9	20.4	20.8	20.9	22.2	23.3	24.7	25.9	28.3	31.8	33.2
12.0	11.7	12.3	12.7	13.2	13.6	14.1	14.8	15.3	15.4	15.9	16.3	16.8	17.2	17.7	18.3	18.8	19.4	19.9	20.0	21.0	22.8	23.4	24.5	26.8	29.0	31.4
13.0	11.5	12.0	12.3	12.8	13.2	13.6	14.2	14.6	14.7	15.2	15.7	16.2	16.5	17.0	17.6	18.0	18.5	19.0	19.1	20.2	21.2	22.2	23.0	25.4	27.5	29.8
14.0	11.3	11.7	12.0	12.4	12.8	13.1	13.7	14.2	14.3	14.8	15.2	15.5	16.0	16.4	16.8	17.3	17.7	18.2	18.3	19.3	21.8	21.3	21.9	24.3	26.2	28.4
15.0		11.4	11.6	11.9	12.3	12.8	13.4	13.7	13.8	13.8	14.6	15.2	15.5	15.8	16.3	16.6	17.2	17.6	17.7	18.5	19.5	20.5	21.4	23.3	25.2	27.1

ที่มา : (จรัล จิรวิบูลย์ , 2553 : 221)

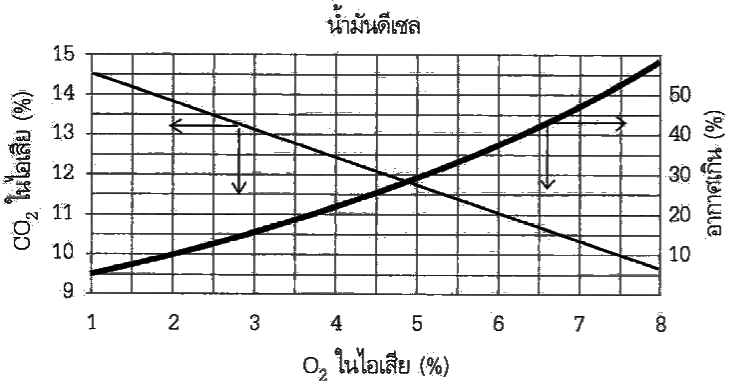
จากตารางที่ 2.1 แสดงให้ทราบถึงเปอร์เซ็นต์ความร้อนที่สูญเสียออกจากปล่องไอเสียที่อยู่ในสถานะก๊าซคาร์บอนไอออกไซด์กับปริมาณอุณหภูมิในกรณีใช้น้ำมันเชื้อเพลิงเหลว (Diesel) โดยทั่วไปปริมาณความร้อนที่สูญเสียที่ออกไปที่ปล่องไอเสียจะสูงหรือต่ำขึ้นอยู่กับการปรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงของหม้อน้ำต่อปริมาณอากาศ ซึ่งการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์จะเกิดขึ้นได้เปลวไฟการเผาไหม้จะต้องดีก่อน ถ้าเปลวไฟการเผาไหม้ไม่ดีแม้จะปรับส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศในอัตราส่วนเท่าใดก็จะได้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ และยังเกิดมลภาวะทางอากาศสูงในการเผาไหม้ที่สมบูรณ์สามารถทำได้ดังนี้

2.2.1 การปรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงของหม้อน้ำ

(1) เปลวไฟการเผาไหม้จะดีอยู่ที่ระบบการเผาไหม้หรือหัวพ่นไฟ คุณภาพของเชื้อเพลิง ขนาดของเม็ดเชื้อเพลิง ค่าความหนืด หรืออุณหภูมิของน้ำมัน ความดันของอากาศหรือเชื้อเพลิง ความเร็วของอากาศ ความสะอาดของหัวฉีดน้ำมัน ระยะต่าง ๆ ของหัวพ่นไฟ ฯลฯ

(2) เปลวไฟที่ดีของเชื้อเพลิงของน้ำมันจะต้องเป็นเปลวไฟที่มีรูปร่างกลม ไม่เป็นแฉกหรือแหว่ง มีการหมุนวนเล็กน้อย ไม่มีสะเก็ดเม็ดไฟ คล้ายถ่านไม้แตกกระเด็นไม่กระพือวูบวาบ เวลาติดหรือดับนุ่มนวลไม่รุนแรงไม่มีควันขาวหรือควันดำ สีไม่ขาวหรือแดงคล้ำ

(3) สีของเปลวไฟไม่สามารถบอกประสิทธิภาพการเผาไหม้ได้ โดยเฉพาะสีของเปลวไฟการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง ประสิทธิภาพการเผาไหม้จะดีหรือไม่ดีสามารถวัดได้จากเขม่าควันและวัด % O_2 หรือ % CO_2 ในไอเสียเพื่อหาอากาศส่วนเกิน (ดังกราฟที่ 2.1) และนำไปหา% ความร้อนที่สูญเสียออกไปที่ปล่องไอเสีย ไม่สามารถดูได้จากสีของเปลวไฟได้



กราฟที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ %CO_2, %O_2 และ Excess Air สำหรับหม้อน้ำใช้น้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล
ที่มา : (จรัล จิรวิบูลย์, 2553 : 223)

(4) พยายามปรับส่วนผสมเชื้อเพลิงกับอากาศในอัตราส่วนที่มีอากาศส่วนเกินมากกว่าทางทฤษฎีให้น้อยที่สุด การเผาไหม้ต้องไม่มีควัน ถ้าการเผาไหม้มีอากาศส่วนเกินน้อยจนมีเขม่าควันแสดงว่าการเผาไหม้ไม่หมด แต่ถ้าการเผาไหม้มีอากาศส่วนเกินมากเกินไป ก็จะพาความร้อนทิ้งออกไปทางปล่องไอเสียมากเกินความจำเป็น จากกราฟที่ 2.1 แสดงจุดที่ทำงานการเผาไหม้ที่ดีที่สุด คือ จุดที่มีความร้อนสูญเสียรวมน้อยที่สุด

(5) การปรับส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศในอัตราส่วนที่มีอากาศส่วนเกินน้อยที่สุดเท่านั้นจะต้องเกิดเขม่าควัน และมลพิษออกจากปล่องไฟไม่เกินกว่ากฎหมายสิ่งแวดล้อมกำหนด

2.2.2 เครื่องมือวัดประสิทธิภาพการเผาไหม้

การวัดประสิทธิภาพการเผาไหม้ว่าสมบูรณ์เพียงใดเป็นการวัดว่าสามารถวัดเผาไหม้เชื้อเพลิงได้หมดโดยไม่มีเชื้อเพลิงเหลือ และปริมาณอากาศเกินไม่มากเกินไป โดยทางทฤษฎีการเผาไหม้เชื้อเพลิงในควรใช้ออกซิเจนหรืออากาศพอดีกันตามปฏิกิริยาทางเคมี แต่ในความเป็นจริงการเผาไหม้เชื้อเพลิงแต่ละชนิดให้หมดจะต้องใช้อากาศเกินจำนวนหนึ่ง ถ้าอากาศเกินมีน้อยกว่าจุดที่เหมาะสมการเผาไหม้จะไม่สมบูรณ์ ทำให้เชื้อเพลิงเหลืออยู่ และมีเขม่าควันจากคาร์บอนในเชื้อเพลิงที่ไม่สามารถสันดาปกับอากาศกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ได้หมดแต่ถ้ามีการเผาไหม้ให้อากาศเกินมากการเผาไหม้จึงต้องใช้อุปกรณ์อย่างน้อย 2 ชนิด คือ

(1) อุปกรณ์การวัดเขม่าควันไฟเพื่อตรวจสอบว่าเชื้อเพลิงเผาไหม้หมดหรือไม่ ในกรณีเชื้อเพลิงเป็นก๊าซจะใช้วิธีการวัดหาเชื้อเพลิงก๊าซที่ยังไม่ทำปฏิกิริยา เนื่องจากการใช้วิธีวัดเขม่าควันในกรณีของเชื้อเพลิงก๊าซจะหยาบเกินไปสำหรับเชื้อเพลิงก๊าซที่เกิดเขม่าควันไฟได้ยาก

(2) อุปกรณ์การวัดปริมาณอากาศส่วนเกินจะวัดปริมาณก๊าซออกซิเจนที่เหลือจากการสันดาป แต่ถ้าเป็นเครื่องมือแบบพกพา (Portable) ชนิดน้ำยาเคมี (O_2 Absorber Liquid) ที่เป็นการเก็บก๊าซไอเสียมาวัดออกซิเจน จะมีความคลาดเคลื่อนในการวัดมาก โดยทั่วไปปริมาณออกซิเจนที่เหลือจากการสันดาปจะประมาณ 1-6% เท่านั้น เมื่อเทียบกับปริมาณออกซิเจนภายนอกมีประมาณ 20.95% (Yoshihiko Takamura, 2543 : 167) ดังนั้นเครื่องมือที่ใช้ในการเก็บข้อมูลที่สนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้จะเป็นแบบพกพา เพื่อวัดค่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซออกซิเจน และปริมาณอากาศส่วนเกินที่ให้ค่าแน่นอนกว่าแบบใช้น้ำยาทางเคมี ดังแสดงในกราฟที่ 2.1 ความสัมพันธ์ของก๊าซ CO_2, O_2 และปริมาณอากาศส่วนเกินของเชื้อเพลิง

2.2.3 อัตราการไหลของความร้อนทิ้งที่ปล่องไอเสีย การตรวจวัดอัตราการไหลของความสามารถวัดในเชิงปริมาณได้ โดยการวัดแรงดันที่ลดลงผ่านพื้นที่หน้าตัดของท่อ (Pipe) หรือช่องอากาศ (Ductwork) โดยการใช้วิธีการอย่างใดอย่างหนึ่ง เช่น ท่อพิทอท (Pitot Tube) ออริฟิตมิเตอร์ (Orifice Meter) และเวนจูรีมิเตอร์ (Venturi Meter) สองแบบสุดท้ายจะเป็นการวัดแรงดันที่สูญเสียขณะที่ไหลผ่านอุปกรณ์การวัด ส่วนแบบแรกจะเป็นการวัดแรงดันสถิต และแรงดันพลวัตร

2.2.4 การวัดอุณหภูมิของความร้อนทิ้งที่ปล่องไอเสีย โดยทั่วไปจะใช้เครื่องมือวัดอุณหภูมิหรือเทอร์โมคับเปิ้ล โดยใช้หลักการแรงเคลื่อนไฟฟ้าเชิงความร้อน หรือเครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบไพโรมิเตอร์ ซึ่งใช้หลักการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุ เครื่องมือวัดประเภทนี้จะให้ค่าแม่นยำ และนิยมใช้ในปัจจุบัน

2.2.5 การวัดการผสมกันของความร้อนทิ้งจากปล่องไอเสีย ความจุความร้อนของความร้อนทิ้งจากปล่องไอเสียขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ อัตราการไหล ความหนาแน่น และความร้อนจำเพาะของก๊าซร้อนทิ้งที่ปล่องไอเสีย จะมีก๊าซหลายชนิดผสมกันอยู่ดังนั้นต้องหาความหนาแน่น และความร้อนจำเพาะของก๊าซโดยต้องหาองค์ประกอบของก๊าซด้วยการเก็บตัวอย่างมาวัดอย่างต่อเนื่องสำหรับก๊าซบางตัว เช่น O_2, CO_2 และ CO เป็นต้น

2.3 การถ่ายโอนความร้อน

ในการออกแบบและสร้างอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมสำหรับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียวนั้นจะต้องเข้าใจถึงกลไกของการถ่ายโอนความร้อนแต่ละแบบ และต้องทราบถึงความสัมพันธ์ของการถ่ายโอนความร้อนแต่ละแบบนั้น ๆ ซึ่งมีทฤษฎีที่เกี่ยวข้องดังนี้

การพาความร้อนแบบบังคับ (Force Convection) การพาความร้อนชนิดนี้จะเกิดขึ้นเมื่อมีแรงภายนอกมาบังคับให้ของไหลเคลื่อนที่ผ่านผิววัตถุที่ร้อนกว่าหรือเย็นกว่า เนื่องจากการพาความร้อนแบบบังคับมีความเร็วสูงกว่าแบบอิสระ ดังนั้นถ้าหากความแตกต่างของอุณหภูมิมีขนาดเท่ากันแล้ว การพาความร้อนแบบบังคับจะมีอัตราการพาความร้อนที่สูงกว่า ไม่ว่าจะเป็นการพาความร้อนแบบใดต่างมีสมการสำหรับการหาอัตราการถ่ายโอนความร้อนที่อยู่ในรูปของกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's Law of Cooling) ดังนี้

$$q_c = h_c A(T_s - T_f) \qquad (2.1)$$

เมื่อ h_c = ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (W/m^2K)

A = พื้นที่ของวัตถุที่สัมผัสกับของไหล (m^2)

T_s = อุณหภูมิผิวของวัตถุ (K)

T_f = อุณหภูมิของไหลอิสระที่อยู่ห่างออกไปจากผิววัตถุ (K)

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

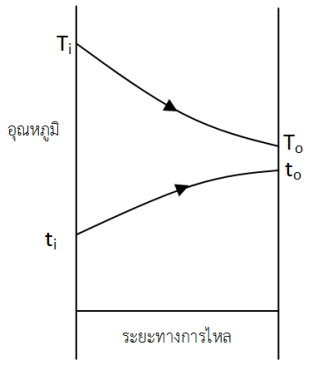
ชนิดของการพาความร้อน	h($W/m^2{}^\circ C$)
การพาความร้อนแบบอิสระของก๊าซ	2 - 25
การพาความร้อนแบบอิสระของของเหลว	10 - 1,000
การพาความร้อนแบบบังคับของก๊าซ	25 - 250
การพาความร้อนแบบบังคับของของเหลว	50 - 20,000
การเดือด และการควบแน่น	2,500 - 100,000

การถ่ายโอนความร้อนโดยการแผ่รังสี (Heat Radiation) การนำความร้อน และการพาความร้อนที่กล่าวมาจะเป็นการถ่ายโอนความร้อนได้เฉพาะในกรณีมีวัตถุมาเป็นตัวกลางเท่านั้น สำหรับการถ่ายโอนความร้อนแบบแผ่รังสีนั้น จะสามารถเคลื่อนที่ได้โดยไม่จำเป็นต้องมีตัวกลางเลย เช่น ในบริเวณที่เป็นสุญญากาศ เป็นต้น พลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีนั้นจะเคลื่อนที่ไปในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความเร็วเท่ากับความเร็วของแสง พลังงานที่เคลื่อนที่ในรูปของแม่เหล็กไฟฟ้านั้นมีอยู่มากมาย เช่น รังสีเอ็กซ์ สังสีอินฟราเรด สรุปหลักการถ่ายโอนความร้อนในงานจริงจะเป็นการถ่ายโอนความร้อนแบบรวม (การแผ่รังสีและการพาความร้อนแบบบังคับ) ซึ่งมีปัจจัยที่สำคัญคือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน พลังงานความร้อนที่เกิดจากการสันดาประหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศของหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียวจะถ่ายโอนความร้อนให้แก่น้ำเพื่อให้น้ำเดือดกลายเป็นไอน้ำ พลังงานที่เหลือจากการถ่ายโอนความร้อนให้แก่น้ำจะเป็นพลังงานความร้อนที่สูญเสีย เช่น พลังงานความร้อนจากความร้อนทิ้งที่ปล่องไอเสียจะมีอุณหภูมิประมาณ 200-300 °C คิดเป็นปริมาณความร้อนประมาณ 15 -20% จากปริมาณความร้อนทั้งหมด ดังนั้นในงานวิจัยนี้มีเป้าหมายพัฒนาอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม โดยให้ความร้อนทิ้งไหลอยู่ในเปลือก 1 เที่ยว และน้ำไหลอยู่ในท่อ ความร้อนจะไหลในลักษณะตั้งฉากกับกลุ่มท่อแถวเรียง (น้ำ) จากหลักการถ่ายโอนความร้อนที่ศึกษาจะหาอัตราการถ่ายโอนความร้อนในอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อได้สอดคล้องกับ (สุมิตร แสงบุริมทัศ, 2544 : 3) การวิจัยการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเปลือก และท่อโดยคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล พบว่า ตัวแปรต่าง ๆ กับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีอยู่ เช่น อุณหภูมิจุดทางออก ความดันในเปลือก ค่าสัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนความร้อน มีความสัมพันธ์กับอัตราการไหลในเปลือก (Shell) ณ จุดต่าง ๆ ตลอดจนความสัมพันธ์อัตราการถ่ายโอนความร้อนกับพื้นที่การถ่ายโอนความร้อนของท่อ

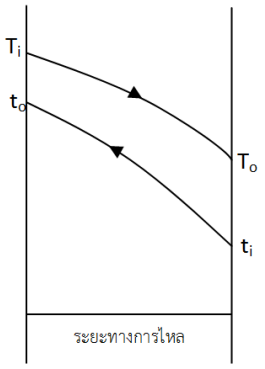
2.4 การถ่ายโอนความร้อนในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบ่งการถ่ายโอนความร้อนได้ 2 แบบ ได้แก่ แบบการไหลผ่าน (Flow Through) และแบบสะสมความร้อน (Heat Accumulation) ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลผ่านจะมีการถ่ายโอนความร้อนจากของไหลชนิดหนึ่งไปยังของไหลอีกชนิดหนึ่ง โดยผ่านผนังกั้นโดยตรง ทั้งนี้ของไหลทั้งสองชนิดจะต้องไหลผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในเวลาเดียวกัน ส่วนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบสะสมของไหลจะมีหน้าที่ให้ และรับความร้อนจะผลัดกันไหลผ่านเครื่อง ในการไหลสลับกันนี้ของไหลที่รับความร้อนจะรับความร้อนที่ได้เก็บสะสมไว้ในเครื่องหลังจากของไหลที่ให้ความร้อนได้ไหลผ่านเครื่อง ดังนั้นต้องสับเปลี่ยนการไหลของของไหลทั้งสองชนิดผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ส่วนงานวิจัยการพัฒนาอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อขด การถ่ายโอน

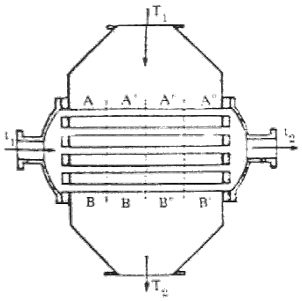
ความร้อนจะเป็นแบบไหลผ่านในแนวตั้งฉาก ซึ่งสอดคล้องกับงานในภาคอุตสาหกรรม อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะเป็นแบบไหลผ่าน (วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล, 2536 : 30) ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จะกล่าวถึงเฉพาะการถ่ายโอนความร้อนในอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อขด แบบความร้อนไหลผ่านครั้งเดียว ซึ่งลักษณะการถ่ายโอนความร้อนในอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบไหลผ่านครั้งเดียวอาจแบ่งได้ตามทิศทางการไหลของของไหลเป็น 3 ประเภท คือ แบบไหลขนาน (Parallel Flow) แบบไหลสวนทาง (Counter Flow) และแบบไหลตั้งฉาก (Cross Flow) ในอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบไหลขนานกันของไหลร้อนกับของไหลเย็นจะไหลในทิศทางเดียวกัน ในขณะที่เกิดการถ่ายโอนความร้อนผ่านผนังกั้นอุณหภูมิของของไหลร้อนจะค่อย ๆ ลดลง ในขณะเดียวกันของไหลเย็นจะค่อย ๆ มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ส่วนอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบไหลสวนทางของไหลร้อน และของไหลเย็นจะมีทิศทางการไหลตรงข้ามกันอุณหภูมิของไหลร้อนจะค่อย ๆ ลดลงส่วนอุณหภูมิของไหลเย็นจะสูงขึ้นในทิศทางตรงกันข้าม



(ก) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบไหลขนาน



(ข) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบไหลสวนทาง



(ค) อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบไหลตั้งฉาก

ภาพที่ 2.12 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบต่าง ๆ

จากภาพที่ 2.12 (ก) แสดงผลต่างระห่างอุณหภูมิของของไหล (T_1 - t_1) ที่ทางเข้าซึ่งจะใหญ่กว่าผลต่าง (T_2 - t_2) ที่ทางออก

ภาพที่ 2.12 (ข) แสดงผลต่างระหว่างอุณหภูมิของของไหลที่ปลายด้านอุณหภูมิสูง คือ (T_1 - T_2) และผลต่างที่ปลายด้านอุณหภูมิ คือ (T_2 - T_1)

ภาพที่ 2.12 (ค) อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบไหลตั้งฉากในกรณีจะมีการถ่ายโอนความร้อนที่จุด A จะเกิดขึ้นระหว่างของไหลร้อนที่อุณหภูมิทางเข้า T_1 และของไหลเป็นที่อุณหภูมิทางเข้า t_1 เนื่องจากการถ่ายโอนความร้อนที่จุด A อุณหภูมิของของไหลเย็นที่จุด A' จะสูงกว่าอุณหภูมิจุด A ด้วยปริมาณ dt แม้ว่าอุณหภูมิของไหลเย็นที่จุด B จะเป็น t_1 เท่ากับที่จุด A แต่อุณหภูมิของไหลร้อนที่จุด B จะต่ำกว่าที่จุด A ด้วยปริมาณ dT ดังนั้น อัตราการไหลเย็นที่จุด A กับจุดที่ B ย่อมไม่เท่ากัน ด้วยเหตุนี้เองเวลาคำนวณการถ่ายโอนความร้อนของอุปกรณ์อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบไหลตั้งฉากจึงสลับซับซ้อนกว่าทั้งสองแบบที่ได้กล่าวมา

2.5 การออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นรูปสี่เหลี่ยม

2.5.1 การออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ

การออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมควรจะศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการเลือกประเภทการเลือกเส้นทางการไหล การเลือกเงื่อนไขการออกแบบ โดยปกติแล้วข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะได้มาจากการเก็บข้อมูลในโรงงาน ซึ่งประกอบด้วยอัตราการไหล อุณหภูมิที่ทางเข้าออกและความดันที่ใช้ของของไหลในเปลือก แต่กรณีที่ใช้น้ำเป็นตัวระบายความร้อนหรือในบางกรณี อาจมีความจำเป็นต้องคำนวณอุณหภูมิทางเข้าออกที่เหมาะสมหรือกำหนดค่าเหล่านี้ขึ้นนอกจากนั้นจะต้องคำนึงถึงลักษณะทางกายภาพของของไหล ได้แก่ ความหนาแน่น ความจุความร้อนจำเพาะ ความนำความร้อน และความหนืด ซึ่งจะมีค่าขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้การเลือกเส้นทางการไหลในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อการเลือกเส้นทางการไหลของไหล โดยกำหนดให้ของไหลประเภทไหนควรไหลในเปลือก และของไหลประเภทใดควรไหลในท่อ ยังไม่มีกฎเกณฑ์ที่แน่นอน ดังนั้นการตัดสินใจเลือกเส้นทางการไหลจำเป็นต้องพิจารณาจากประสบการณ์ และหลักเกณฑ์ประกอบดังต่อไปนี้ (วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล, 2536 : 93 - 94)

(1) การไหลที่ต้องการให้มีค่าความดันลดน้อยเหมาะที่จะให้ไหลภายในเปลือก โดยปกติการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะกำหนดให้ของไหลในท่อถ่ายโอนความร้อนไหลด้วยความเร็วสูงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อน ส่งผลให้ค่าความดันลดภายในท่อมีค่า

มากกว่าภายในเปลือก ดังนั้นหากต้องการให้ความดันลดของของไหลน้อยจึงควรให้ของไหลนั้นไหลในเปลือก

(2) ของไหลที่มีฤทธิ์กัดกร่อนสูงควรให้ไหลในท่อ หากกำหนดให้ของไหลมีฤทธิ์กัดกร่อนสูงไหลในเปลือก จะต้องใช้วัสดุทนการกัดกร่อนมากทำตัวเปลือกมัดท่อ และแผ่นกั้น แต่ถ้าให้ของไหลมีฤทธิ์กัดกร่อนสูงไหลในท่อ เพียงแต่ใช้วัสดุทนการกัดกร่อนทำมัดท่อเท่านั้น ดังนั้นจึงสามารถประหยัดค่าวัสดุทนการกัดกร่อนได้มากกว่า นอกจากนั้นการบำรุงรักษาก็ทำได้ง่ายกว่า

(3) ของไหลที่มีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนสูง ควรให้ไหลในท่อ โดยปกติแล้วการเลือกให้ของไหลที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนผ่านฟิล์มสูงกว่าไหลในท่อจะเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวมของอุปกรณ์ ทำให้สามารถลดพื้นที่ถ่ายโอนความร้อน เช่น ในกรณีที่ท่อถ่ายโอนความร้อนมีครีบติดผิวนอก พื้นที่สำหรับการถ่ายโอนความร้อนที่เพิ่มขึ้นจะช่วยชดเชยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนผ่านฟิล์มนอกท่อที่ต่ำกว่า ผลก็คือ สามารถออกแบบขนาดอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนให้เล็กลงได้

(4) ของไหลที่มีความหนืดสูงควรให้ไหลในเปลือกการไหลของของไหลความหนืดสูงที่ความเร็วสูงต้องใช้ค่าความดันสูญเสียสูง นอกจากนี้ของไหลที่มีความหนืดสูงมักมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนผ่านฟิล์มต่ำด้วย ดังนั้นการกำหนดให้ของไหลความหนืดสูงไหลในเปลือกจึงเหมาะสม

(5) ของเหลวที่มีก๊าซปนอยู่หรือก๊าซควบแน่นได้ที่มีก๊าซอื่นปนอยู่ควรให้ไหลในท่อถ้าปล่อยให้ของไหลที่มีก๊าซที่ไม่ควบแน่นไหลในเปลือก ในระหว่างที่ไหนอยู่ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ก๊าซที่ไม่ควบแน่นอาจแยกตัวออกมาสะสมอยู่ในเปลือก ทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อนลดลง

(6) ของไหลที่ไหลเป็นห้วง ๆ (Pulsating) ควรเลือกให้ไหลในเปลือก การไหลแบบห้วง ๆ ในท่ออาจก่อให้เกิดกาสั่นสะเทือนของท่อถ่ายโอนความร้อน ทำให้เกิดปัญหาการรั่วไหลที่บริเวณยึดติดกับแผ่นยึดท่อ ในกรณีเช่นนี้ควรเลือกให้ไหลในเปลือกซึ่งมีปริมาตรมากกว่า อย่างไรก็ดีอาจจำเป็นต้องใช้วิธีการอื่นแก้ไขด้วย เช่น ติดแผ่นกั้นการปะทะของของไหลที่บริเวณทางเข้าของเปลือกเป็นต้น อย่างไรก็ตามการไหลแบบห้วง ๆ เป็นลักษณะที่ควรหลีกเลี่ยง ดังนั้นจึงควรติดตั้งถังพักก่อนถึงอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อป้องกันการไหลแบบเป็นห้วง ๆ

(7) การเลือกความเร็วของการไหล และค่าความดันลด ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ความเร็วของการไหลมีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนผ่านฟิล์มและค่าความดันลดเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น ทั้งค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนผ่านฟิล์ม และค่าความดันลดต่างก็เพิ่มขึ้นด้วย นอกเหนือจากนี้ความเร็วของของไหลยังมีผลต่อการเกิดสนิม การกัดเซาะ

ตลอดจนความสกปรกของพื้นผิวถ่ายโอนความร้อนด้วย ดังนั้นจึงควรพิจารณาค่าความเร็วสูงสุดที่สามารถใช้ได้กับวัสดุที่ใช้สร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ลักษณะทางเคมี และลักษณะทางกายภาพของของไหลที่ใช้ จากนั้นออกแบบให้ความเร็วของการไหลอยู่ในช่วงที่ไม่เกินขีดจำกัดของความเร็วนี้ ดังตารางที่ 2.3 แสดงค่าความเร็วของการไหลที่เหมาะสมแต่ในกรณีที่มีของแข็งหรือสิ่งอื่น ๆ เจือปนอยู่ในของไหล ควรเลือกใช้ความเร็วที่น้อยกว่าที่ระบุไว้สำหรับอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อนั้นจะมีสมรรถนะสูงเพียงใด ขึ้นอยู่กับลักษณะการจัดเรียงท่อ (แถวเรียง) ทิศทางการไหลของความร้อนทิ้ง ควรอยู่ในแนวตั้งฉากกับส่วนท่อ สำหรับความร้อนทิ้งที่ออกจากปล่องไอเสียหม้อน้ำจะอยู่ในรูปของก๊าซผสม มีก๊าซ CO_2, O_2, CO เป็นต้น เมื่อตรวจสอบความเร็วการไหลเบื้องต้น จะมีค่าอยู่ประมาณ 3 - 7.5 m/s ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ความเร็วการไหลมาตรฐานของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

เส้นทางการไหล	**ของไหลที่ใช้**		**ความเร็วการไหลมาตรฐาน (m/s)**
	น้ำระบายความร้อน (น้ำจืด)	BsTF 1	0.7 - 2.5
		BsTF 2-4	0.7 - 3.5
	น้ำระบายความร้อน (น้ำทะเล)	* ทองเหลืองแอดมิรัล (Admiral Brass) ที่มีธาตุ	
ในท่อ		สารหนู (Arsenic)	0.7 - 1.5
		BsTF 2-4	0.7 - 2.5
	น้ำมันความหนืดต่ำ (ของเหลว)		0.8 - 1.8
	น้ำมันความหนืดสูง (ของเหลว)		0.5 - 1.5
	ไอของน้ำมัน		5.0 - 15.0
	ของไหลผสมของก๊าซ และของเหลว		2.0 - 6.0
	น้ำ และสารละลายน้ำ		0.5 - 1.5
	น้ำมันความหนืดต่ำ (ของเหลว)		0.4 - 1.0
ในเปลือก	น้ำมันความหนืดสูง (ของเหลว)		0.3 – 0.8
	ไอของน้ำมัน		3.0 – 6.0
	ของไหลผสมของก๊าซ และของเหลว		3.0 – 7.5

* เทียบกับ BsTF1

ที่มา : (วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล, 2536 : 57)

(8) จำนวนเที่ยวการไหลในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อการเลือกจำนวนเที่ยวการไหลที่ถูกต้องในด้านเปลือก และท่อ และการกำหนดความเร็วของของไหลที่เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญ สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือก และท่อ โดยจำนวนการไหล 1 เที่ยว (One Pass or Single Pass) หมายถึง การไหลจากทางเข้าที่ปลายข้างหนึ่งตรงไปยังทางออกที่ปลายอีกข้างหนึ่งของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ถ้ามีการกลับทิศทางการไหลภายในอุปกรณ์ 1 ครั้ง ก็เรียกว่า การไหล 2 เที่ยว (Two Pass) ในกรณีที่จำเป็นตัวใช้จำนวนเที่ยวการไหลมากกว่านี้มักใช้การไหล 4, 6 และ 8 เที่ยว ซึ่งเป็นเลขคู่

จำนวนเที่ยวการไหลของของไหลในเปลือกควบคุมได้โดยการติดตั้งแผ่นแบ่งเที่ยวการไหล (Pass Partition) ภายในช่อง (Channel) ในกรณีที่การไหลในท่อ และเปลือกต่างเป็นแบบทางเดียว (Single Pass) การไหลของของเหลวทั้งสองชนิดควรจะเป็นแบบสวนทางกัน (Counter Flow) เนื่องจากมีประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อนสูงกว่าแบบไหลตามกัน สำหรับในกรณีที่ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่ทางเข้ากับอุณหภูมิที่ทางออกของของไหลแต่ละชนิดมีมาก แต่ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของของไหลทั้งสองที่ทางเข้า และที่ทางออกมีน้อย (ยกตัวอย่างกรณีที่ต้องการลดอุณหภูมิของของไหลทั้งสองในท่อจาก 170 °C เหลือ 40 °C เพื่อเพิ่มอุณหภูมิของของไหลในเปลือกจาก 20 °C เป็น 40 °C) ในกรณีเช่นนี้จะต้องใช้การไหลแบบสวนทางกันเท่านั้น โดยทั่วไปแล้วความเร็วของการไหลของของไหลในท่อแบบสวนทางกันจะมีค่าค่อนข้างต่ำ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพิจารณาหาวิธีการแก้ไขแบบต่าง ๆ เช่น ลดจำนวนท่อถ่ายโอนความร้อนให้น้อยลงโดยเพิ่มความยาวของท่อแต่ละอันให้ยาวขึ้น เป็นต้น

ในกรณีของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนขนาดเล็กหรือในกรณีของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ไม่จำเป็นต้องใช้ความเร็วของของไหลภายในเปลือกสูงมากกว่าปกติ ส่วนใหญ่จะเลือกการไหลของของไหลภายในเปลือกแบบทางเดียว (Single Pass) เพื่อให้โครงสร้างของอุปกรณ์เป็นแบบง่าย ๆ ในกรณีที่การไหลของของไหลในเปลือกเป็นแบบทางเดียว พวย (Nozzle) ที่ทางเข้า และที่ทางออกสำหรับการไหลในเปลือกจะถูกติดตั้งให้ห่างกัน เช่น อันหนึ่งที่บริเวณฝาปิดตัวเปลือก (Shell Cover) ส่วนอีกอันที่บริเวณช่อง (Channel) จำนวนเที่ยวการไหลของของไหลภายในเปลือกถูกจำกัดไม่ให้เกินกว่า 2 เที่ยว สำหรับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแต่ละอุปกรณ์ในกรณีที่จำเป็นต้องใช้จำนวนเที่ยวการไหลในเปลือกมากกว่านี้ ควรใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมาต่อกันแบบอนุกรม ในกรณีของจำนวนเที่ยวการไหลในเปลือก 2 เที่ยว อาจใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพียงอุปกรณ์ตัวเดียว หรืออาจใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดการไหลในเปลือกเที่ยว

เดียวมาต่อกันแบบอนุกรม 2 อุปกรณ์ก็ได้ ในกรณีของจำนวนเที่ยวการไหลในเปลือกตั้งแต่ 3 เที่ยวขึ้นไป ส่วนใหญ่จะได้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดการไหลในเปลือกเที่ยวเดียวที่มีขนาดเท่า ๆ กันมาต่อกันแบบอนุกรมตามจำนวนที่ต้องการ

การเลือกเงื่อนไขของการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน จะต้องคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงสภาพของอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อน ความปลอดภัย และการบำรุงรักษา เป็นต้น ส่วนใหญ่จะไม่มีเกณฑ์ที่แน่นอนสำหรับการเลือกเงื่อนไขแต่จะขึ้นอยู่กับการปรึกษาระหว่างผู้ออกแบบ และผู้ใช้งาน โดยปกติความดัน และอุณหภูมิที่ใช้ออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนทางด้านท่อถ่ายโอนความร้อน และทางด้านเปลือก จะใช้สภาวะการทำงานเป็นข้อมูลสำหรับการออกแบบ

โดยปกติแล้วความดันที่ใช้ออกแบบจะเป็น 1.1 เท่า ของความดันที่ได้เดินเครื่องหรือ 1.8 bar บวกกับความดันความดันที่ใช้เดินเครื่อง โดยเลือกค่าใดค่าหนึ่งที่มากกว่าแต่ในกรณีที่มีวาล์วเปิดที่ทางเข้าออกของอุปกรณ์ให้ใช้ความดันอุปกรณ์สูงสุดที่จะเกิดจากการปิดวาล์วจนสุด ในกรณีที่มีวาล์วนิรภัย (Safety Valve) หรือเอสเคบวาล์ว (Escape Valve) อาจใช้ความดันสูงสุดของวาล์วเป็นความดันของการออกแบบได้ ส่วนใหญ่อุณหภูมิที่ใช้ออกแบบจะเท่ากับ 10 - 20 °C บวกกับอุณหภูมิของการเดินของอุปกณ์ในเวลาปกติแต่ในกรณีที่อุณหภูมิต่ำมากให้ใช้อุณหภูมิของการเดินของอุปกรณ์ลบด้วย 0 - 10 °C เป็นอุณหภูมิที่ใช้ออกแบบในกรณีที่ต้องใช้ไอน้ำไล่ความร้อนออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนหรือในกรณีที่ใช้วัสดุทนไฟหุ้ม (Lining) เพื่อเดินเครื่องที่อุณหภูมิสูงจะต้องคำนวณอุณหภูมิของวัสดุโลหะเพื่อพิจารณาความแข็งแกร่งของวัสดุด้วย

ข้อจำกัดในการออกแบบ และใช้อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือก และท่อ การนำความไอเสียกลับมาใช้ประโยชน์ส่วนมากจะนำมาใช้โดยผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Economizers) ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นโลหะที่สามารถทนต่ออุณหภูมิไอเสียได้ นอกจากนี้การนำความร้อนจากความร้อนไอเสียกลับมาใช้โดยอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนควรคำนึงถึงอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew Point) ของกรดกำมะถัน (H_2SO_4) ซึ่งเกิดจากเชื้อเพลิงที่มีองค์ประกอบของกำมะถัน ส่วนเชื้อเพลิงที่ไม่มีองค์ประกอบของกำมะถันจะใช้อุณหภูมิต่ำสุดของความร้อนทิ้งของไอเสีย หลังจากนำกลับมาใช้ประโยชน์แล้วไม่ต่ำกว่า 180 °C ส่วนเชื้อเพลิงที่ไม่มีองค์ประกอบของกำมะถันจะใช้อุณหภูมิต่ำสุดของความร้อนทิ้งของไอเสีย หลังจากนำกลับมาใช้ประโยชน์แล้วไม่ต่ำกว่า 180 °C และประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนของอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนเท่ากับ 70% (ธนากร ณ พัทลุงและคณะ, 2550 : 36) การติดตั้งอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนจะคุ้มค่าก็ต่อเมื่อหม้อน้ำมีขนาดการผลิตไอน้ำประมาณ 3.6 t/h หรือมากกว่า ในกรณีที่หม้อน้ำต้องเดินที่ภาระโหลดต่ำ ๆ เป็นเวลานานก็จำเป็นต้องติดตั้งทางผ่าน (Bypass) เพื่อบังคับให้ความร้อนทิ้งออกทางปล่องไฟโดยตรง โดยไม่ผ่านอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนเพื่อหลีกเลี่ยงการกลั่นตัวของกรดที่จะทำให้เครื่องประหยัดพลังงานผุกร่อนอันเนื่องมาจากอุณหภูมิความร้อนทิ้งต่ำเพื่อต้านทานการกัดกร่อนจะผลิต

อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนจากวัสดุที่ทนทาน การกัดกร่อนคือใช้วัสดุเป็นเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel : *SUS304*) หรือลดอุณหภูมิจุดน้ำค้างกรดของความร้อนไอเสียโดยการเติมสารเคมีเข้าไปในน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดน้ำมันเตา อย่างไรก็ตามการใช้ประโยชน์จากอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนจะไม่สามารถทำได้หากอุณหภูมิของความร้อนภายหลังผ่านอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนต่ำเกินไป ทั้งนี้เนื่องจากมีผลต่อแรงลมไหลผ่าน (Draft Force) และอาจก่อให้เกิดการกลั่นตัวของกรดกำมะถัน ในกรณีที่เชื้อเพลิงมีปริมาณกำมะถันปนอยู่ซึ่งอาจจะก่อให้เกิดการกัดกร่อนอุปกรณ์โลหะได้ อุณหภูมิที่ก่อให้เกิดการกลั่นตัวนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณของกำมะถันที่อยู่ในเชื้อเพลิง รวมทั้งยังต้องประเมินค่าแรงดันลด (Pressure Drop) ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนส่งผลต่อแรงลมไม่ผ่านด้วยหรือไม่เช่นนั้น ขีดจำกัดของอุณหภูมิที่สามารถลดลงได้ของความร้อนทิ้งของไอเสียเพื่อป้องกันไม่ให้มีผลกระทบค่าแรงลมไหลผ่าน และการเกิดการกัดกร่อนของกรดกำมะถันในปล่องระบายความร้อนทิ้ง

(1) การคำนวณแรงดันขับของความร้อนของไอเสียหม้อน้ำเกือบทุกอุปกรณ์จะต้องมีปล่องไอเสียซึ่งปล่องไอเสียช่วยในการขับดันปริมาณอากาศที่ต้องการเพื่อเอาชนะความดันสูญเสียในระบบ ปล่องไอเสียมีหน้าที่สองอย่างคือ ทำให้เกิดแรงขับดันอากาศ และความร้อนทิ้ง และทำให้ไอเสียที่ออกจากหม้อไอน้ำกระจายขึ้นไปในบรรยากาศได้ง่าย การคำนวณหาความดันขับ (Driving Pressure) หาได้จากสมการ (2.2) ดังนี้

$$\Delta P_d = (\rho_a - \rho_s) Hg \qquad (2.2)$$

เมื่อ ΔP_d = ความดันขับ (N/m^2)

ρ_a = ความหนาแน่นของอากาศบรรยากาศปกติ (kg/m^3)

ρ_s = ความหนาแน่นของอากาศภายในเปลือก (kg/m^3)

H = ความสูงปล่องไอเสีย (m)

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (m/s^2)

เช่น หม้อน้ำที่มีขนาดอัตราการผลิตไอน้ำ 2 t/h ใช้เชื้อเพลิงดีเซล ซึ่งมีความร้อนของไอเสียที่ออกจากปล่องหม้อน้ำที่อุณหภูมิ 250 °C โดยติดตั้งปล่องไอเสียมีความสูง 20 m มีอุณหภูมิหลังผ่านอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนเท่ากับ 100 °C ความดันขับของปล่องไอเสียที่ลดลงสามารถคำนวณได้จากคุณสมบัติของอากาศ

T = 250 °C จะได้

ρ_s = 0.705 kg/m^3

T = 100 °C จะได้

ρ_a = 0.952 kg/m^3

T = 30 °C จะได้

ρ_s = 1.12 kg/m^3

แทนค่าใน (2.2)

ΔP_d = (1.12 – 0.705)kg/m^3 (20m)(9.81m/s^2)

ΔP_d = 81.46 N/m^2

พิจารณาความดันขับจากอุณหภูมิความร้อนทิ้งที่ผ่านอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนจะได้

ΔP_d = (1.12 – 0.952)kg/m^3 (20m)(9.81m/s^2)

ΔP_d = 33.00 N/m^2

ดังนั้นความดันขับของปล่องไอเสียที่ลดลงเท่ากับ

81.40 - 33.00 = 48.40 Pa หรือเท่ากับ 0.2 in H_2O

(2) การหาจุดการกลั่นตัวของไอน้ำ และกรดกำมะถัน สามารถหาอุณหภูมิกลั่นตัวของไอน้ำจากการคำนวณดังนี้ เช่น หม้อน้ำใช้น้ำมัน ($C_{12}H_{26}$) เป็นเชื้อเพลิง การสันดาปมีอากาศส่วนเกิน 20% จงหาอุณหภูมิต่ำสุดของปล่องไอน้ำเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการกลั่นตัวของไอน้ำ ถ้าก๊าซไอเสียที่ออกจากปล่องมีความดัน 3.17 kg/cm^2 เมื่อการเผาไหม้โดยอากาศ 100% ทางทฤษฎี (อากาศเท่ากับ 3.76 mol ของ N_2 ต่อ 1 mol ของ O_2) จะได้สมการ

$$C_{12}H_{26} + 18.5O_2 + 69.56N_2 = 12CO_2 + 13H_2O + 69.56N_2$$

สำหรับการเผาไหม้โดยอากาศส่วนเกินทฤษฎี 20 % จะได้สมการ

$$C_{12}H_{26} + 22.2O_2 + 83.4N_2 = 12CO_2 + 13H_2O + 3.7O_2 + 83.47N_2$$

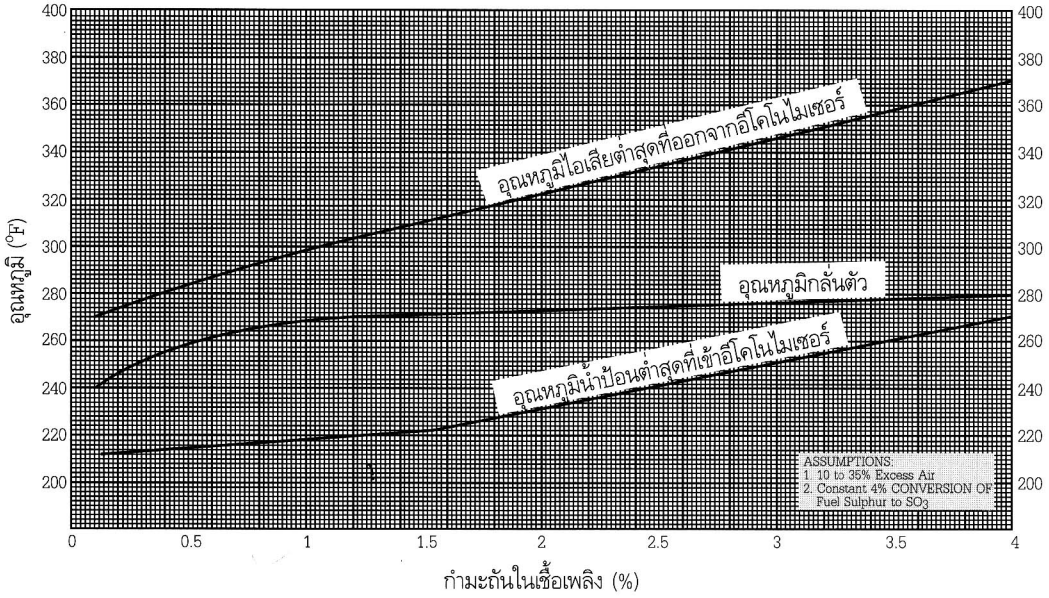
จะได้ความดันย่อยของไอน้ำในความร้อนดังนี้

$$\frac{(3.17 \times 13)}{(12 + 13 + 3.7 + 83.47)} = 0.367 \text{ kg/cm}^2$$

เมื่อเปิดตารางคุณสมบัติของไอน้ำที่ความดัน 0.367 kg/cm^2 จะได้อุณหภูมิ 76.3 °C ดังนั้นอุณหภูมิที่ปล่องไอเสียจะต้องมีอุณหภูมิสูงกว่า 73.3 °C เพื่อป้องกันการกลั่นตัวของไอน้ำ

สำหรับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ในไอเสียจากการเผาไหม้ตามปกติจะมีค่าต่ำกว่า 0.2% แต่ 1 - 5% ของไอเสียจะออกมาในรูปของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_3) ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับไอน้ำเกิดเป็นกรดซัลฟูริค และไอกรดซัลฟูริคในไอเสียจากการเผาไหม้จะทำให้อุณหภูมิจุดน้ำค้างของกรดสูงขึ้น ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามปริมาณกรดกำมะถันในเชื้อเพลิง อากาศส่วนเกิน ปริมาณไอน้ำ และวิธีการเผาไหม้ แต่บางครั้งอุณหภูมิอาจสูงขึ้นได้ถึง 160°C เมื่ออุณหภูมิของความร้อนที่เผาไหม้

สูงขึ้นจนถึงจุดน้ำค้างของกรดซัลฟูริค ก็จะเริ่มควบแน่นโดยปริมาณความแน่นจะสูงสุดที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดน้ำค้าง 15 - 40°C ทำให้เกิดการกัดกร่อนรุนแรงที่สุด



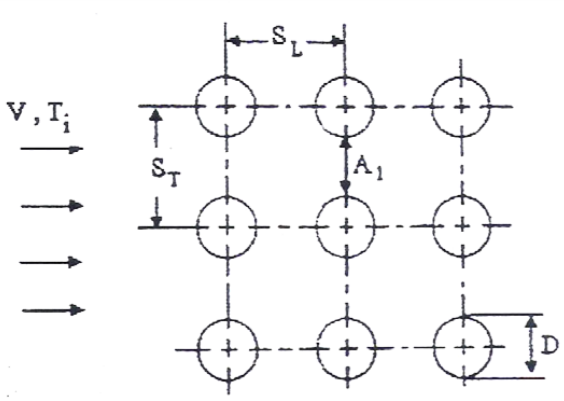
ภาพที่ 2.13 อุณหภูมิการกลั่นตัวของกรดกำมะถัน

จากภาพที่ 2.13 อุณหภูมิที่ก่อให้เกิดการกลั่นตัวของกรดกำมะถัน จะขึ้นอยู่กับปริมาณของกรดกำมะถันที่อยู่ในเชื้อเพลิงซึ่งจะเป็นตัวกำหนดซึ่งเป็นข้อจำกัดต่อการออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือก และท่อ

(3) การไหลผ่านกลุ่มท่อ

การไหลผ่านกลุ่มท่อจะนิยมใช้กับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เช่น คอนเดนเซอร์ อีวาพอเรเตอร์ ของโรงต้นกำลัง ตู้เย็น และเครื่องปรับอากาศ เป็นต้น โดยของไหลจะไหลตั้งฉากกับกลุ่มท่อในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้กลุ่มท่อ โดยทั่วไปท่อจะถูกติดตั้งอยู่ในเปลือก ซึ่งเรียกว่าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือก และท่อ (Shell and Tube Heat Exchanger) โดยการไหลสายหนึ่งไหลอยู่ในเปลือก และของไหลอีกสายไหลอยู่ในกลุ่มท่อ การไหลผ่านกลุ่มท่อจะวิเคราะห์โดยพิจารณาการไหลในกลุ่มท่อ กลุ่มท่อจะถูกจัดเรียง 2 ลักษณะ คือ

(3.1) การจัดวางแบบแถวเรียง (In - Line or Alincd Arrangement)



ภาพที่ 2.14 ลักษณะการจัดเรียงกลุ่มท่อแบบแถวเรียง

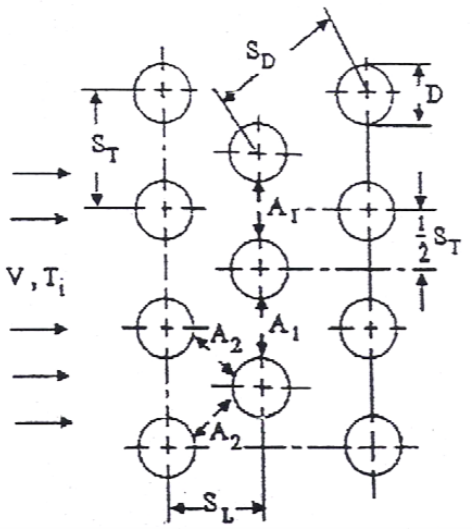
การจัดวางท่อแบบท่อแถวเรียง เป็นอีกวิธีสำหรับการออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อ ซึ่งเป็นวิธีที่มีต้นทุนการสร้างต่ำ ในขณะเดียวกันก็ให้สมรรถนะอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนสูง ซึ่งเหมาะกับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว ซึ่งเป็นหม้อน้ำขนาดเล็ก มีอัตราการผลิตไอน้ำที่ 500 kg/h ที่ความดันใช้งานไม่เกิน 7 kg/cm^2

การจัดวางท่อในกลุ่มท่อถูกจัดในลักษณะวางท่อในแถวเดียวกัน (Transverse Pitch, S_T) วางในแนวต่างแถวกัน (Longitudinal Pitch, S_L) และวางแบบทแยงมุม (Diagonal Pitch, S_D) ศูนย์กลางท่อระยะเยื้องศูนย์หาได้จากสมการที่ 2.3

$$S_D = \sqrt{S_L^2 + (\frac{S_T}{2})^2} \qquad (2.3)$$

ของไหลที่ไหลผ่านกลุ่มท่อ พื้นที่การไหลจะลดลงจาก $A_1 = S_T L$ ไปยัง $A_T = (S_T - D)L$ ท่อทำให้การไหลมีความเร็วเพิ่มขึ้น

(3.2) การจัดวางแบบแถวเยื้อง (Staggered Arrangement)



ภาพที่ 2.15 ลักษณะการจัดเรียงกลุ่มท่อแบบวางเยื้องกัน

การจัดวางแบบท่อเยื้อง ความเร็วจะเพิ่มขึ้นในแนวทแยงมุมมากขึ้นถ้าแถวของท่อชิดกันมาก ในกลุ่มท่อคุณลักษณะการไหลจะขึ้นอยู่กับความเร็วสูงสุด (Maximum Velocity) ซึ่งเกิดขึ้นภายในกลุ่มท่อมากกว่า ความเร็วอิสระ (Flow Velocity) ดังนั้นค่าเลขเรย์โนลดส์หาได้บนฐานของความเร็วสูงสุด

$$Re_{s,max} = \frac{V_{s,max} D_o \rho_s}{\mu_s} = \frac{V_{s,max} D_o}{\nu_s} \qquad (2.4)$$

ความเร็วสูงสุดหาได้จากกฎการอนุรักษ์มวล (Conservation of Mass) ซึ่งจำเป็นสำหรับการศึกษาพฤติกรรมของของไหลที่อัดตัวไม่ได้ สำหรับการจัดวางแบบแถวเรียง ความเร็วสูงสุดจะเกิดขึ้นในพื้นที่การไหลน้อยที่สุดระหว่างท่อ

กฎการอนุรักษ์มวล

$$\rho V_\infty A_1 = \rho V_{max} A_2 \qquad (2.5)$$

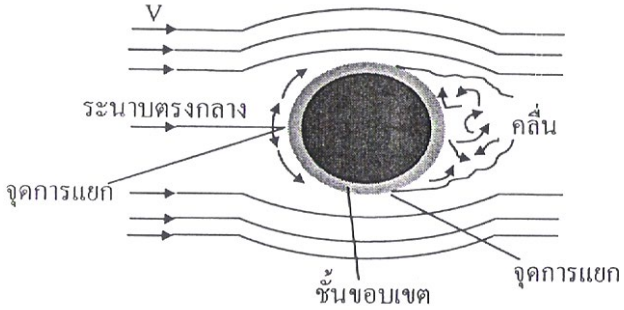
หรือ

$$V_\infty S_T = V_{max}(S_T - D_o)$$

$$V_{max} = \frac{S_T}{S_T - D_o} V_\infty \qquad (2.6)$$

การไหลตั้งฉากกับวัตถุรูปทรงกระบอกจะเห็นลักษณะ และพฤติกรรมของวัตถุที่มีอิทธิพลต่อการไหลของของไหลค่อนข้างมาก โดยลักษณะการไหลขึ้นอยู่กับความเร็วของของไหลและค่าของตัวเลขเรย์โนลดส์ ซึ่งคำนวณโดยใช้เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกท่อสามารถหาได้จากสมการที่ 2.7

$$Re_d = V_\infty \frac{d}{v} \tag{2.7}$$



ภาพที่ 2.16 รูปแบบการไหลข้ามทรงกระบอก

สภาวะการไหลภายนอกของของไหลที่มีความเร็วสม่ำเสมอ (V_∞) ที่ไหลตั้งฉากกับแกนของทรงกระบอกเมื่อของไหลไหลมาปะทะกับพื้นผิวทรงกระบอกจะเกิดสภาวะที่เรียกว่า Forward Stagnation Point ลักษณะของความดันจะเพิ่มขึ้นที่จุดนี้ และเกิดชั้นชิดผิวโค้งตามพิกัด x ซึ่งวัดเชิงมุม θ ด้วยความเร็วเมื่อเกิดกระแสคงที่ $(V_\infty) = (V_\infty)(x)$

(9) ลักษณะของพฤติกรรมที่เกิดการเปลี่ยนแปลง

เมื่อ $(V_\infty) = 0$ ที่จุดสแตกเนชั่น (Stagnation) จากนั้นของไหลจะมีความเร่งอันเป็นผลจากแรงเนื่องจากความดันสุทธิมีทิศทางเดียวกับการไหลเรียกบริเวณนี้ว่าบริเวณการไหลเร่ง (Favorable Pressure Gradient)

$$\frac{\partial P}{\partial X} < 0 \tag{2.8}$$

จนกระทั่งของไหลมีความเร็วสูงสุด

$$\frac{\partial P}{\partial X} = 0 \tag{2.9}$$

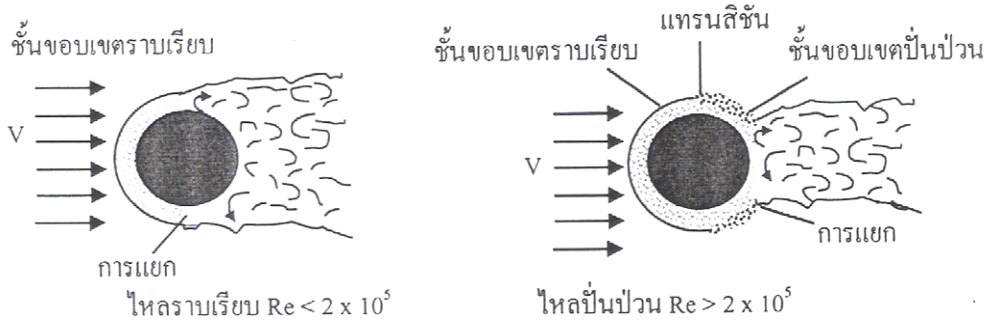
จากนั้นของไหลจะเข้าสู่บริเวณการไหลหน่วง

$$\frac{\partial P}{\partial X} > 0 \qquad (2.10)$$

ในบริเวณการไหลหน่วงจะพบว่าเกรเดียนต์ของความเร็วที่ผิวทรงกระบอก

$$\left.\frac{\partial u}{\partial y}\right|_{y=0} = U \qquad (2.11)$$

ซึ่งจุดนี้เรียกว่าจุดแยกหลุดจากผิว (Separation Point) ของของไหลบริเวณใกล้ ๆ ผิวทรงกระบอกจะมีโมเมนตัมเพียงพอที่จะเอาชนะแรงเนื่องจากความดันสุทธิ ซึ่งกระทำในทิศทางตรงกันข้ามกับการไหลจึงทำให้การไหลกลับทาง และเกิดการไหลของของไหลบริเวณด้านหลังของทรงกระบอก และบริเวณนี้เรียกว่า บริเวณกระแสวน (Wake Region)



ภาพที่ 2.17 ความปั่นป่วนทำให้การแยกจากการไหลห่างออกไป

การไหลท่วมวัตถุรูปทรงกระบอกจะทำให้เกิดการแยกหลุดจากผิวหรือกระแสวนบริเวณด้านหลังของทรงกระบอกหรือไม่นั้นขึ้นอยู่กับตัวเลขของเรย์โนลดส์ ดังภาพที่ 2.17

ถ้า $Re_d < 1.0$ จะเกิดแรงเฉื่อยน้อยมาก การต้านทางการไหลเป็นผลมาจากแรงเนื่องจากความหนืด ไม่เกิดการหลุดจากผิวชั้นบริเวณที่ชิดผิวจะมีลักษณะของการเกาะติดผิวทรงกระบอก

ถ้า $Re_d = 100$ จะเกิดการแยกหลุดจากผิว และเกิดการไหลวนการต้านทานการไหลเป็นผลมาจากแรงเนื่องจากความดันสุทธิในทิศทางตรงกันข้ามกับการไหล

ถ้า $103 < Re_d < 105$ จะเกิดการต้านทางการไหลเป็นผลมาจากแรงเนื่องจากความดันสุทธิในบริเวณกระแสแบบปั่นป่วนด้านหลังของทรงกระบอก

ถ้า $Re_d > 105$ เกิดชั้นผิวชิดแบบราบเรียบบริเวณด้านหน้าของทรงกระบอก และเปลี่ยนแปลงเป็นชั้นชิดผิวแบบปั่นป่วนซึ่งยังคงเกาะติดผิวทรงกระบอกอยู่ ต่อจากนั้นจึงเกิดการแยกหลุดจากผิว และของไหลไหลผ่านไปทางด้านหลัง

(10) การพาความร้อนแบบบังคับไหลผ่านกลุ่มท่อ

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนส่วนมากจะประกอบด้วยท่อหลายท่อวางเรียงกันเป็นกลุ่มท่อซึ่งการจัดวางท่อจะมีอยู่ 2 แบบ คือ แบบเรียงอยู่ในแนวเดียวกัน (In - line) และแบบเรียงทแยงแถว (Staggered) สำหรับการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน Holman ได้เสนอไว้ดังนี้

$$Nu = \frac{\overline{h}d}{k_f} = CRe^{m}_{d,max} Pr_f^{1/3} \qquad (2.12)$$

โดย C และ m คือ ค่าคงที่จากตารางที่ 2.6

$Re_{d,max}$ = เลขเรย์โนลดส์บริเวณที่มีความเร็วสูงสุด

Pr_f = เลขแพรนด์ทัลที่อุณหภูมิที่ผิว และสิ่งแวดล้อม

h = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ย

สำหรับ v_{max} ของการจัดวางท่อแบบเรียงแถวสามารถหาได้จากสมการ

$$v_{max} = v\infty \frac{S_n}{S_{n-d}} \qquad (2.13)$$

โดยทั่วไปสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ยภายในกลุ่มท่อสำหรับอากาศไหลผ่านกลุ่มท่อเท่ากับ 10 แถว หรือมากกว่า 10 แถว ($N_L \geq 10$) จาก Grimision ได้แสดงสมการสหสัมพันธ์ไว้ในสมการดังนี้

$$\overline{Nu}_D = C_1 Re^{m}_{D,max} \begin{bmatrix} N_L \geq 10 \\ 2000 < Re_{D,max} < 40{,}000 \\ Pr = 0.7 \end{bmatrix} \qquad (2.14)$$

เมื่อ C_1 และ m หาได้จากตารางที่ 2.4

ในทางปฏิบัติสำหรับของไหลอื่น ๆ ที่ไม่ใช่อากาศค่า $\overline{Nu}_d$ ต้องคูณด้วยแฟกเตอร์ $1.13\,Pr^{1/3}$

$$\overline{Nu}_d = 1.13C\,Re^{m}_{D,max} Pr^{1/3}$$

ในการวิเคราะห์สมรรถนะอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนจำเป็นจะต้องวิเคราะห์ตัวแปรต่าง ๆ เช่น Nu, Rr, Pr เป็นต้น ซึ่งตัวแปรเหล่านี้จะมีแฟกเตอร์ที่เกิดขึ้นจากการออกแบบ เช่น ค่า C และ m ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับสัดส่วนระยะห่างระหว่างท่อต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ดังนั้นการใช้เฟคเตอร์ C และ m จะต้องใช้ค่าตามตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ค่าคงที่สำหรับการถ่ายโอนความร้อนสำหรับอากาศไหลผ่านกลุ่มท่อตั้งแต่ 10 แถวขึ้นไป

$\frac{S_L}{D}$	$\frac{S_T}{D}$ 1.25		1.5		2.0		3.0	
	C	*m*	*C*	*m*	*C*	*m*	*C*	*m*
Aligned								
1.25	0.386	0.592	0.305	0.608	0.111	0.704	0.0703	0.752
1.5	0.407	0.586	0.278	0.602	0.112	0.702	0.0753	0.744
2.0	0.464	0.570	0.322	0.602	0.254	0.632	0.220	0.648
3.0	0.322	0.601	0.396	0.584	0.415	0.581	0.317	0.608
Staggered								
0.6	-	-	-	-	-	-	0.236	0.636
0.9	-	-	-	-	0.495	0.571	0.445	0.581
1.0	-	-	0.552	0.558	-	-	-	-
1.125	-	-	-	-	0.531	0.565	0.575	0.560
1.25	0.575	0.556	0.561	0.554	0.576	0.556	0.579	0.562
1.5	0.501	0.568	0.511	0.562	0.502	0.568	0.542	0.568
2.0	0.448	0.572	0.462	0.568	0.535	0.556	0.498	0.570
3.0	0.344	0.592	0.395	0.580	0.488	0.652	0.467	0.574

ที่มา : (ธรณ์ บพิตรพิทักษ์, 2543 : 14 - 15)

สำหรับคุณสมบัติของของไหลทั้งหมดประเมินจากอุณหภูมิที่ฟิล์มของของไหล ถ้า (N_L<10) ใช้แฟกเตอร์แก้ไขได้ดังนี้

$$\overline{Nu}_{D,(N_L<10)} = C_2 \overline{Nu}_{D,(N_L\geq 10)} \quad (2.15)$$

เมื่อ C_2 สำหรับการวิเคราะห์ *Nu* จะต้องทราบจำนวนแถวโดยหาได้จากตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ค่าแฟกเตอร์แก้ไข C_2 ของสมการสำหรับกลุ่มท่อน้อยกว่า 10 แถว (N_2 < 10)

N_L	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Aligned	0.64	0.80	0.87	0.90	0.92	0.94	0.96	0.98	0.99
Staggered	0.68	0.75	0.83	0.89	0.92	0.95	0.97	0.98	0.99

สมการความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนของกลุ่มท่อวางแบบแถวเรียง ซึ่งใช้ได้กับช่วง $10 < Re_{d,max} < 10^6$ และ $0.7 < Pr < 500$

$$Nu = \frac{\bar{h}d}{k_f} = C\,Re_{d,max}^{n}\,Pr_f^{0.36}\left(\frac{Pr}{Pr_w}\right)^{1/4} \qquad (2.16)$$

โดย C และ m คือ ค่าคงที่จากตารางที่ 2.6

Pr_w คือ ตัวเลขแพรนด์ทัล ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

ตารางที่ 2.6 ค่าคงที่สำหรับการไหลแบบตั้งฉากในกลุ่มท่อ

Configuration	$Re_{D,max}$	C	m
Aligned	$10 - 10^2$	0.80	0.40
Staggered	$10 - 10^2$	0.90	0.40
Aligned	$10^2 - 10^3$	Approximate as a Single	
Staggered	$10 - 10^2$	(Isolated) Cylinder	
Aligned	$10^3 - 2 \times 10^5$	0.27	0.63
$(S_T/S_L > 0.7)$[a]			
Staggered	$10^3 - 2 \times 10^5$	$0.35(S_T/S_L)^{1/5}$	0.60
$(S_T/S_L < 2)$			
Staggered	$10^3 - 2 \times 10^5$	0.40	0.60
$(S_T/S_L > 2)$			
Aligned	$2 \times 10^5 - 2 \times 10^6$	0.021	0.84
Staggered	$2 \times 10^5 - 2 \times 10^6$	0.022	0.84

ที่มา : (ธรณ์ บพิตรพิทักษ์, 2543 : 18 - 17)

สำหรับ $S_T/S_L > 0.7$ อัตราการถ่ายโอนความร้อนประสิทธิภาพต่ำ และการจัดวางกลุ่มท่อแบบ Aligned ไม่ควรใช้

แต่ถ้าจำนวนแถวกลุ่มท่อน้อยกว่า 20 แถว ($N_L < 20$) ใช้แฟกเตอร์แก้ไข ดังนี้

$$Nu_{D,(N_L<20)} = C_2 Nu_{D,(N_L\geq 20)} \quad (2.17)$$

เมื่อ C_2 หาได้จากตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ค่าแฟกเตอร์แก้ไข C_2 ในกลุ่มท่อที่น้อยกว่า 20 แถว

N_L	1	2	3	4	5	7	10	13	16
Aligned	0.70	0.80	0.86	0.90	0.92	0.95	0.97	0.98	0.99
Staggered	0.64	0.76	0.84	0.89	0.92	0.95	0.97	0.98	0.99

สำหรับกรณีที่ทราบค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมของกลุ่มท่อโดยสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนได้จากสมการ (2.18)

$$\overline{h} = \frac{q}{A\Delta T_{lm}} \quad (2.18)$$

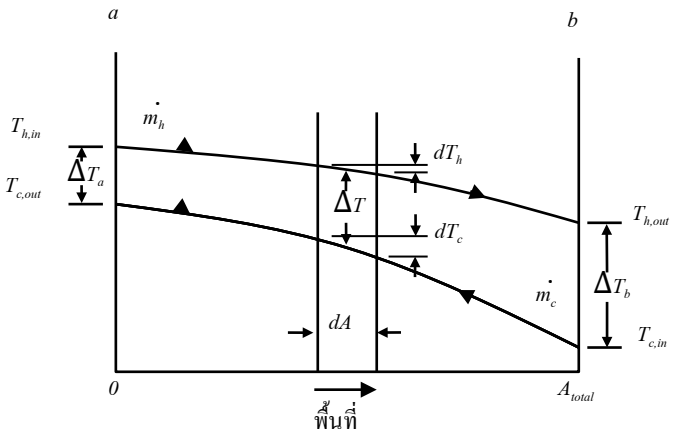
โดยที่ q = อัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมของกลุ่มท่อ (kJ/kg)

A = พื้นที่การถ่ายโอนความร้อนของกลุ่มท่อ (m^2)

ΔT_{lm} = อุณหภูมิแตกต่างลอกาลิทึม (°C)

5.6 ทฤษฎีการคำนวณเกี่ยวกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

วิธีการคำนวณในการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่นิยมใช้กัน มี 2 วิธี คือ วิธีค่าความแตกต่างอุณหภูมิแบบล็อกมีน (Logarithmic Mean Temperature Difference) หรือวิธีแอลเอ็มทีดี (*LMTD* Method) และวิธีจำนวนหน่วยถ่ายโอนความร้อน (Number Of Heat Transfer Unit) หรือวิธีเอ็นทียู (*NTU* Method) ทั้งสองวิธีนี้จะให้ผลลัพธ์เช่นเดียวกัน การใช้วิธี *LMTD* นั้นถ้าทราบอุณหภูมิของของไหลทั้งสองที่ทางเข้า และทางออกของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแล้ว สามารถนำค่าอุณหภูมิเหล่านี้ไปใช้ในการหา Log - Mean Temperature Difference และเมื่อทราบค่าอัตราการไหลของของไหลร้อน, m_h และของไหลเย็น, m_c ก็สามารถที่จะคำนวณหาอัตราการ ถ่ายโอนความร้อน, Q จากนั้นเมื่อทราบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวม, U_o แล้วก็สามารถที่จะคำนวณหาพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนได้ สำหรับวิธี *NTU* การคำนวณหาพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน, A ทำได้โดยการเริ่มจากคำนวณค่าประสิทธิผลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน, (*Eff*) และค่าอัตราส่วนความจุความร้อน, C นำค่าทั้งสองไปหาค่าของ *NTU* จากสมการหรือกราฟที่เหมาะสมจากนั้นจะสามารถหาค่า A ได้จากสมการของ *NTU*



ภาพที่ 2.18 อุณหภูมิการไหลสวนทางกัน

ในการศึกษาครั้งนี้จะกล่าวถึงเฉพาะวิธี *LMTD* (Suryanarayana and Arici, 2003 : 157-158) ของอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนจะง่ายกว่าวิธี *NTU* ซึ่งต้องใช้กราฟ และสมการที่ซับซ้อน โอกาสที่จะคลาดเคลื่อนมีมากกว่าการวิเคราะห์อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยวิธี *LMTD* การคำนวณหาอัตราถ่ายโอนความร้อนในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ของไหลสองชนิดไม่ปนกัน และไหลทิศทางตั้งฉากกับ (Counter - Flow Heat Exchanger) ตามที่แสดงในภาพที่ 2.18

สมการที่ใช้ในการคำนวณสมรรถนะทางความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเป็นการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน และแฟกเตอร์ความเสียดทานด้านเปลือก ซึ่งจะคำนวณโดยตั้งสมมุติฐานของความเร็วของของไหลภายในเปลือก ความเร็วเชิงเส้น และความเร็วเชิงมวลจะอยู่บนฐานของพื้นที่หน้าตัดการไหลกึ่งกลางเปลือก (a_s) อย่างไรก็ตามวิธีนี้จะให้สมรรถนะต่ำในการคำนวณความดันลดภายในเปลือก สมมุติให้ค่าความร้อนจำเพาะคงที่ และปลั๊กการไหล (Plug Flow) (หมายถึงความเร็วสม่ำเสมอตลอดแนวรัศมี) ในด้านเปลือกซึ่งมีขั้นตอนการคำนวณดังนี้

การคำนวณสมรรถนะของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในระบบความร้อนทิ้งกลับคืนจากความร้อนทิ้งออกปล่องไอเสียมีลักษณะของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เป็นกลุ่มท่อ และการจัดวางท่อเป็นแบบวางเรียงกันเป็นแถวแนวดิ่ง จำนวน 5 แถว และจำนวนท่อ 50 กลับ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนส่วนมากจะจัดให้มีจำนวนแถวของท่อมีจำนวนมาก คุณสมบัติของการถ่ายโอนความร้อนสำหรับกลุ่มท่อจึงเป็นสิ่งจำเป็น คุณสมบัติการถ่ายโอนความร้อนของกลุ่มที่ที่มีการจัดวางในลักษณะเป็นแบบแถวเรียงกันทั้งในแนวระดับ และแนวตั้งฉาก

6.1.1 การคำนวณค่าตัวแปรภายในเปลือก

(1) การคำนวณหาค่าความเร็วไหลสูงสุดภายในเปลือก (Shell Side Maximum Flow Velocity, $V_{s,max}$) ความเร็วสูงสุดของพื้นที่การไหลในเปลือกหาได้จากกฎการอนุรักษ์มวลสำหรับของไหลอัดตัวไม่ได้คือ

$$V_{s,max} = \frac{S_T}{S_T - D_o} V_s \qquad (2.19)$$

เมื่อ $V_{s,max}$ = ความเร็วสูงสุดของพื้นที่การไหลในเปลือก (m/s)

V_s = ความเร็วอิสระของของไหลในเปลือก (m/s)

S_T = ระยะห่างของท่อที่อยู่ในแถวเดียวกัน (m)

D_o = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกท่อ (m)

(2) การคำนวณค่าเลขเรย์โนลดส์ในเปลือก (Shell Side Reynolds Number : $Re_{s,max}$)

$$Re_{s,max} = \frac{V_{s,max} D_o \rho_s}{\mu_s} = \frac{V_{s,max} D_o}{\nu_s} \qquad (2.20)$$

เมื่อ μ_s = ความหนืดสัมบูรณ์ของของไหลในเปลือก (Pas)

ν_s = ความหนืดจลน์ของของไหลในเปลือก (m^2/s)

ค่าเลขเรย์โนลดส์สูงสุด สามารถคำนวณโดยใช้ค่าความเร็วสูงสุดของการไหลของของไหลในกลุ่มท่อที่จัดวางแบบแถวตรง ซึ่งความเร็วสูงสุดที่เกิดขึ้นระหว่างระยะห่างของท่อในแถวเดียวกัน

(3) การคำนวณค่าเลขนัสเซลท์ในเปลือก (Nusselt Number, Nu_s)

$$Nu_s = C_2 C Re_{s,max}^{m} Pr_s^{0.36} \left(\frac{Pr_s}{Pr_w} \right)^{0.25} \qquad (2.21)$$

เมื่อ Nu_s = ค่าเลขนัสเซลท์ภายในเปลือก

C_2 = Correction Factor of Tube Bank For $N_L \leq 10$ ($Re_s > 10^3$)

C = ค่าคงที่การไหลผ่านกลุ่มท่อที่ไหลแบบตั้งฉาก (ตารางที่ 2.8)

m = Constant Value For the Tube Bank In Cross Flow

$Re_{s,max}$ = ค่าเลขเรย์โนลดส์ของการไหลภายในเปลือก

Pr_s = เลขแพรนด์ทัลของการไหลภายในเปลือก

Pr_w = เลขแพรนด์ทัลของการไหลที่ประเมินจากอุณหภูมิพื้นผิวของกลุ่มท่อ

$$N_L \geq 20$$

เงื่อนไข $0.7 < Pr_S < 500$

$$1000 < Re_{s,max} < 2 \times 10^6$$

เมื่อ C_2 เป็นค่าแฟกเตอร์ปรับแก้ของกลุ่มท่อเมื่อจำนวนแถวของกลุ่มท่อน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10 แถว และค่าเลขเรย์โนลดส์มากกว่า 1000 ($N_L \leq 10$ $Re_s > 1000$) สามารถหาได้จากตารางที่ 2.7

ค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของของไหลที่ใช้ในสมการ 2.22 ต้องเป็นคุณสมบัติที่หาจากค่าอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิของผิววัตถุกับอุณหภูมิของของไหล (T_f) หาค่าได้จากสมการ

$$\overline{T_f} = \frac{T_S + T_\infty}{2} \quad (2.22)$$

เมื่อ $\overline{T_f}$ = ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิของผิววัตถุกับอุณหภูมิของของไหล

T_s = อุณหภูมิเปลือก, (°C)

T_∞ = อุณหภูมิของของไหล, (°C)

(4) การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนภายในเปลือก, (Shell Coefficient, h_s)

$$h_s = \frac{Nu_S k_S}{D_o} \quad (2.23)$$

(5) การคำนวณค่าความดันลดภายในเปลือก (Pressure Drop; ΔP_s)

$$\Delta P_s = \frac{2 f_2 G_{max}^2 N_L}{\rho_S}\left(\frac{\mu_w}{\mu_S}\right)^x = \frac{2 f_2 N_L (\rho_S V_{S,max})^2}{\rho_S}\left(\frac{\mu_w}{\mu_S}\right)^{0.14} \quad (2.24)$$

เมื่อ ΔP_s = ค่าความดันลดในเปลือก (Pa)

f = แฟกเตอร์ความเสียดทานของกลุ่มท่อ

N_L = จำนวนแถวของกลุ่มท่อ

x = Correction Factor For In Line Tube Bank Arrangement

ρ_S = ความหนาแน่นของของไหลในเปลือกที่อุณหภูมิของไหลอิสระ (kg/m^3)

(6) การคำนวณค่าแฟกเตอร์ความเสียดทาน (Friction factor; f)

$$f = \left\{ 0.44 + \frac{0.08 S_L / D_O}{\left[\left(S_T - D_O \right) / D_O \right]^{0.43+1.13 D_O / S_L}} \right\} Re_{s,max}^{-0.15} \qquad (2.25)$$

สำหรับการจัดวางกลุ่มท่อแบบเรียงเป็นแถวตรง

เมื่อ S_L = ระยะห่างจากเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อแต่ละแถว (m)

S_T = ระยะห่างจากเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อในแนวเดียวกัน (m)

D_o = เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกท่อ (m)

สำหรับการไหลรอบ ๆ กลุ่มท่อในแถวที่ 1 จะมีลักษณะเดียวกับท่อเดี่ยวในการไหลแบบตัดกัน (Cross Flow) และแถวต่อมาลักษณะการไหลจะขึ้นอยู่กับการจัดวางกลุ่มท่อว่าเป็นแบบเรียงเป็นแถวตรง (Aligned) หรือแบบเรียงทแยงแถว (Staggered) สำหรับการจัดวางแบบแถวตรงหลังท่อแถวแรก จะเกิดการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) ขึ้น และค่าเฉลี่ยของ S_L

6.1.2 การคำนวณค่าตัวแปรภายในท่อ

(1) การคำนวณหาพื้นที่ผิวการถ่ายโอนความร้อน (Area for Pipe, A_t)

$$A_t = \frac{Q}{U \Delta T_{lm}} \qquad (2.26)$$

เมื่อ A_t = พื้นที่ผิวการถ่ายโอนความร้อน (m^2)

Q = พลังงาน (W)

U = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (W/m^2 °C)

ΔT_{lm} = อุณหภูมิของ ๆ ไหล ต่ำสุด-สูงสุด (°C)

(2) การคำนวณหาค่าความเร็วเชิงมวลภายในท่อ (Tube Side Mass Velocity, G_t)

$$G_t = \frac{W_t}{A_t} \qquad (2.27)$$

เมื่อ G_t = ค่าความเร็วเชิงมวลภายในท่อ (kg/m^2s)

W_t = อัตราการไหลของของไหลในท่อ (kg/s)

A_t = พื้นที่ผิวการถ่ายโอนความร้อน (m^2)

(3) การคำนวณค่าเลขเรย์โนลดส์ในท่อ (Tube Side Reynolds number, Re_t)

$$Re_t = \frac{G_t D_i}{\mu_t} = \frac{V D_i \rho_t}{\mu_t} \qquad (2.28)$$

เมื่อ μ_t = ความหนืดของของไหลในท่อ (N/m^2s)

V = ความเร็วการไหล (m/s)

D_i = เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (m)

ρ_i = ความหนาแน่นของไหล (kg/m^3)

(4) การคำนวณหาค่าเลขแพรนด์ทัล (Prandtle Number, Pr_t)

$$Pr_t = \frac{Cp_t \ \mu_t}{k_t} \tag{2.29}$$

เมื่อ Cp_t = ค่าความจุความร้อนของของไหลในท่อ (J/kg°C)

k_t = ค่าการนำความร้อนของของไหลในท่อ (W/m°C)

(5) การคำนวณค่าเลขนัสเซลท์ (Nusselt Number, Nu_t)

สำหรับการไหลแบบลามินาร์ ค่า $(Re_tPr_tD_i/L) > 10$ หาได้จากสมการของ Sieder และ Tate ซึ่งเป็นการไหลภายในท่อ

$$Nu_t = 1.86\left(Re_t Pr_t\right)^{0.33}\left(\frac{D_i}{L}\right)^{0.33}\left(\frac{\mu_t}{\mu_w}\right)^{0.14} \tag{2.30}$$

$\left(\frac{\mu_t}{\mu_w}\right)^{0.14}$ = ตัวปรับแก้ที่เกิดจากผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อความหนืด

สมการที่ 2.30 เป็นการไหลแบบลามินาร์ และเป็นลักษณะ Combine Entry Length ($Pr_t = 0.7$)

เงื่อนไข T_s = คงที่

$0.48 < Pr_t < 16{,}700$

$$0.0044 < \left(\frac{\mu_t}{\mu_w}\right) < 9.75$$

$$\frac{L}{D_i} < \frac{Re_t \ Pr_t}{8}\left(\frac{\mu_t}{\mu_w}\right)^{0.42}$$

คุณสมบัติต่าง ๆ ของของไหลในสมการที่ 2.29 หาได้จากอุณหภูมิเฉลี่ย (T_{av}) ของก้อนของไหลสำหรับการไหลแบบเทอร์บิวเลนท์ค่า Pr_t อยู่ในช่วง 0.5 - 100 หาได้จากสมการ Sieder and Tate (Yumnus A. Cengel etal., 2008 : 791) ซึ่งจะเป็นการไหลภายในท่อ

$$Nu_t = 0.027Re_t^{0.8} Pr_t^{0.33}\left(\frac{\mu_t}{\mu_w}\right)^{0.14} \tag{2.31}$$

สมการที่ 2.31 จะใช้กับการไหลแบบเทอร์บิวเลนท์ที่มีความแตกต่างของคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของของไหลมาก

$$0.7 \leq Pr_t \leq 160$$

$$Re_t \geq 10{,}000$$

$$\frac{L}{D} \geq 10$$

โดย h_t = ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในท่อ ($W/m^2{}^\circ C$)

Nu_t = เลขนัสเซลท์ภายในท่อ

k_t = ค่าการนำความร้อนของของไหลภายในท่อ ($W/m^2{}^\circ C$)

D_i = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ (m)

Re_t = เลขเรย์โนลดส์ภายในท่อ

Pr_t = เลขแพรนด์ทัลภายในท่อ

μ_t = ความหนืดของของไหลภายในท่อ (Pas)

μ_w = ความหนืดของของไหลที่อุณหภูมิของผนังท่อ (Pas)

(6) สัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายนอกท่อขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกท่อ อัตราการไหลภายในเปลือก และสมบัติทางกายภาพของของไหล ดังความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.32

$$h_s = \frac{Nu_s k_s}{D_o} \tag{2.32}$$

เมื่อ $$Nu_s = 0.02 Re_s^{0.33} Pr^{0.33} \left(\frac{\mu_s}{\mu_w} \right)^{0.14} \tag{2.33}$$

โดย h_s = ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในเปลือก ($W/m^2{}^o C$)

Nu_s = เลขนัสเซลท์ด้านภายในท่อ

k_s = ค่าการนำความร้อนของของไหลภายในเปลือก ($W/m^2{}^o C$)

D_o = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกท่อ (m)

Re_s = เลขเรย์โนลดส์ภายในเปลือก

Pr_s = เลขแพรนด์ทัลภายในเปลือก

μ_s = ความหนืดของของไหลภายในเปลือก (Pas)

μ_w = ความหนืดของของไหลที่อุณหภูมิของผนังท่อ (Pas)

(7) การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนภายในท่อ (Tube Side Heat Transfer Coefficient, h_t) สำหรับการไหลแบบลามินาร์

$$h_t = \frac{k_t Nu_t}{D_i} = 1.86\left(\frac{k_t}{D_i}\right)\left(Re_t Pr_t\right)^{0.33}\left(\frac{D_i}{L}\right)^{0.33}\left(\frac{\mu_t}{\mu_w}\right)^{0.14} \quad (2.34)$$

สำหรับการไหลแบบเทอร์บิวเลนท์

$$h_t = \frac{k_t Nu_t}{D_i} = 0.027\left(\frac{k}{D_i}\right)Re_t^{0.8}\, Pr_t^{0.33}\left(\frac{\mu_t}{\mu_w}\right)^{0.14} \quad (2.35)$$

$$h_t = \frac{k_t Nu_t}{D_i} \quad (2.36)$$

เมื่อ $Nu_t = 0.02\ Re_t^{0.33}\, Pr_t^{0.33}\left(\frac{\mu_t}{\mu_w}\right)^{0.14}$ (2.37)

หรือ $h_t = 0.02\left(\frac{k_t}{D_i}\right)Re_t^{0.33}\, Pr_t^{0.33}\left(\frac{\mu_t}{\mu_w}\right)^{0.14}$

(8) ค่าความดันลดภายในท่อ (Tube Side Pressure Drop, ΔP_t) สำหรับการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ควรตรวจสอบค่าความดันลดของของไหลในท่อ และของไหลในเปลือก ซึ่งได้จากการคำนวณ และนำมาตรวจสอบว่าอยู่ในช่วงของค่าความดันลดที่กำหนดไว้ในสภาวะการออกแบบหรือไม่ กรณีค่าความดันลดที่คำนวณได้อยู่นอกช่วงค่าความดันลดที่กำหนด จะต้องทำการคำนวณ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนใหม่ นอกจากนั้นค่าความดันลดมีความสัมพันธ์กับความเร็ว หากความเร็วของของไหลในท่อ และในเปลือกยิ่งเพิ่มมากขึ้นเท่าไร ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนสูงตามขึ้นด้วย แต่ในขณะเดียวกันค่าความดันลดของของไหลในท่อ และในเปลือกก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน ผลก็คือเครื่องสูบ (Pump) หรือเครื่องอัด (Compressor) ที่ใช้กับของของไหลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนต้องใหญ่ขึ้นและความดันในระบบท่อก็สูงขึ้นด้วย ผลที่ได้นี้เป็นสิ่งที่ไม่ต้องการในด้านของการใช้จ่ายในการเดินเครื่องหรือความปลอดภัยของระบบ ดังนั้นจำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงสิ่งที่กล่าวมานี้ในการเลือกค่าความดันลดที่เหมาะสมโดยปกติ การออกแบบกระบวนการของอุตสาหกรรมเคมีนิยมทำโดยการเลือกประเภทใช้งาน เพื่อระบุค่าความดันลดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่จะออกแบบไว้ล่วงหน้า ดังนั้นในการออกแบบจึงมีความจำเป็นต้องคำนวณค่าความดันลดเพื่อนำไปตรวจสอบความเหมาะสมกับค่าความดันลดที่กำหนดไว้ ซึ่งค่าความดันลดของของไหลในท่อ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\Delta P_t = \frac{f N_L L G_t^2}{2000 D_i S_t \phi} \quad (2.38)$$

เมื่อ ΔP_t = ค่าความดันลดในท่อ (Pa)

f = แฟกเตอร์ความเสียดทานภายในท่อ

N_L = จำนวนกลับของท่อ

L = ความยาวท่อ (m)

G_t = ความเร็วเชิงมวลของของไหลในท่อ (kg/m^2s)

D_i = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ (m)

S_t = ความถ่วงจำเพาะของของไหลภายในท่อ

ϕ = แฟกเตอร์ปรับแก้ความหนืดของของไหลทั้งก้อน

$= \left(\frac{\mu_t}{\mu_w}\right)^{0.25}$ สำหรับการไหลแบบลามินาร์

$f = \frac{64}{Re_t}$ สำหรับการไหลแบบลามินาร์ $Re_t \leq 3000$

6.1.3 การหาค่าอัตราค่าความจุความร้อนภายในเปลือกและท่อ

ในการออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อ นอกเหนือจากการหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้ ยังมีค่าคงที่บางตัวที่จะต้องคำนวณหา เช่น ค่าความจุความร้อนของสารที่ใช้ทำงาน ทั้งในส่วนเปลือกและส่วนท่อ ตลอดจนอัตราการถ่ายโอนความร้อนทางทฤษฎีและปฏิบัติ เพื่อที่จะนำมาสู่การคำนวณหาประสิทธิผลของอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อ และการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวม ดังมีรายละเอียดดังนี้

(1) การคำนวณอัตราการถ่ายโอนความร้อน

การคำนวณอัตราความจุความร้อนสำหรับของไหลในเปลือก หาได้จากสมการ

$$C_s = \dot{W}_s Cp_s \quad (2.39)$$

เมื่อ C_s = อัตราความจุความร้อนสำหรับของไหลในเปลือก (W/°C)

$\dot{W}_s$ = อัตราการไหลภายในเปลือก (kg/s)

Cp_s = ค่าความจุความร้อนสำหรับของไหลในเปลือก (J/kg°C)

(2) การคำนวณอัตราความจุความร้อนสำหรับของไหลในท่อ หาได้จากสมการ

$$C_t = \dot{W}_t Cp_t \quad (2.40)$$

เมื่อ C_t = อัตราความจุความร้อนสำหรับของไหลในท่อ (W/ °C)

$\dot{W}_t$ = อัตราการไหลภายในท่อ (kg/s)

Cp_t = ค่าความจุความร้อนสำหรับของไหลในท่อ (J/kg°C)

(3) การคำนวณอัตราการถ่ายโอนความร้อนสูงสุดหาได้จากสมการ

$$\dot{Q}_{max} = C_{min}(T_{s,i} - T_{t,i}) \quad (2.41)$$

เมื่อ $\dot{Q}_{max}$ = อัตราการถ่ายโอนความร้อนสูงสุด (W)

C_{min} = อัตราความจุความร้อนสูงสุด (W/°C)

$T_{s,i}$ = อุณหภูมิของไหลทางเข้าเปลือก (°C)

$T_{t,i}$ = อุณหภูมิของของไหลทางเข้าท่อ (°C)

(4) การคำนวณอัตราการถ่ายโอนความร้อนจริงของของไหลในเปลือก หาได้จากสมการ

$$\dot{Q}_{s,act} = C_s(T_{s,i} - T_{s,o}) \quad (2.42)$$

เมื่อ $\dot{Q}_{s,act}$ = อัตราการถ่ายโอนความร้อนของของไหลในเปลือก (W)

C_s = อัตราความจุความร้อนของของไหลในเปลือก (W/ °C)

$T_{s,i}$ = อุณหภูมิของของไหลทางเข้าเปลือก (°C)

$T_{s,o}$ = อุณหภูมิของของไหลทางออกจากท่อ (°C)

(5) การคำนวณอัตราการถ่ายโอนความร้อนจริงในท่อเฉลี่ย หาได้จากสมการ

$$\dot{Q}_{t,act} = C_t(T_{t,i} - T_{t,o}) \quad (2.43)$$

เมื่อ $\dot{Q}_{t,act}$ = อัตราการถ่ายโอนความร้อนจริงของของไหลในท่อ (W)

C_t = อัตราความจุความร้อนสำหรับของไหลในท่อ (W/ °C)

$T_{t,i}$ = อุณหภูมิของของไหลทางเข้าท่อ (°C)

$T_{t,o}$ = อุณหภูมิของของไหลทางออกท่อ (°C)

(6) การคำนวณอัตราการถ่ายโอนความร้อนจริงเฉลี่ย หาได้จากสมการ

$$\dot{Q}_T = (\dot{Q}_{s.act} + \dot{Q}_{t,act}) \quad (2.44)$$

เมื่อ $\dot{Q}_T$ = อัตราการถ่ายโอนความร้อนจริงเฉลี่ย (W)

$\dot{Q}_{s,act}$ = อัตราการถ่ายโอนความร้อนจริงของของไหลในเปลือก (W)

$\dot{Q}_{t,act}$ = อัตราการถ่ายโอนความร้อนจริงของของไหลในท่อ (W)

(7) การหาค่าประสิทธิผลของการถ่ายโอนความร้อน หาได้จากสมการ

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_T}{\dot{Q}_{max}} \quad (2.45)$$

เมื่อ ε = ค่าประสิทธิผลของการถ่ายโอนความร้อน

$\dot{Q}_{act}$ = อัตราการถ่ายโอนความร้อนจริงเฉลี่ย (W)

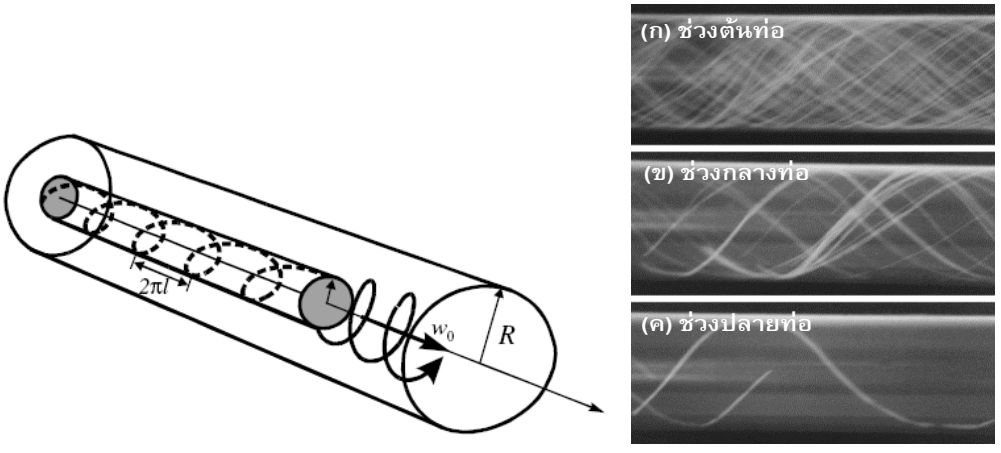
$\dot{Q}_{max}$ = อัตราการถ่ายโอนความร้อนสูงสุด (W)

3. เทคนิคการไหลหมุนควง

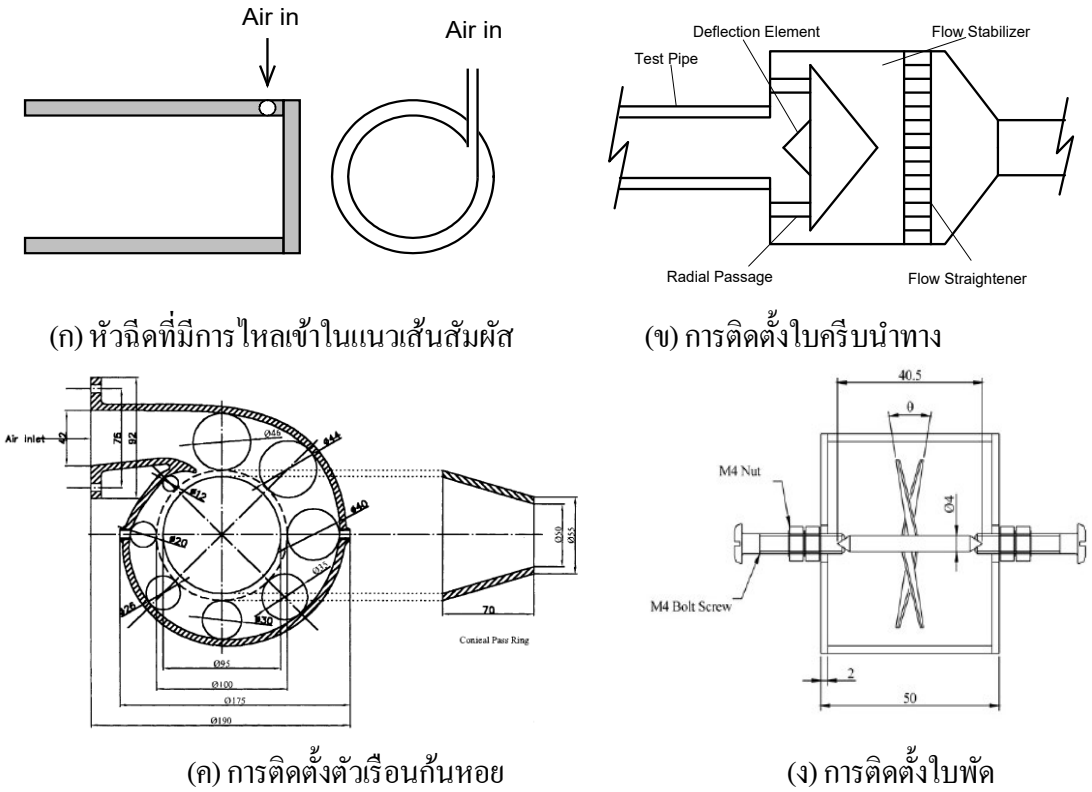
การสร้างการไหลแบบหมุนควงเป็นหนึ่งในวิธี Passive ที่มีการศึกษาเพื่อนำมาพัฒนาการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนสามารถแบ่งออกได้เป็นสองกลุ่มคือ

3.1 การสร้างการไหลหมุนควงในช่วงต้นท่อ

การไหลหมุนควงจะเกิดขึ้นที่ปากทางเข้าและจะค่อย ๆ เสื่อมสลายลงตามแนวแกนการไหลตามภาพที่ 2.19โดยจะเห็นว่าที่ช่วงต้นท่อจะมีการไหลหมุนควงที่สูงมากอย่างต่อเนื่อง ขณะที่ช่วงกลางท่อจะมีความเข้มของการไหลหมุนควงที่น้อยลง และเบาบางลงมากหรือแทบจะเสื่อมสลายลงที่ปลายท่อ วิธีนี้การจะมีผลทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานจะค่อย ๆ ลดลงตามระยะทางการไหลผ่านหรือการเสื่อมสลายของการไหลหมุนควง วิธีการนี้สามารถทำได้โดยการติดตั้งอุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงที่ต้นท่อ อันได้แก่ การติดตั้งใบพัด การติดตั้งตัวเรือนก้นหอย หัวฉีดที่มีการไหลเข้าในแนวเส้นสัมผัส และการติดตั้งใบครีบนำทางทั้งในแนวแกนและแนวรัศมี ตามภาพที่ 2.20 (ก-ง) เป็นต้น



ภาพที่ 2.19 การเสื่อมสลายของการไหลหมุนควงในท่อกลม



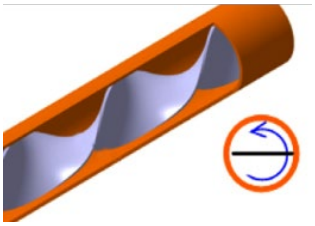
(ก) หัวฉีดที่มีการไหลเข้าในแนวเส้นสัมผัส (ข) การติดตั้งใบครีบนำทาง

(ค) การติดตั้งตัวเรือนก้นหอย (ง) การติดตั้งใบพัด

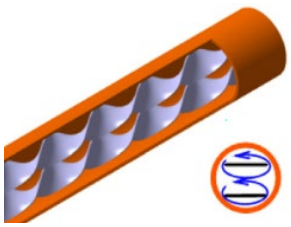
ภาพที่ 2.20 อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงที่ช่วงต้นท่อ

3.2 การสร้างการไหลแบบหมุนควงต่อเนื่อง

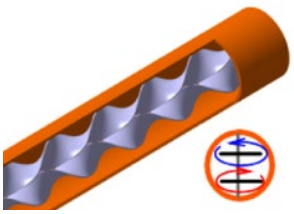
การสร้างการไหลแบบหมุนควงช่วยให้เกิดการแลกเปลี่ยนที่บริเวณผนังท่อมีมากขึ้น รูปแบบการหมุนควงจะเกิดขึ้นตลอดแนวแกนของการไหล ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและค่าความความเสียดทานจะมีค่าคงที่ตลอดการไหลผ่านท่อ โดยการจะเกิดการปั่นป่วนที่บริเวณดังกล่าว รวมทั้งจะนำของไหลบริเวณตรงกลางท่อขึ้นมาสัมผัสกับผิวท่อได้มากขึ้น อุปกรณ์ที่ทำให้เกิดการหมุนควงแบบต่อเนื่อง สามารถทำได้โดยการสอดใส่อุปกรณ์แบบต่างๆภายในท่อหรือการปรับปรุงผิวท่อเพื่อช่วยสร้างการหมุนควง ได้แก่ การสอดใส่แผ่นใบบิด การสอดใส่ขดลวด การปรับปรุงผิวให้มีร่องแบบเกลียว หรือท่อที่มีผิวเกลียว และท่อบิดเกลียว หรืออาจเป็นการปรับปรุงผิวท่อเป็นผิวครีบ ทั้งนี้วิธีการดังกล่าวยังผลให้พื้นที่การถ่ายเทความร้อนมีมากขึ้นไปด้วย ตามภาพที่ 2.21 (ก-ค) เป็นต้น



การไหลหมุนควงเดี่ยว

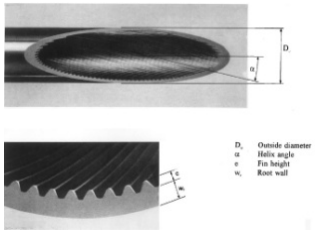


การไหลหมุนควงแบบขนาน

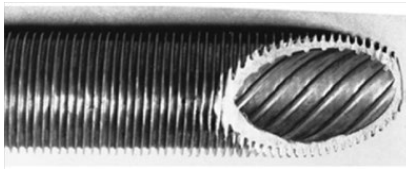


การไหลหมุนควงแบบทวน

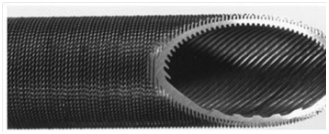
(ก) การสอดใส่แผ่นใบบิดแบบต่าง



ท่อผิวครีบภายใน

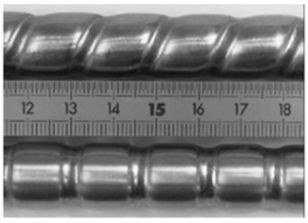


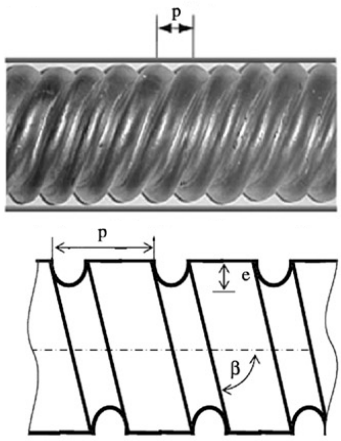
ท่อผิวร่องเกลียว

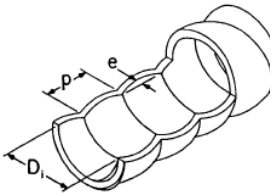


ท่อผิวร่องเกลียว

(ข) ท่อผิวเกลียวแบบต่างๆ







(ค) ท่อลูกฟูกแบบต่างๆ

ภาพที่ 2.21 อุปกรณ์สร้างการไหลหมุนควงและปั่นป่วนตลอดแนวการไหลผ่านท่อ

4. ฟาล์วลิ่งแฟกเตอร์

สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนภายใต้สภาพการใช้งานในภาคอุตสาหกรรมการผลิตจะไม่สามารถหาได้จากการวิเคราะห์ทางด้านความร้อน ทั้งนี้เพราะว่าในระหว่างการใช้งานของไหลส่วนมากจะเป็นของเหลว และบางส่วนเป็นก๊าซนั้นจะมีชั้นบาง ๆ จากสิ่งสกปรกค่อย ๆ เกิดขึ้นที่พื้นที่ผิวที่ใช้ถ่ายโอนความร้อน ซึ่งสิ่งที่ตกค้างเหล่านี้อาจจะเป็นสนิมหรือ

ตะกรัน ตะกอน หรือสิ่งอื่น ๆ ผลกระทบดังกล่าวจะทำให้ความสามารถการถ่ายโอนความร้อนลดน้อยลง ทั้งนี้เพราะความต้านทานความร้อนมีค่าสูงขึ้น ซึ่งเรียกว่า ฟาล์วลิ่งแฟคเตอร์ (Fouling Factors) ปกติผู้ผลิตจะไม่สามารถทราบอัตราการตกตะกอนหรืออัตราของการเกิดฟาล์วลิ่ง นี้เลย ดังนั้นเพื่อการรับรองสำหรับการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจึงทำได้เฉพาะในกรณีที่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนยังใหม่ หรือ ยังไม่มีชั้นของสิ่งสกปรกเกิดขึ้นเท่านั้น ความต้านทานความร้อนของสิ่งสกปรกที่ตกค้างนี้ปกติแล้วจะหาได้จากการทดสอบในกรณีที่มีการใช้งานอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมาแล้วระยะเวลาหนึ่ง ก็สามารถหาความต้านทานความร้อนของสิ่งที่ตกค้างหรือฟาล์วลิ่งแฟกเตอร์ ได้จากความสัมพันธ์ ดังนี้

$$R_d = \frac{1}{U_d} - \frac{1}{u} \qquad (2.46)$$

เมื่อ u = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวมหรือค่าหนึ่งหน่วยการนำความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ยังสะอาดอยู่ ($W/m^2°C$)

U_d = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวมหรือค่าหนึ่งหน่วยการนำความร้อนที่เกิดฟาล์วลิ่งแฟกเตอร์ขึ้น ($W/m^2°C$)

R_d = ค่าหนึ่งหน่วยความต้านทานความร้อนของสิ่งตกค้างบนพื้นที่สำหรับการถ่ายโอนความร้อน ($m^2°C/W$)

สมการที่สะดวกต่อการใช้งานคือ

$$U_d = \frac{1}{R_d + (\frac{1}{U})} \qquad (2.47)$$

ค่าฟาล์วลิ่งแฟกตอร์สำหรับน้ำที่ใช้กับหม้อน้ำบางชนิดตามสมาคมผู้ผลิตกำหนด สำหรับงานวิจัยนี้ หม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว จะใช้น้ำประปาเป็นน้ำป้อนให้แก่อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อซึ่งอุณหภูมิน้ำป้อนจะอยู่ระหว่าง 303 - 305 K เมื่อตรวจสอบค่าฟาล์วลิ่งแฟกเตอร์จะมีค่าประมาณ 3.5×10^{-4} m^2K/W แต่ในการออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อในครั้งนี้จะใช้ค่าฟาล์วลิ่งแฟกเตอร์เท่ากับ 1 เพราะว่าระบบน้ำป้อนใช้น้ำประปามีระบบการกรองมาก่อน นอกจากนี้ระบบของหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว ได้ติดตั้งระบบการกรองน้ำอ่อนอีกครั้งก่อนที่น้ำป้อนจะเข้าสู่อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม ดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ค่าฟาล์วลิ่งแฟกเตอร์สำหรับการใช้งานบางค่าของสมาคมผู้ผลิต

ของเหลวชนิดต่าง ๆ	ค่าฟาล์วลิ่งแฟกเตอร์ (m^2K/W)	
	อุณหภูมิของไหลร้อน 390 - 400 K	อุณหภูมิของไหลเย็น สูงกว่า 300 K
1. น้ำทะเล	1.8×10^{-4}	1.8×10^{-4}
2. น้ำที่ระบายความร้อน และบอระบายความร้อนที่ไหลหมุนเวียนหลังจากปรับปรุงคุณภาพแสง	5.3×10^{-4}	3.5×10^{-4}
3. น้ำประปา และน้ำบ่อ	3.5×10^{-4}	3.5×10^{-4}
4. น้ำแม่น้ำ	5.3×10^{-4}	3.5×10^{-4}
5. น้ำโคลน	7.0×10^{-4}	5.3×10^{-4}
6. น้ำกระด้าง (มากกว่า 312 mg/L)	8.8×10^{-4}	1.8×10^{-4}
7. น้ำกลั่น	8.8×10^{-5}	8.8×10^{-5}
8. น้ำเติมหม้อไอน้ำ (Boilers) ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพแล้ว	1.8×10^{-4}	1.8×10^{-4}

หม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียวใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง ดังนั้นค่าฟาล์วลิ่งแฟกเตอร์ที่เกิดจากการสันดาปของเชื้อเพลิงมีค่าน้อยมาก ประมาณ 1.8×10^{-3} m^2K/W ซึ่งในงานวิจัยนี้ไม่ได้นำมาคิด เนื่องจากหม้อน้ำใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงมีปริมาณซัลเฟอร์คงที่ ดังตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.9 ค่าฟาล์วลิ่งแฟกเตอร์ของก๊าซ และไอชนิดต่าง ๆ

ชนิดของก๊าซร้อนและไอ	ค่าฟาล์วลิ่งแฟกเตอร์ (m^2K/W)
1. ก๊าซเตาโค๊ก	1.8×10^{-3}
2. ก๊าซไอเสียที่เกิดจากสันดาป (น้ำมันดีเซล)	1.8×10^{-3}
3. ไอของสารอินทรีย์	8.8×10^{-3}
4. ไอน้ำ	8.8×10^{-3}
5. ไอของอัลกอฮอร์	8.8×10^{-5}
6. ไอเสียของรถยนต์	1.8×10^{-5}
7. อากาศ	1.8×10^{-4}

ในกรณีการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนไม่มีครีบที่พื้นผิวท่อ สมาคมผู้ผลิตอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อได้ให้ค่าฟาล์วลิ่งแฟกเตอร์ที่ให้ไว้ในสมการ (2.48) แทนสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ฟาล์วลิ่งแฟกเตอร์ดังกล่าวจะมีค่าเป็นดังนี้

$$U_d = \frac{1}{\frac{1}{\overline{h}_{c,o}} + R_{d,o} + \frac{R_{d,i}A_o}{A_i} + \frac{A_o}{h_{c,i}A_i}} \qquad (2.48)$$

เมื่อ U_d = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวมที่ใช้ในการออกแบบที่คิดจากพื้นที่ผิวด้านนอก ($W/m^2°C$)

$\overline{h}_{c,o}$ = สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยที่ผิวนอกของท่อหรือหนึ่งหน่วยการนำความร้อนที่ผิวเฉลี่ยของของไหลนอกท่อ ($W/m^2°C$)

$R_{d,o}$ = หนึ่งหน่วยความต้านทานฟาล์วลิ่ง บนผิวด้านนอกของท่อ ($m^2°C/W$)

A_o = พื้นที่ผิวด้านนอกของท่อ (m^2)

A_i = พื้นที่ผิวด้านในของท่อ (m^2)

สำหรับงานวิจัยการออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมสำหรับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียวเป็นหม้อน้ำขนาดเล็กมีวัตถุประสงค์ คือ การออกแบบสร้างการทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือก และท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม ลักษณะของท่อที่ใช้ในการออกแบบจะเป็นแบบไม่มีครีบในการเพิ่มพื้นที่ในการถ่ายโอนความร้อน และสารที่ใช้ทำงานเป็นของเหลว (น้ำ) ซึ่งจะไหลอยู่ภายในท่อจำนวน 50 กลับ ส่วนภายในเปลือกจะใช้ความร้อนทิ้งจากปล่องไอเสีย ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 200-300°C ถ่ายโอนความร้อนให้แก่พื้นที่ผิวภายนอกท่อ และความร้อนทิ้งจะมีการไหลแบบทางเดียว ดังนั้นในการพิจารณาหาค่าฟาล์วลิ่งแฟกเตอร์สามารถพิจารณาค่าได้จากตารางที่ 2.10 - 2.11

5. การวิเคราะห์ความคุ้มค่าและการประหยัดพลังงาน

5.1 การวิเคราะห์การประหยัดพลังงาน

การประเมินความเป็นไปได้ของการพัฒนาอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือก และท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมสำหรับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว ทางเศรษฐศาสตร์จะวิเคราะห์จากกระแสเงินสุทธิ ซึ่งเปรียบเทียบระหว่างมูลค่าของพลังงานที่สามารถประหยัดได้กับค่าใช้จ่ายทั้งหมด ซึ่งประกอบด้วยค่าใช้จ่ายค่าใช้จ่ายในการสร้าง และติดตั้งระบบการพัฒนาเปลือกและท่อ ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน รวมถึงค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุง เพื่อให้เป็นข้อมูลประกอบการพิจารณาความเป็นไปได้ในการดำเนินการผลิตส่วนเปลือก และท่อ ซึ่งสามารถ

หาได้จากวิธีดำเนินงานปัจจุบันสุทธิ และอัตราผลตอบแทนซื้อลดโดยจะคำนึงถึงต้นทุนของเงินทุนและมูลค่าตามเวลาของกระแสเงินสดที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาที่พัฒนาอุปกรณ์แบบเปลือก และท่อ นอกจากนี้ยังสามารถใช้วิธีระยะเวลาคืนทุนซึ่งเป็นการประเมินโครงการแบบง่ายได้อีกด้วย ในกรณีไม่คำนึงถึงปัจจัยดังกล่าว

จากผลต่างของอุณหภูมิ และอัตราการไหลของน้ำป้อน (Water Supply) สามารถคำนวณหาปริมาณความร้อนสูญเสียได้จากสมการ (2.49) และข้อมูลเบื้องต้นของค่าความร้อนสูง (Higher Heating Value) ราคาต่อหน่วยเชื้อเพลิง (Energy Cost) และค่าประสิทธิภาพของหม้อน้ำ (เกษม เสรีภาพสากล, 2547 : 39) จากหม้อน้ำแบบหลอดน้ำที่มีอัตราการผลิตไอน้ำ 500 kg/h แล้วนำมาแทนค่าหามูลค่าของเชื้อเพลิงที่สูญเสียดังสมการ (2.50)

$$\dot{Q} = \dot{m}(h_2 - h_1) \qquad (2.49)$$

เมื่อ $\dot{Q}$ = ปริมาณความร้อนที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ (W)

h_2 = ค่าเอนทัลปีของน้ำด้านทางออกของอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อน (J/kg)

h_1 = ค่าเอนทัลปีของน้ำด้านทางเข้าของอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อน (J/kg)

$\dot{m}$ = ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อน (kg/s)

$$\text{ปริมาณการประหยัดพลังงาน} = \left(\frac{\dot{Q}}{HHV(\eta)}\right) Energy\ Cost \qquad (2.50)$$

เมื่อ HHV = ค่าความร้อนสูงสุดของพลังงานเชื้อเพลิงที่ใช้ (W/Unit)

η_b = ประสิทธิภาพหม้อน้ำ (%)

Energy Cost = ราคาเชื้อเพลิง (Baht/litters)

5.2 การวิเคราะห์ผลตอบแทนการลงทุน

ในการวิเคราะห์งบประมาณที่เป็นรายจ่ายสำหรับการลงทุนการพัฒนาอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมสำหรับหม้อน้ำแบบให้ความร้อนทางเดียว จะต้องพิจารณางบประมาณสำหรับการสร้างงบประมาณสำหรับการบำรุงรักษาและค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิง

นอกจากนี้ยังต้องวิเคราะห์ถึงงบประมาณที่เป็นรายรับที่ได้จากการพัฒนาอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือก และท่อสำหรับหม้อน้ำแบบหลอดน้ำซึ่งประกอบไปด้วยค่าพลังงานที่ประหยัดได้และค่ารายรับรายจ่ายผลผลิตที่เพิ่มขึ้น เป็นต้น

ในการวิเคราะห์ผลตอบแทนการลงทุนมีอยู่หลายวิธีซึ่งในแต่ละวิธีสามารถนำไปใช้ประโยชน์แตกต่างกัน การเลือกใช้วิธีใดนั้นขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของงาน และวิธีการวิเคราะห์ที่นิยมใช้กันทั่วไป ได้แก่

5.2.1 การวิเคราะห์มูลค่าอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมในอนาคต สามารถหาได้จากสมการ

มูลค่าอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม $= P(1+i)^n$ (2.51)

เมื่อ P = มูลค่าปัจจุบันที่มีการจ่ายครั้งเดียว (Baht)

i = อัตราดอกเบี้ยทบต้น

n = จำนวนปี

เมื่อเปรียบเทียบเป็นค่าน้ำมันดีเซลที่ใช้กับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว เป็นผลให้อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม ซึ่งมูลค่าในอนาคตคิดได้จากสมการ

$$\text{มูลค่าในอนาคต} = \frac{A}{t}\left[(1+i)^n - 1\right] \quad (2.52)$$

เมื่อ A = มูลค่าในปัจจุบันของเงินรายปี

5.2.2 อัตราผลตอบแทนภายใน

ในที่นี้จะหมายถึงอัตราผลตอบแทนคิดเป็นดอกเบี้ยที่ทำให้มูลค่าในอนาคตของอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมเท่ากับมูลค่าอนาคตของน้ำมันดีเซลที่สามารถประหยัดได้ ถ้ามีค่าผลตอบแทนภายในสูงก็แสดงว่าสมการแก่การลงทุนซึ่งสามารถหาได้จากสมการ

$$P(1+i)^n = \frac{A}{i}\left[(1+i)^n - 1\right] \quad (2.53)$$

6. สรุปงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

การพัฒนาอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือก และท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม สำหรับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียวขนาดอัตราการผลิตไอน้ำ 500 kg/h จะต้องศึกษาด้านความรู้และประสบการณ์การเดินเครื่องหม้อน้ำ และศึกษาอุปกรณ์ควบคุมอุปกรณ์ความปลอดภัยตลอดจนการใช้เครื่องมือตรวจสอบสมรรถนะหม้อน้ำ โดยเฉพาะความร้อนทิ้งที่ออกจากปล่องไอเสีย ซึ่งเป็นพลังงานที่จะนำมาใช้ในการพัฒนาอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือก และท่อ (Shell and Tube) ชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม ซึ่งในการออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือก และท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมต้องอาศัยทฤษฎีการคำนวณหาตัวแปรในส่วนของเปลือก เช่น

หาความเร็วในการไหลสูงสุดภายในเปลือก, $V_{s,max}$ หาค่าเลขนัสเซลท์ในเปลือก, Nu_s หาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน, h_o หาค่าความดันลดภายในเปลือก, ΔP_s และหาค่าแฟกเตอร์ความเสียดทานในเปลือก, f

ในส่วนของท่อ (Tube) ต้องอาศัยทฤษฎีการคำนวณหาตัวแปรต่าง ๆ ของท่อ เช่น หาพื้นที่ผิวการถ่ายโอนความร้อน, A_t หา ความเร็วเชิงมวล, G_t หาค่าลักษณะการไหลภายในท่อ, Re_t หาค่าเลขแพรนด์ทัล, Pr_t หาค่าเลขนัสเซลท์, Nu_t หาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน, h_i นอกจากนี้ต้องใช้ทฤษฎีการถ่ายโอนความร้อน เพื่อหาค่าอัตราค่าความจุความร้อนทั้งภายในเปลือกและท่อ, C_s, C_i หาค่าการถ่ายโอนความร้อนสูงสุด, $\dot{Q}_{max}$ ทั้งทางทฤษฎี และทางปฏิบัติ, $\dot{Q}_{act}$ เพื่อที่จะนำมาสู่การหาสมรรถนะอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม, ε ซึ่งในการออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือก และท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมนี้ได้กำหนดเงื่อนไขการออกแบบจากข้อมูลในการปฏิบัติการจริงของหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียวขนาดอัตราการผลิตไอน้ำ 500 kg/h เช่น อุ่นน้ำป้อน อุณหภูมิความร้อนทิ้ง ฯลฯ ในการออกแบบหาค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนจะใช้วิธีหาอุณหภูมิเฉลี่ยลอกาลิทึม (ΔT_{lm}) ซึ่งเป็นวิธีที่ไม่ซับซ้อน ซึ่งในทางปฏิบัตินิยมใช้กัน และสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน, U ทั้งนี้จะต้องพิจารณาความหนาของท่อในส่วนของ Fouling Factor จะไม่นำมาพิจารณา เพราะอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือก และท่อยังมิได้ใช้งานมาก่อน

นอกจากนี้ยังใช้ข้อมูลอ้างอิงจากงานวิจัยหลายเรื่องที่ได้ศึกษาการนำความร้อนทิ้งจากหม้อน้ำ (Boilers) กลับมาใช้ใหม่ของ (สมเกียรติ บุญณสะ, 2548 : A-1) ได้ทำการประเมินพลังงานที่ประหยัดของการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่จากเครื่องอัดอากาศ จากการศึกษาพบว่า เครื่องอัดอากาศขณะเดินเครื่องไฟฟ้าเฉลี่ยรวม 180 kW จะสามารถนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ในการอบโฟม 345.6 MJ/h เมื่อวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์สามารถประหยัดพลังงานได้ เมื่อคิดเป็นต้นทุนลดค่าใช้จ่ายได้ 154,200 Baht/y หรือจากงานวิจัยของ (สุรพล รูปงาน และคณะ, 2551 : 410) ได้วิจัย การวิเคราะห์สมรรถนะอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบกลุ่มท่อติดครีบควบ ผลจากการศึกษาพบว่าสมรรถนะที่ดีที่สุดอัตราการถ่ายโอนของน้ำป้อน และอุณหภูมิทางเข้าของความร้อนทิ้งกับน้ำป้อนเท่ากับ 150 l/h ที่อุณหภูมิ 180°C หรือจากงานวิจัยของ (ธนณัฐฐ์ เอื้อภราดร, 2547 : 2) ได้ศึกษาการนำความร้อนจากไอเสียกลับมาใช้ประโยชน์ (กรณีศึกษา บริษัทน้ำตาลราชบุรี จำกัด) ผลจากการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพของหม้อน้ำหลังการติดตั้งอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนสูงกว่าก่อนการติดตั้ง โดยมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 79.83 และ 75.87 ตามลำดับ ด้านการใช้ปริมาณเชื้อเพลิงมีค่าเฉลี่ยลดลง 25.97 และ 28.71 t/h ทางด้านเศรษฐศาสตร์ พบว่า มูลค่าปัจจุบันสุทธิโดยใช้อัตราลดคิดที่ร้อยละ 12 มีค่าเท่ากับ 2,725,969.72 Baht อัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุนมีค่าเท่ากับ 3.44 อัตราผลตอบแทนสุทธิร้อยละ 97 ระยะเวลาคืนทุน 1 ปี 2 เดือน จากการศึกษาข้อมูล

การขอขึ้นทะเบียนจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม ที่ขอขึ้นทะเบียนการใช้หม้อน้ำ มีหม้อน้ำขนาดเล็ก ขนาดกำลังการผลิตไอน้ำ 10-2,600 kg/h ไม่น้อยกว่า 350 ลูก ซึ่งส่วนมากเป็นหม้อน้ำแบบไหลผ่านทางเดียว (Once-Though Boilers) จากการศึกษาพบว่า มีปริมาณความร้อนทิ้งจากไอเสียร้อนประมาณ 15-20% โดยมีอุณหภูมิที่ปล่องไอเสียประมาณ 250-300°C จากเงื่อนไขดังกล่าวที่ได้ศึกษาและประสบการณ์ที่ผ่านมา จึงนำมาสู่การพัฒนาอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม เพื่อหาสมรรถนะที่ดีที่สุดในการออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมในครั้งนี้

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

บทนำ

จากจุดมุ่งหมายของงานวิจัยเพื่อออกแบบ และสร้างอุปกรณ์ต้นแบบ อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม โดยนำพลังงานความร้อนทิ้งจากปล่องไอเสียหม้อน้ำแบบหลอดน้ำที่มีอัตราการผลิตไอน้ำขนาด 500 kg/h มาเพิ่มอุณหภูมิให้แก่น้ำป้อนก่อนเข้าสู่หม้อน้ำ ซึ่งมีวัตถุประสงค์การวิจัยดังนี้

เพื่อทดสอบคุณลักษณะความร้อนทางด้านการหาค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อน (Heat Transfer Rate) ค่าประสิทธิผล (Effectiveness) และจำนวนหน่วยของอัตราการถ่ายโอนความร้อน (Number of Heat Transfer Unit) ที่อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือก และท่อที่ออกแบบ และสร้างขึ้นติดตั้งกับระบบหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียวในศูนย์วิจัยพลังงาน สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี

เพื่อทดสอบการทำงานอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมที่ออกแบบ และสร้างขึ้นว่ามีสมรรถนะมากเพียงใด โดยการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลร้อนกับของไหลเย็น (ก๊าซร้อนกับน้ำ) ซึ่งในการทดสอบได้กำหนดให้ของไหลร้อน (ก๊าซร้อน) มีอุณหภูมิ 250-300°C ส่วนที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้ง แบ่งเป็น 5 ระดับคือ 5.0-6.5 m/s สำหรับของไหลเย็น (น้ำ)ได้ กำหนดอุณหภูมิที่ 30 - 40°C โดยมีอัตราการไหลของของไหลเย็น (น้ำ) เข้าอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือก และท่อคงที่ 0.05 kg/s ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยเชิงประยุกต์ (อุทัย ผ่องรัศมี, 2554 : 1-2) ที่ออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อขดที่ได้กำหนดขอบเขตการทดสอบที่อัตราการไหลมวลของน้ำ 0.05 kg/s น้ำป้อนมีอุณหภูมิ 30-40 °C อุณหภูมิความร้อนทิ้งสำหรับการทดสอบที่ 250-300°C ที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้งที่ออกจากอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อน 5.35 m/s ความร้อนทิ้งถ่ายโอนความร้อนให้แก่น้ำภายในท่อขดให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น (เดิม 30°C) เป็น 75°C ผลการวิจัยพบว่า อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อขดมีสมรรถนะ 0.36

จากรายละเอียดวัตถุประสงค์งานวิจัยเพื่อทดสอบคุณสมบัติทางความร้อน และการทำงานของอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม สำหรับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว ดังกล่าวข้างต้น สามารถกำหนดอุปกรณ์ และวิธีดำเนินการวิจัยได้ดังนี้

1. การออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม

2. การติดตั้งอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมร่วมกับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว

3. อุปกรณ์ประกอบการทดสอบ

4. วิธีการทดสอบ

5. การเก็บผลการทดสอบ

6. การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

7. การแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลที่ได้จากผลการวิเคราะห์

8. การวิเคราะห์ความคุ้มค่าและการประหยัดพลังงาน

9. แนวทางการนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์เพื่อการประเมินสมรรถนะอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม

10. การเผยแพร่อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมให้ภาคอุตสาหกรรม

1. การออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม

1.1 การออกแบบส่วนท่อ

ในการออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม มีตัวแปรที่สำคัญสำหรับการออกแบบได้แก่ พื้นที่ผิวการถ่ายโอนความร้อนและเลือกใช้วัสดุให้เหมาะสมกับอุณหภูมิความร้อนทิ้งอยู่ระหว่าง 180 - 300°C และอุณหภูมิน้ำป้อน 30°C จากการศึกษาทางทฤษฎีของการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล, 2536) ได้กล่าวว่า อุณหภูมิความร้อนทิ้งที่ใช้ในการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนต้องมีอุณหภูมิสูงกว่า 180°C ขึ้นไป ซึ่งถ้าเลือกใช้อุณหภูมิความร้อนทิ้งต่ำกว่า 180°C จะเป็นผลทำให้อุณหภูมิความร้อนทิ้งจับตัวเป็นจุดน้ำค้าง (Dew Point) ภายในส่วนเปลือกและจะเป็นผลทำให้เกิดการผุกร่อนและสอดคล้องกับงานวิจัยการออกแบบอุปกรณ์แบบท่อขด (อุทัย ผ่องรัศมี, 2554) ที่ออกแบบพื้นที่ผิวท่อโดยใช้อุณหภูมิความร้อนทิ้งจากปล่องไอเสียหม้อน้ำที่มีอุณหภูมิ 180°C อุณหภูมิน้ำป้อน 30°C ส่วนอุณหภูมิของน้ำที่ได้รับความร้อนจากการถ่ายโอนความร้อนจากก๊าซร้อนทิ้งที่ 60°C และอุณหภูมิความร้อนทิ้งที่ปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม 120°C โดยมีอัตราการผลิตไอน้ำของหม้อน้ำ 0.138 kg/s เป็นอัตราการผลิตไอน้ำสูงสุดของหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว ซึ่งจะได้อัตราการถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ย

ภายในส่วนเปลือก 30.48 kW ถ่ายโอนความร้อนพื้นที่ผิวท่อวัสดุ *STB* 35.8 ซึ่งเป็นวัสดุท่อเหล็กที่ใช้กับอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนในกรณีอุณหภูมิอุ่นน้ำป้อนได้รับความร้อนอยู่ระหว่าง 50 - 150 °C จากเงื่อนไขดังกล่าวเมื่อนำมาพิจารณาอุณหภูมิความร้อนที่ต้องการจะได้ค่า 60°C ส่วนอุณหภูมิความร้อนที่เหลือจากการถ่ายโอนความร้อนจะแปรผันตามอุณหภูมิน้ำป้อนที่ได้รับความร้อนมีอุณหภูมิ 120°C และสอดคล้องกับผลการวัดสมรรถนะหม้อน้ำโดยใช้เครื่องมือ Ehiam (Visitor - 01 ℓ) วัดค่า CO_2 ได้ 7.5%, O_2 ได้ 4% มีเปอร์เซ็นต์การสูญเสียของความร้อนทิ้งประมาณ 20% ซึ่งในการออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนมีสมการที่เกี่ยวข้องดังนี้

1.1.1 การหาพื้นที่ผิวสำหรับการถ่ายโอนความร้อนส่วนท่อหาได้จากสมการ

$$A_t = \frac{Qc}{U\Delta T_{lm}} \tag{3.1}$$

1.1.2 การหาขนาดความยาวท่อถ่ายโอนความร้อน หาได้จากสมการ

$$L = \frac{A_t}{\pi D} \tag{3.2}$$

1.1.3 การหาอัตราการถ่ายโอนความร้อนหาได้จากสมการ

$$Q_c = \dot{m}c_p(T_{t,o} - T_{t,i}) \tag{3.3}$$

1.1.4 การหาความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยลอกาลิทึมของน้ำป้อน หาได้จากสมการ

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{s,i} - T_{t,o}) - (T_{s,o} - T_{t,i})}{\ln[(T_{s,i} - T_{t,o}) / (T_{s,o} - T_{t,i})]} \tag{3.4}$$

จากเงื่อนไขที่กำหนดไว้ในขอบเขตของน้ำป้อน, $\dot{m}$ = 0.138 kg/s ,ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ C_p = 4.186 kJ/kg°C, อุณหภูมิความร้อนทิ้ง, $T_{s,I}$ = 180 °C, อุณหภูมิความร้อนทิ้ง หลังออกจากอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม, $T_{s,o}$ = 120°C , อุณหภูมิน้ำป้อนเข้าอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อน, $T_{t,i}$ = 30 °C, อุณหภูมิน้ำเมื่อได้รับการถ่ายโอนความร้อนจากความร้อนทิ้ง, $T_{t,o}$ = 60°C และสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน 50 W/m^2°C เมื่อแทนค่าในสมการ (3.4),(3.3),(3.1)และ(3.2) จะได้ข้อมูลออกแบบดังนี้

$$\Delta T_{lm} = \frac{(180 - 60) - (120 - 30)}{\ln [(180 - 60) / (120 - 30)]}$$

$$\Delta T_{lm} = 98.22\ ^\circ\text{C}$$

เมื่อแทนค่าหาอัตราการถ่ายโอนความร้อน จะได้

$$Q_c = (0.138\ \text{kg/s})(4.186\ \text{kJ/kg}^\circ\text{C})(60 - 30^\circ\text{C})$$

$$Q_c = 17.33\ \text{kW}$$

เมื่อแทนค่าหาพื้นที่ ผิวการถ่ายโอนความร้อน จะได้

$$A_t = \frac{17.33\ \text{kW}}{(50\ \text{W/m}^{2\,\circ}\text{C})(98.22\ ^{\circ}\text{C})}$$

$$\therefore \quad A_t = 3.55\ \text{m}^2$$

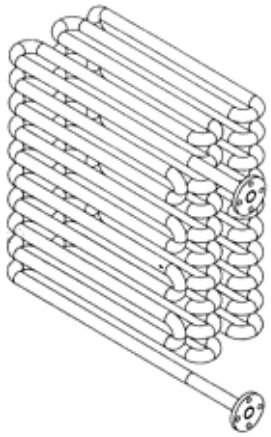
และแทนค่าหาขนาดความยาวท่อ โดยเลือกใช้ท่อ *STB* 35.8 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.033 m จะได้

$$L_t = \frac{3.55\ \text{m}^2}{3.14(0.033\ \text{m})}$$

$$\therefore \quad L_t = 33.66\ \text{m}$$

ในการปฏิบัติเลือกใช้ความยาวท่อ 34 m

โดยกำหนดการจัดเรียงท่อน้ำแบบแถวเรียง (In - Line or Aligned Arrangement) ให้ทิศทางการไหลความร้อนทิ้งอยู่ในแนวตั้งฉากกับท่อ จำนวนท่อ 5 แถว ๆ ละ 0.72 m จำนวน 50 กลับ โดยมีระยะห่างระหว่างแนวนอน, $S_L = 0.072$ m และระยะห่างระหว่างแถวตั้ง, $S_T = 0.076$ m และเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ, $D_o = 0.033$ m



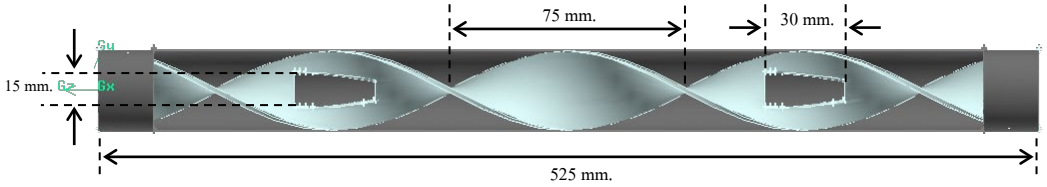
ภาพที่ 3.1 การออกแบบและสร้างอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อน (ส่วนท่อ)

ส่วนท่อ (Tube) เป็นส่วนที่บรรจุน้ำของเหลว (น้ำ) เพื่อรับความร้อนจาความร้อนทิ้งจากปล่องไอเสีย ในการออกแบบส่วนท่อนี้จะพิจารณาจากอุณหภูมิทางเข้า - ออก ของน้ำ และความร้อนทิ้งจากปล่องไอเสียเข้า - ออก ในการออกแบบชุดท่อนี้พิจารณาอุณหภูมิน้ำป้อน 30°C อุณหภูมิน้ำร้อนที่ได้ 60°C ส่วนความร้อนทิ้งจากปล่องไอเสียหม้อน้ำพิจารณาที่อุณหภูมิ 180°C และอุณหภูมิที่ปล่อยทิ้งหลังจากที่ถ่ายโอนความร้อนให้แก่ท่อแล้วที่ 120°C ได้เลือกใช้ท่อขนาด 0.033 m ท่อมีความยาว 34 m และมีพื้นที่ผิวการถ่ายโอนความร้อน 3.55 m^2

ลักษณะการวางท่อจะเป็นแบบแถวนอนเรียงตรงกันจำนวน 5 แถว และแถวตั้งจำนวน 5×10 แถว ส่วนด้านปลายท่อต่อแบบรูปตัวยูโดยใช้ข้องอ 90° (Elbow) มีความสูง 68.6 cm ซึ่งมีระยะห่างระหว่างแถวแนวนอนมีระยะ 7.2 cm และระยะห่างระหว่างแถวแนวตั้งมีระยะห่าง 7.6 cm

1.2 การออกแบบแผ่นบิด

การเพิ่มสมรรถนะอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมได้ใช้ผลจากการออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกที่มีพื้นที่ผิวการถ่ายโอนความร้อน 3.55 m^2 ท่อมีความยาว 34 m ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 0.033 m ลักษณะการวางท่อเป็นแบบท่อเรียงแถวอยู่ในระนาบ 5 แถว และเรียงท่อในแนวตั้ง 10 แถว ท่อแต่ละแถวมีความยาว 0.70 m ส่วนแผ่นบิดทำจากวัสดุอลูมิเนียมแต่ละแผ่นมีความยาว 0.52 m มีความกว้าง 0.025 m และหนา 0.002 m ระยะการบิดแต่ละช่วงการบิดมีความยาว 0.075 m จำนวน 7 ช่วงต่อแผ่น ส่วนพื้นที่เจาะรูปสี่เหลี่ยมทั้งหมด 0.09 m^2 โดยเจาะเป็นรูปสี่เหลี่ยมจำนวน 7 รูปต่อความยาว 1 แผ่นบิด จำนวน 50 แผ่น เพื่อใส่เข้าไปในท่อที่บรรจุน้ำ เพื่อให้น้ำเกิดการหมุนควงทำให้ถ่ายโอนความร้อนเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมอยู่ภายในท่อ

1.3 การออกแบบส่วนเปลือก

การหาขนาดส่วนเปลือกของอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมซึ่งได้กำหนดเงื่อนไข การออกแบบได้ ระหว่างพื้นที่ผิวส่วนเปลือกและส่วนท่อ 2 : 1 ซึ่งใช้สมการหาพื้นที่ผิวส่วนเปลือกดังนี้

หาปริมาณความร้อนส่วนเปลือก, Q_c

$$Q_c = mc_p(T_{s,i} - T_{s,o})$$

$$= (0.5\ \text{kg/s})(1.016\ \text{kJ/kg°C})(180\text{-}120)\text{°C}$$

$$Q_c = 30.48\ \text{kW}$$

หาพื้นที่ผิวส่วนเปลือก, A_s

$$A_S = \frac{Q_c}{U\Delta T_{lm}}$$

$$= \frac{30.48\ \text{kW}}{(60\ \text{W/m}^{2\circ}\text{C})(98.22^{\circ}\text{C})}$$

$$A_S = 5.17\ \text{m}^2$$

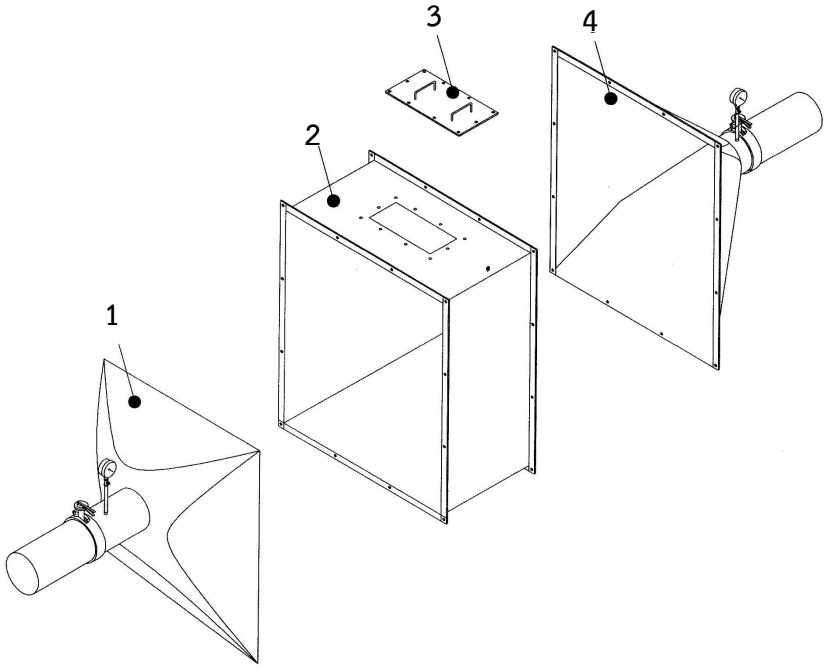
หาความยาวรูปสี่เหลี่ยม, L_s

$$L_S = \frac{A_S}{\pi D}$$

$$= \frac{5.17\ \text{m}^2}{(3.14)(0.754\ \text{m})}$$

$$L_S = 2.18\ \text{m}$$

ในทางปฏิบัติเลือกใช้ขนาดความยาว 1.80 m เพราะต้องให้พื้นที่ผิวเกิดความเร็วของความร้อนหมุนควงเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 3.3 การออกแบบและสร้างอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อน (ส่วนเปลือก)

ส่วนเปลือก (Shell) เป็นส่วนที่รับความร้อนจากปล่องไอเสียหม้อน้ำได้ออกแบบสร้างใช้ร่วมกับหม้อน้ำขนาดอัตราการผลิตไอน้ำ 500 kg/h อุณหภูมิของความร้อนที่ปล่อยทิ้งจะมีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 250-300°C เมื่อพิจารณาเป็นปริมาณความร้อนทิ้งอยู่ระหว่าง 15-20% ดังนั้นในการออกแบบส่วนเปลือกนี้จะแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ดังนี้

ฝาหน้า (1) เป็นส่วนที่ต่อเข้ากับท่อไอเสียของหม้อน้ำมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 127 mm ออกแบบส่วนหน้าเป็นรูปกรวยทำมุม 40 องศา มีขนาด 700 × 400 mm และมีความสูง 820 mm ด้านนี้

ต่อเข้ากับหัวดูด (2) ดังภาพที่ 3.5 ใช้วัสดุเหล็กแผ่นมีความหนา 4.5 mm เป็นส่วนหน้าที่ติดตั้งเข้ากับท่อความร้อนไอเสียหม้อน้ำ

ครอบท่อ (2) เป็นส่วนที่ต่อจากห้องดูดเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมมีขนาด 500 × 700 mm และสูง 800 mm ใช้วัสดุเหล็กแผ่นมีความหนา 4.5 mm ส่วนด้านหลังจะยึดติดกับฝาหลัง ส่วนครอบท่อนี้จะเป็นส่วนบรรจุท่อ (Tube)

ฝาปิด-เปิด (3) สำหรับทำความสะอาดจะอยู่ด้านบนส่วนครอบท่อมีขนาด 160×360 mm ส่วนฝานี้ใช้สำหรับเปิดทำความสะอาดภายในส่วนท่อ

ฝาหลัง (4) เป็นส่วนที่ต่อกับส่วนครอบท่อด้านออกซึ่งมีลักษณะ และขนาดเหมือนกับส่วนฝาหน้าเพียงแต่ติดตั้งด้านหลัง หลังจากที่ความร้อนถ่ายโอนความร้อนทิ้งให้แก่ท่อแล้วความร้อนทิ้งจะถูกดูดไหลเข้าสู่ท่อไอเสียปล่อยสู่บรรยากาศต่อไป

1.4 สรุปผลการออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม

ตามจุดมุ่งหมายงานวิจัยเพื่อออกแบบและสร้างอุปกรณ์ต้นแบบของอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมที่ใช้ร่วมกับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว ซึ่งสามารถสรุปขั้นตอนในการออกแบบและสร้างอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมได้ตามรายละเอียดต่อไปนี้

1.4.1 ข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมใช้ข้อมูลจากการปฏิบัติงานจริงของหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว ที่มีอัตราการผลิตไอน้ำ 500 kg/h ที่ความดันการใช้ไอน้ำ 5 kg/cm^2 อุณหภูมิน้ำป้อนอ่านได้จากเกจวัดที่ 30 ^{o}C อุณหภูมิก๊าซร้อนทิ้งที่วัดได้จากปล่องไอเสียหม้อน้ำที่อุณหภูมิ 180^{o}C อุณหภูมิน้ำป้อนที่ต้องการหลังออกจากก๊าซร้อนทิ้งถ่ายโอนความร้อนให้น้ำป้อนที่อยู่ภายในท่อที่ต้องการไม่ต่ำกว่า 60 ^{o}C และก๊าซร้อนทิ้งเมื่อถ่ายโอนความร้อนให้แก่น้ำภายในท่อแล้วก๊าซร้อนทิ้งจะออกจากอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและที่อุณหภูมิประมาณ 120 ^{o}C

1.4.2 ข้อมูลที่บันทึกได้จาก (ข้อ 1) นำมาหาค่าอุณหภูมิเฉลี่ยลอกาลิทึม, ΔT_{lm} ดังสมการ

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{s,i} - T_{t,i}) - (T_{s,o} - T_{t,i})}{ln\left[(T_{s,i} - T_{t,i})/(T_{s,o} - T_{t,i})\right]}$$

ผลอุณหภูมิเฉลี่ยลอกาลิทึมดังแสดงในตารางที่ 3.1 เป็นตัวแปรหนึ่งที่จะนำมาสู่การหาพื้นที่ผิว, A สำหรับการถ่ายโอนความร้อนของอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม

1.4.3 ข้อมูลที่บันทึกได้จาก (ข้อ 1) การปฏิบัตินำมาหาค่าความร้อน, Q ดังสมการ

$$Q_c = mCp(T_{t,o} - T_{t,i})$$

เมื่อน้ำป้อนเท่ากับ 0.138 kg/s และค่าความร้อนจำเพาะของน้ำเท่ากับ 4.186 kJ/kgK เมื่อนำค่าอุณหภูมิมาแทนค่าในสมการความร้อน, Q_c จะได้ค่าดังตารางที่ 3.1

1.4.4 เมื่อหาค่าปริมาณความร้อนได้ และหาค่าอุณหภูมิเฉลี่ยลอกาลิทึมได้แล้วมาหาค่าพื้นที่ผิวการถ่ายโอนความร้อน, A_t ของอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม ดังสมการ

$$A_t = \frac{Q_c}{U\Delta T_{lm}}$$

โดยเลือกใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเท่ากับ 50 $W/m^2{}^oC$ สอดคล้องกับการออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อ (อุทัย ผ่องรัศมี, 2556) ที่ใช้ความร้อนทิ้งจากปล่องไอเสียหม้อน้ำมาอุ่นน้ำป้อนให้แก่ท่อขด (Coil Tube) เมื่อแทนตัวแปรตามสมการถ่ายโอนความร้อนและอุณหภูมิเฉลี่ยลอกาลิทึมแล้วจะได้ค่าพื้นที่ผิวการถ่ายโอนความร้อน ดังตารางที่ 3.1

1.4.5 เมื่อได้พื้นที่ผิวการถ่ายโอนความร้อน, A_t สามารถหาความยาวท่อ, L ได้ดังสมการ

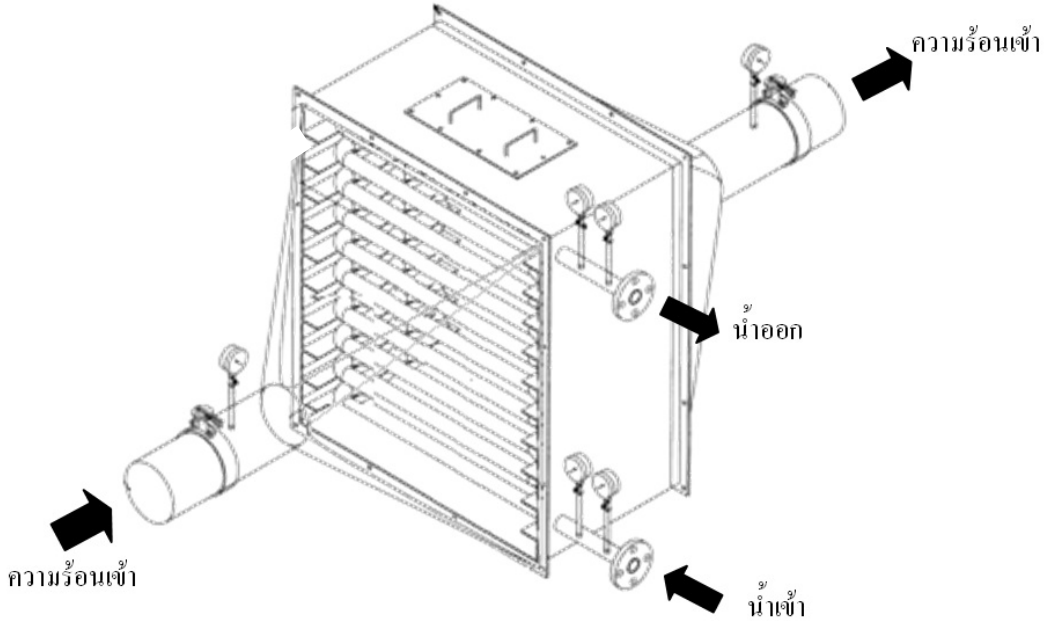
$$L = \frac{A_t}{\pi D}$$

เมื่อแทนพื้นที่ผิวโดยเลือกใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 0.033 m เหตุผลที่เลือกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อขนาด 0.033 m เพราะว่า หม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียวที่ออกแบบและสร้าง เลือกใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 0.033 m ซึ่งเป็นท่อที่ใช้กับหม้อน้ำโดยตรง (*STB* 35.8) ดังนั้นในการออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมที่ใช้ร่วมกับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว จึงจำเป็นต้องเลือกใช้วัสดุชนิดเดียวกันและขนาดเท่ากันเพื่อให้เกิดความปลอดภัยดังแสดงความยาวท่อในตารางที่ 3.1

1.4.6 เมื่อคำนวณหาความยาวท่อได้แล้วต้องพิจารณาขนาดความจุของน้ำภายในท่อทั้งหมด เพื่อให้สอดคล้องกับขนาดความจุของน้ำที่บรรจุอยู่ในหม้อน้ำขนาด 500 ลิตร เพื่อที่จะมาพิจารณาจำนวนกลับของท่อน้ำในอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม ดังนั้นขนาดของเปลือก (Shell) ต้องออกแบบพื้นที่ผิวให้ได้สัดส่วนระหว่างส่วนท่อกับส่วนเปลือก 1:2 จากเงื่อนไขดังกล่าวจึงนำมาสู่การหาระยะระหว่างแถวตั้งและระยะระหว่างแถวนอน ซึ่งค่าต่างๆ ที่ได้จากการคำนวณจะแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ผลการออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม

ลำดับที่	รายละเอียด	ปริมาณ
1	ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยลอกาลิทึม	98.20 °C
2	ปริมาณความร้อน	17.33 kW
3	พื้นผิวส่วนท่อสำหรับการถ่ายโอนความร้อน	3.55 m^2
4	ท่อมีความยาว	34 m
5	พื้นผิวส่วนเปลือกสำหรับการถ่ายโอนความร้อน	5.17 m^2
6	พื้นที่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม	0.018 m^2
7	ระยะห่างระหว่างแถวนอน	0.072 m
8	ระยะห่างระหว่างแถวตั้ง	0.076 m
9	เลือกใช้วัสดุท่อเหล็ก *STB* 35.8 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง	0.033 m

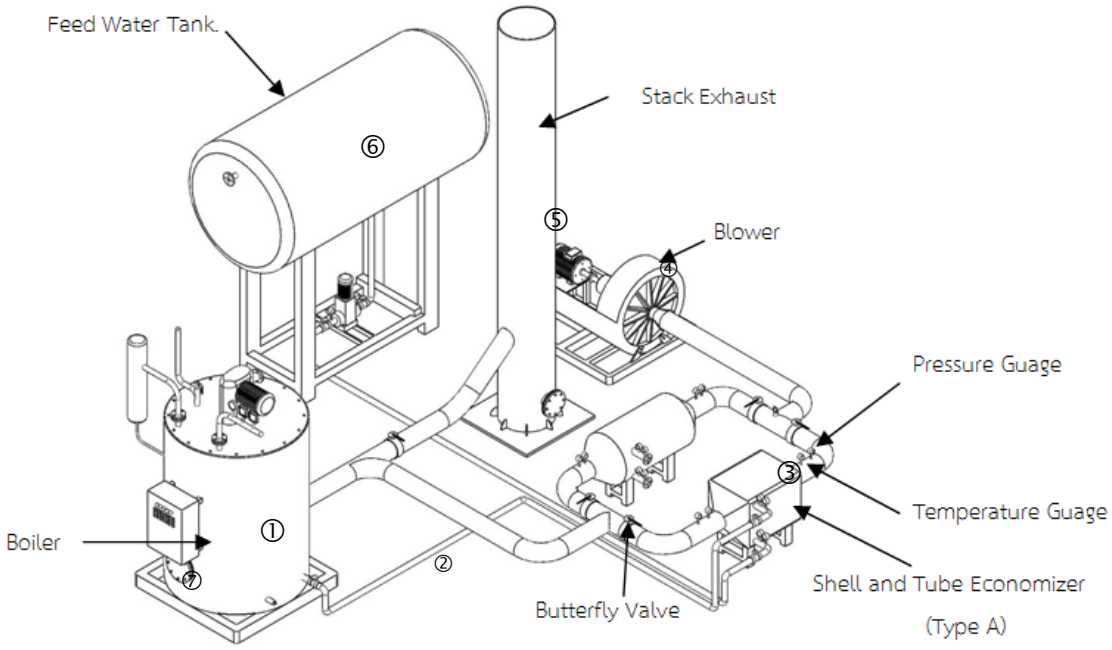


ภาพที่ 3.4 การออกแบบและสร้างอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม

ภาพที่ 3.4 แสดงการนำแบบมาสร้างอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมที่ใช้ร่วมกับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียวที่มีขนาดอัตราการผลิตไอน้ำ 500 kg/h ที่ความดันการใช้งาน 5 kg/cm^2 ซึ่งในการสร้างเลือกใช้ขนาดท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.033 m จำนวน 5 แถวนอน และ 10 แถวตั้ง (50 กลับ) ท่อมีความยาวทั้งสิ้นประมาณ 34 m โดยให้ก๊าซร้อนทิ้งจากปล่องไอเสียของ หม้อน้ำไหลอยู่ในแนวตั้งฉากกับส่วนท่อ (Tube) เมื่อก๊าซร้อนทิ้งถ่ายโอนความร้อนให้กับพื้นผิวผิวท่อ (ภายนอก-ภายใน) และน้ำ แล้วก๊าซร้อนทิ้งก็จะถูกพัดลมดูด (Blower) ดูดออกจากอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมและท่อก็ยังมีการติดอุปกรณ์ระบบ เช่น เกจวัดอุณหภูมิ, เกจวัดความดันที่ทางเข้าและทางออกเพื่อตรวจสอบข้อมูลสำหรับการทดสอบ

2. การติดตั้งอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมร่วมกับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว

อุปกรณ์ในการทดสอบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือก และท่อ ซึ่งได้ออกแบบสร้างตามที่ได้คำนวณซึ่งนำมาใช้ร่วมกับหม้อน้ำแบบหลอดน้ำ ซึ่งประกอบด้วยส่วนสำคัญ ดังนี้



ภาพที่ 3.5 การติดตั้งอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือก และท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม (Type *A*) ร่วมกับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว

ภาพที่ 3.5 หม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว ① เป็นแบบหม้อน้ำแบบหลอดน้ำท่อตั้งวงกลม จำนวน 2 แถว ตรงกลางติดตั้งหัวพ่นน้ำมันเชื้อเพลิงหรือหัวพ่นไฟ (Burner) ยี่ห้อ Ray รุ่น PDE-0-SPZ-2000 For Diesel·2 Stage จุดประกายไฟด้วยแม็กนีโต โดยใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง Burner On Put 18 m^3/h Electric Feeding Motor 0.55 kW Single Phase 220 v, 50 Hz ผลิตจากประเทศเยอรมันนี และเครื่องดูดอากาศ (Blower) ขนาดพัดลม 20.32 cm มอเตอร์ขนาด 220 V, 50 Hz ยี่ห้อ Ray ผลิตจากประเทศเยอรมันนี มีความเร็วของลมวัดได้ 3 ระดับ ตำแหน่งลิ้นอากาศปิดหมดวัดได้ 8-9.4 m/s ตำแหน่งลิ้นอากาศเปิดครึ่งหนึ่งวัดได้ 9.4-10.4 m/s ตำแหน่งลิ้นอากาศเปิดหมดวัดได้ 10.4-11.1 m/s และอุปกรณ์ดูดอากาศซึ่งมีอุปกรณ์การควบคุมการทำงาน เพื่อให้เกิดความปลอดภัย เช่น เกจวัดความดันไอน้ำสวิตซ์ควบคุมความดัน 2 ตัว และวาลว์นิรภัย ฯลฯ ความร้อนที่เกิดการสันดาปภายในหม้อน้ำส่วนบนประมาณ 800 - 900°C ซึ่งจะถ่ายโอนความร้อนให้แก่น้ำอยู่ภายในท่อ ความร้อนที่เหลือจากการถ่ายโอน ความร้อนประมาณ 300 - 350°C จะออกไปที่ปล่องไอเสียหม้อน้ำเพื่อปล่อยออกไปอุ่นน้ำป้อน ซึ่งความร้อนทิ้งไหลผ่านท่อ ② ต่อจากนั้นความร้อนทิ้งจะไหลเข้าไปในอุปกรณ์แบบเปลือกและท่อ ③ ซึ่งความร้อนทิ้งจะไหลอยู่ในแนวตั้งฉากกับกลุ่มท่อที่อยู่ภายในเปลือก เพื่อการถ่ายโอนความร้อนให้แก่น้ำที่อยู่ภายในท่อแล้ว พัดลมหรือชุดดูดความร้อน ④ ที่ออกจากอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อน ส่วนนี้จะใช้ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.20 cm เป็นด้านที่ยึดติดกับส่วนฝาหลังติดตั้งเกจวัดอุณหภูมิ 1 ตัว และติดตั้งวาล์วควบคุม 1 ตัว นอกจากนี้ยังเจาะรูขนาด 4 หุน จำนวน 1 รู เพื่อใส่เครื่องมือตรวจวัดความเร็วความร้อนทิ้งเพื่อวิเคราะห์สมรรถนะอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม

ภาพที่ 3.6 การติดตั้งเครื่องดูดความร้อนทิ้งหลังจากที่ถ่ายโอนความร้อนให้แก่อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อน

ภาพที่ 3.6 แสดงการติดตั้งต้นกำลังการดูดก๊าซร้อนทิ้ง (Blower) ได้ใช้เครื่องต้นกำลัง (Motor) ขนาด 3.7 kW, 220 V, 50 Hz ซึ่งพัดลมดูดนี้จะทำหน้าที่ดูดก๊าซร้อนทิ้ง หลังจากที่ความร้อนทิ้งถ่ายโอนความร้อนให้แก่น้ำที่อยู่ภายในท่อ (Tube) เมื่อความร้อนถ่ายโอนให้แก่น้ำภายในท่อแล้วก็จะถูกพัดลมดูดอากาศดูดออก เพื่อป้องกันมิให้เกิดความดันภายในเปลือก (Shell) สูง ดังนั้นก๊าซร้อนทิ้งจะถูกดูดออกสู่สิ่งแวดล้อมต่อไป

ส่วนระบบน้ำป้อน (Feed Water) ⑥ ได้ติดตั้งเครื่องสูบเพื่ออัดน้ำป้อนให้แก่อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนซึ่งประกอบด้วยถังเก็บขนาด 500 m^3 แรงดันน้ำขับปั๊มโดยเครื่องสูบยี่ห้อ Salmson Vertical Multistage with Motor (Germany) 1.85 kW 220 V, 50 Hz 5,000 L/m โดยปรับอัตราการไหลความเร็วน้ำด้วยวาล์วแบบเกจวาล์ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 38.1 mm และอ่านค่าอัตราการไหลของน้ำด้วยมาตรวัดการไหล (Flow Meter) ที่ผ่านการอัดน้ำจากเครื่องสูบแบบ Vertical Cylindrical Flow Capacity 1 m^3/h ซึ่งน้ำที่ใช้ในหม้อน้ำเป็นน้ำประปาโดยผ่านระบบการกรองน้ำแบบถังกรองน้ำอ่อน (Water Softener) ก่อนที่น้ำจะไหลสู่ถังน้ำป้อน

ภาพที่ 3.7 ระบบถังน้ำป้อนให้แก่อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อน

ภาพที่ 3.7 แสดงการติดตั้งระบบน้ำป้อนที่จะเข้าสู่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อโดยอุปกรณ์ระบบได้แก่ เครื่องสูบ, มาตรวัดอัตราการไหลของน้ำ, เกจวัดความดันน้ำ (เข้า - ออก) ซึ่งการทำงานของเครื่องสูบจะทำงานร่วมกับอุปกรณ์วัดระดับน้ำของหม้อน้ำซึ่งถูกควบคุมโดยชุดควบคุม (ไฟฟ้า)

ชุดควบคุม ⑦ ทำหน้าที่ควบคุม และแสดงสถานการณ์การทำงานของอุปกรณ์ระบบต่าง ๆ ดังนี้ คือ ควบคุมระบบน้ำป้อนให้แก่อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อน (Economizer), ควบคุมระบบหัวพ่นไฟ

(Burner) รวมทั้งระบบดูดความร้อนทิ้งจากปล่องไอเสียของหม้อน้ำ และควบคุมระบบความปลอดภัยการทำงานของหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว เพื่อป้องกันมิให้เกิดอันตรายที่เกิดจากการทำงาน

ภาพที่ 3.8 ชุดควบคุมระบบหม้อน้ำ

ภาพที่ 3.8 แสดงชุดควบคุมการทำงานของหม้อน้ำให้แก่ระบบน้ำป้อน, ระบบเชื้อเพลิง, ระบบอากาศ, ระบบความปลอดภัย, ระบบผลิตไอน้ำ และระบบการอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อ ซึ่งทุกระบบจะทำงานโดยอัตโนมัติและมีระบบป้องกันการเสียของอุปกรณ์แต่ละระบบเพื่อให้เกิดความปลอดภัย

3. อุปกรณ์ประกอบการทดสอบ

ในการทดสอบเก็บข้อมูลอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมที่ใช้ร่วมกับหม้อน้ำแบบคามร้อนไหลผ่านทางเดียว จะใช้เครื่องมือวัดค่าเพื่อเก็บข้อมูลดังนี้

3.1 เครื่องวัดความเร็วของความร้อนทิ้งเป็นอุปกรณ์ ในการวัดความเร็วความร้อนทิ้งก่อนและหลังจากที่ความร้อนทิ้งถ่ายโอนความร้อนให้แก่น้ำที่อยู่ภายในท่อ

ภาพที่ 3.9 อุปกรณ์วัดความเร็วความร้อนทิ้ง

ภาพที่ 3.9 แสดงอุปกรณ์วัดความเร็วความร้อนทิ้งในขณะที่ก๊าซร้อนทิ้งออกจากปล่องไอเสียของหม้อน้ำก่อนเข้าสู่อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม และหลังจากความร้อนทิ้งถ่ายโอนความร้อนให้แก่น้ำที่อยู่ภายในท่อต้องมีการวัดความร้อนทิ้งด้านออก เพื่อนำความเร็วที่วัดได้มาหาค่าเฉลี่ย เพื่อหาลักษณะการไหลภายในเปลือก (Shell)

3.2 เครื่องวิเคราะห์สมรรถนะหม้อน้ำ และอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อน

ภาพที่ 3.10 เครื่องวิเคราะห์สมรรถนะหม้อน้ำ และอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อน

ภาพที่ 3.10 แสดงเครื่องวิเคราะห์สมรรถนะหม้อน้ำ และอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อน Ehiam (Visitor-01 ℓ) ประเทศเยอรมัน เป็นเครื่องมือใช้วัดสมรรถนะของหม้อน้ำในปัจจัยต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิบรรยากาศ (T_{air}) อุณหภูมิจากความร้อนทิ้งของปล่องไอเสียหม้อน้ำ (T_{gas}) ประสิทธิภาพหม้อน้ำ (η) อากาศส่วนเกิน (λ) ออกซิเจนที่เหลือจากการสันดาป (O_2) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซคาร์บอนมอนน็อกไซด์ (CO) การสูญเสียความร้อน ($Loss$) ฯลฯ

4. วิธีการทดสอบ

ในการทดสอบเก็บข้อมูลงานวิจัยจะต้องมีการเตรียมการเดินเครื่องควบคุม และการทดสอบเดินเครื่องเพื่อการเก็บข้อมูล ในการดำเนินการวิธีการทดสอบครั้งนี้ได้ให้นักศึกษาจำนวน 15 คน ห้อง 5446 - 66/ชั้นปีที่ 4 ที่ได้ผ่านการอบรมและสอบผ่านใบประกอบวิชาชีพการควบคุมประจำหม้อน้ำ นอกจากนี้นักศึกษาได้ผ่านการเรียนรายวิชา วิศวกรรมหม้อน้ำมาแล้ว โดยแบ่งหน้าที่รับผิดชอบเป็นส่วนต่าง ๆ ดังหัวข้อต่อไปนี้

4.1 การเตรียมการเดินเครื่อง และการควบคุม

4.1.1 ตรวจดูระบบน้ำ (ระดับน้ำ)

4.1.2 ตรวจดูระบบเชื้อเพลิง (ระดับน้ำมันเชื้อเพลิง)

4.1.3 ตรวจดูอุปกรณ์ความปลอดภัยทุกชนิด

4.1.4 ตรวจดูตำแหน่งการปิด - เปิด วาล์วทุกตัว

4.1.5 ตรวจดูระบบควบคุม สวิตช์ จะต้องอยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้อง

4.1.6 ตรวจสอบดูระบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อน

4.1.7 ติดตั้งอุปกรณ์การวัดสมรรถนะหม้อน้ำ และเครื่องวัดอื่น ๆ

4.2 การทดสอบการเดินเครื่อง เพื่อให้เครื่องทำงานในสภาวะปกติ

4.2.1 เปิดเมนสวิตช์ไฟฟ้า

4.2.2 เปิดสวิตช์ควบคุม

4.2.3 เปิดสวิตช์ปั๊มน้ำ

4.2.4 เปิดสวิตช์ปั๊มน้ำมันเชื้อเพลิง

4.2.5 เปิดสวิตช์ Burner หัวที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

หมายเหตุ ขณะที่เครื่องทำงานนั้นสวิตช์สัญญาณเตือนจะต้องเปิดตลอดการทำงาน

4.3 การตรวจสอบขณะเดินเครื่องหม้อน้ำ

4.3.1 แรงดันไอน้ำ (เกจ)

4.3.2 อุณหภูมิที่ปล่องไอเสีย

4.3.3 ระดับน้ำ

4..3.4 ค่าตัวแปรต่าง ๆ จากเครื่องมือวัด Ehiam (Visitor-01 ℓ) ในการตรวจวัดสมรรถนะหม้อน้ำ และอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม

5. การเก็บผลการทดสอบ

ในการดำเนินการเก็บผลการทดสอบเพื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์ผลตามวัตถุประสงค์งานวิจัย จะต้องดำเนินการเดินหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว ที่ใช้ร่วมกับอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมให้ทำงานอยู่ในสภาพปกติ โดยมีการตรวจสอบระบบการผลิตไอน้ำ ปริมาณก๊าซร้อนทิ้งที่ปล่องไอเสียหม้อน้ำและอุณหภูมิน้ำที่ป้อนที่จะเข้าสู่อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อ ตามขอบเขตการทดสอบที่ได้กำหนดไว้ในบทที่ 1 หัวข้อ 1.3 ดังมีรายละเอียดต่าง ๆ ดังนี้

5.1 อุณหภูมิน้ำป้อนเข้าอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนที่ 30 - 40 °C

5.1.1 อัตราการไหลน้ำป้อนที่ 0.05 kg/s

5.1.2 Burner หัว 1-2 จะต้องทำงานอย่างต่อเนื่องที่ความดันประมาณ 2 บาร์เกจ

5.1.3 ความดันการใช้งานในการผลิตไอน้ำที่ 1-4 kg/cm^2 โดยควบคุมอัตราการจ่ายไอน้ำให้เหมาะสมกับการทำงานของ Burner

5.1.4 ควบคุมอุณหภูมิความร้อนทิ้งที่ 250 - 300°C

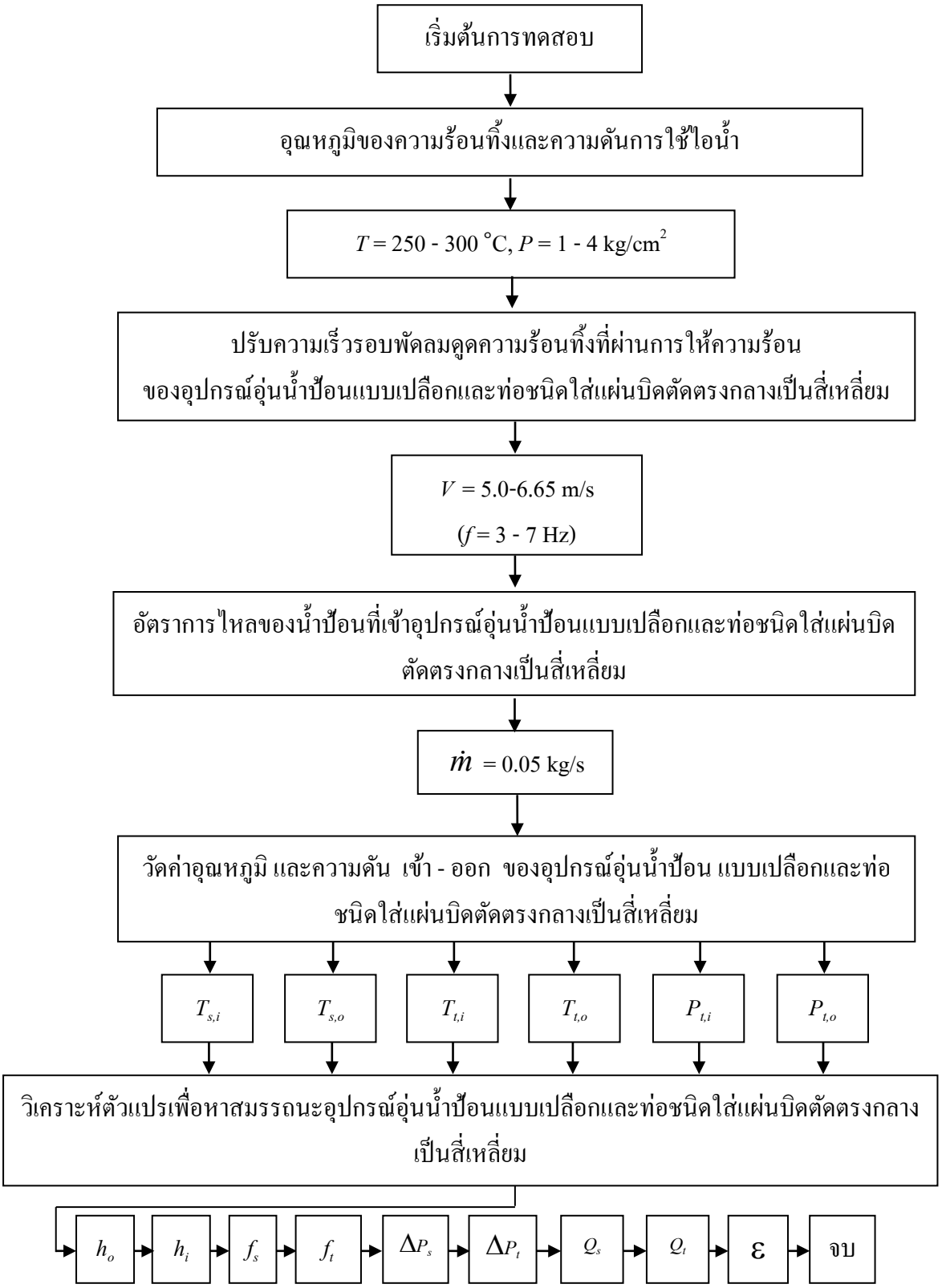
5.1.5 ระยะเวลาที่บันทึกข้อมูลขึ้นอยู่กับการควบคุมอัตราการผลิตไอน้ำที่ 1, 2, 3 และ 4 kg/cm^2

5.1.6 ใช้น้ำมันดีเซล (Diesel) เป็นเชื้อเพลิง (ปต.ท.)

5.1.7 บันทึกข้อมูลในตารางเพื่อนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ของอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อน (Economizers) แบบเปลือกและท่อชนิดติดแผ่นบิดตัดตรงกลางในเป็นสี่เหลี่ยม

5.1.8 ปรับอัตราความเร็วความร้อนทิ้งที่ผ่านการอุ่นน้ำป้อนแล้วที่ความเร็ว 5.0-6.5 m/s

จากข้อกำหนดการทดสอบการเก็บข้อมูลเพื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์ผลตามวัตถุประสงค์ที่ได้กำหนดไว้ ซึ่งสามารถสรุปขั้นตอนการทดสอบได้ตามภาพที่ 3.11 ดังนี้



ภาพที่ 3.11 ขั้นตอนการทดสอบ

6. สมการวิเคราะห์ผลการทดสอบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม

จากการทดสอบนำค่าข้อมูลของอุณหภูมิที่ได้มาคำนวณตามสมการที่กำหนด เพื่อหาค่าสมรรถนะทางความร้อนของอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือก และท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

6.1 การคำนวณหาค่าตัวแปรในเปลือก

6.1.1 การคำนวณหาค่าความเร็วในการไหลสูงสุดภายในเปลือก, $V_{s,max}$

$$V_{s,max} = \frac{S_T}{S_T - D_o} V_s \tag{3.1}$$

6.1.2 การคำนวณหาค่าเลขเรย์โนลดส์ในเปลือก, $Re_{s,max}$

$$Re_{s,max} = V_{s.max} \frac{D_o \rho_s}{\mu_s} = \frac{V_{s.max} V_o}{v_s} \tag{3.2}$$

6.1.3 การคำนวณหาค่าเลขนัสเซลท์ในเปลือก, Nu_s

$$Nu_s = C_2 C \, Re_{s,max}^{m} \, P_s^{0.36} \left(\frac{Pr_s}{Pr_w} \right)^{0.25} \tag{3.3}$$

เมื่อ C_2 เป็นค่าแฟคเตอร์ปรับแก้ของกลุ่มท่อ เมื่อจำนวนแถวของกลุ่มท่อน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10 แถว และค่าเลขเรย์โนลดส์มากกว่า 1000 ($N_L \le 10, Re_s > 1000$) ซึ่งสามารถเปิดตารางหาค่าสมบัติต่าง ๆ ของของไหลได้ โดยสมบัติที่ใช้ในสมการต้องเป็นสมบัติที่หาจากค่าอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิของผิววัตถุกับอุณหภูมิของของไหล ($\overline{T}_f$) ดังสมการ (3.4)

$$\overline{T}_f = \frac{T_s + T_\alpha}{2} \tag{3.4}$$

6.1.4 การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนในเปลือก, h_o

$$h_o = \frac{Nu_s k_s}{D_o} \tag{3.5}$$

6.1.5 การคำนวณหาค่าความดันลดภายในเปลือก, ΔP_s

$$\Delta P_s = \frac{2 f_s G_{max}^2 N_L}{\rho_s} \left(\frac{\mu_w}{\mu_s} \right)^{0.14}$$

$$= 2 f_s N_L \left(\frac{\rho_s V_{s,max}}{\rho_s} \right) \left(\frac{\mu_w}{\mu_s} \right)^{0.14} \tag{3.6}$$

6.1.6 การคำนวณหาแฟกเตอร์ความเสียดทานในเปลือก, f

$$f = \left\{ 0.044 + \frac{0.08 S_L / D_O}{[(S_T - D_O)/D_O]^{0.43+1.13 D_O/S_L}} \right\} Re_{s,max}^{-0.15} \quad (3.7)$$

6.2 การคำนวณหาตัวแปรภายในท่อ

6.2.1 การคำนวณหาพื้นที่การไหลภายในท่อ, A_t

$$A_t = \frac{\dot{Q}}{U \Delta T_{lm}} \quad (3.8)$$

6.2.2 การคำนวณหาความเร็วเชิงมวลภายในท่อ, G_t

$$G_t = \frac{W_t}{A_t} \quad (3.9)$$

6.2.3 การคำนวณหาค่าเลขเรย์โนลดส์ภายในท่อ, Re_t

$$Re_t = \frac{G_t D_i}{\mu_i} = \frac{U_t D_i \rho_t}{\mu_t} \quad (3.10)$$

6.2.4 การคำนวณหาค่าเลขแพรนด์ทัลภายในท่อ, Pr_t

$$Pr_t = \frac{Cp_t \mu_t}{k_t} \quad (3.11)$$

6.2.5 การคำนวณหาค่าเลขนัสเซลท์, Nu_t ในกรณีเป็นการไหลแบบราบเรียบ ค่า $(Re_t Pr_t D_i/L) > 10$ หาได้จากสมการของ Sieder และ Tate

$$Nu_t = 1.86 \left(Re_t Pr_t \right)^{0.33} \left(\frac{D_i}{L} \right)^{0.33} \left(\frac{\mu_t}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (3.12)$$

ในกรณีเป็นการไหลแบบปั่นป่วน หาได้จากสมการ

$$Nu_t = 0.027 Re_t^{0.8} Pr_t^{0.33} \left(\frac{\mu_t}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (3.13)$$

6.2.6 การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนภายในท่อ, h_i

ในกรณีเป็นการไหลแบบราบเรียบ

$$h_i = \frac{k_t Nu_t}{D_i} = 1.86 \left(\frac{k}{D_i} \right) \left(Re_t Pr_t \right)^{0.33} \left(\frac{D_i}{L} \right)^{0.33} \left(\frac{\mu_t}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (3.14)$$

ในกรณีเป็นการไหลปั่นป่วน

$$h_t = 0.027 \left(\frac{k_t}{D_i} \right) Re_t^{0.8} Pr_t^{0.33} \left(\frac{\mu_t}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (3.15)$$

6.2.7 การคำนวณหาความดันลดภายในท่อ, ΔP_t

$$\Delta P_t = \frac{fN_L LG_t^2}{2000 D_i S_t \phi} \quad (3.16)$$

6.3 การคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer Rate)

การคำนวณหาอัตราความจุความร้อนสำหรับความร้อนน้ำที่ไหลภายในเปลือก หาได้จากสมการ

$$C_s = \dot{W}_s Cp_s \quad (3.17)$$

เมื่อ C_s = อัตราความจุความร้อนสำหรับความร้อนในเปลือก (W/^{O}C)

$\dot{W}_s$ = อัตราการไหลภายในเปลือก (kg/s)

Cp_s = ค่าความจุความร้อนสำหรับความร้อนในเปลือก (J/kg ^{O}C)

6.4 การคำนวณหาอัตราความจุความร้อนสำหรับของไหลภายในท่อ หาได้จากสมการ

$$C_t = \dot{W}_t Cp_t \quad (3.18)$$

เมื่อ C_t = อัตราความจุความร้อนสำหรับความร้อนในท่อ (W/^{O}C)

$\dot{W}_t$ = อัตราการไหลภายในท่อ (kg/s)

Cp_t = ค่าความจุความร้อนสำหรับความร้อนในท่อ (J/kg ^{O}C)

6.5 การคำนวณหาอัตราการถ่ายโอนความร้อนสูงสุด, $\dot{Q}_{max}$ หาได้จากสมการ

$$\dot{Q}_{max} = C_{min}(T_{s,i} - T_{t,i}) \quad (3.19)$$

เมื่อ $\dot{Q}_{max}$ = อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด (W)

C_{min} = อัตราความจุความร้อนสูงสุด (W/^{O}C)

$T_{s,i}$ = อุณหภูมิของความร้อนภายในเปลือก (^{O}C)

$T_{t,i}$ = อุณหภูมิของน้ำป้อนภายในท่อ (^{O}C)

6.6 การคำนวณหาอัตราการถ่ายโอนความร้อนจริงในเปลือก, $\dot{Q}_{s,act}$

$$\dot{Q}_{s,act} = C_s(T_{s,i} - T_{s,o}) \quad (3.20)$$

เมื่อ $\dot{Q}_{s,act}$ = อัตราการถ่ายโอนความร้อนจริงของความร้อนในเปลือก (W)

C_t = อัตราความจุความร้อนสำหรับของไหลภายในท่อ (W/^{O}C)

$T_{t,I}$ = อุณหภูมิของของไหลภายในท่อ (^{O}C)

$T_{t,i}$ = อุณหภูมิของของไหลภายนอกท่อ (^{O}C)

6.7 การศึกษาอัตราการถ่ายเทความร้อนจริงเฉลี่ย, $\dot{Q}_{act}$ หาได้จากสมการ

$$\dot{Q}_{act} = \dot{Q}_{s,act} + \dot{Q}_{t,act}$$

เมื่อ $\dot{Q}_{act}$ = อัตราการถ่ายเทความร้อนจริงเฉลี่ย (W)

$\dot{Q}_{s,act}$ = อัตราการถ่ายเทความร้อนจริงในเปลือก (W)

$\dot{Q}_{t,act}$ = อัตราการถ่ายเทความร้อนจริงในท่อ (W)

6.8 การหาประสิทธิผล (สมรรถนะอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม), ε

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_{act}}{\dot{Q}_{max}} \tag{3.22}$$

6.9 การคำนวณหาค่าความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยลอกาลิทึมในกรณีคิดค่าฟาลว์ลิ่งสำหรับการไหลแบบตั้งฉาก หาได้จากสมการ

$$P = \frac{T_{t,o} - T_{t,i}}{T_{s,i} - T_{t,i}} \tag{3.23}$$

และ $$R = \frac{T_{s,i} - T_{s,o}}{T_{t,o} - T_{t,i}} \tag{3.24}$$

ถ้า $R \neq 1$

$$\alpha = \left(\frac{1-RP}{1-P}\right)^{1/N} \tag{3.25}$$

$$S = 3.36\,\frac{\alpha - 1}{\alpha - R} \tag{3.26}$$

$$F = \frac{\sqrt{R^2+1}\,In\left(\frac{1-s}{1-RS}\right)}{(R-1)\,In\left[\frac{2-S\left(R+1-\sqrt{R^2+1}\right)}{2-S\left(R+1+\sqrt{R^2+1}\right)}\right]} \tag{3.27}$$

ถ้า $R = 1$

$$S = \frac{P}{N-(N-1)P} \tag{3.28}$$

$$F = \frac{S\sqrt{2}}{(1-S)In\left[\frac{2-S\left(2-\sqrt{2}\right)}{2-S\left(2+\sqrt{2}\right)}\right]} \tag{3.29}$$

$$\Delta T_{lm} = F\left[\frac{\left(T_{s,i}-T_{t,o}\right)-\left(T_{s,o}-T_{t,i}\right)}{In\left(\frac{T_{s,i}-T_{t,o}}{T_{s,o}-T_{t,i}}\right)}\right] \tag{3.30}$$

6.10การคำนวณหาสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวมที่คิดความหนาของผนังท่อและคิดค่า Fouling Factor

$$U = \left[\left(\frac{D_o}{h_t D_i}\right) + \frac{D_o In(D_o / D_i)}{2k_t} + \frac{1}{h_s} + \frac{R_{f,t} D_o}{D_i} + R_{f,s}\right] \qquad (3.31)$$

สำหรับงานวิจัยนี้จะไม่คิดค่าองค์ประกอบฟาลว์ลิ่ง เนื่องจากระบบน้ำป้อนที่ใช้เป็นน้ำประปานอกจากนี้ยังติดตั้งเครื่องกรองน้ำป้อนก่อนเข้าถังพักของหม้อน้ำ

7. การแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวแปร

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวแปรต้นและตัวแปรตาม จะนำเสนอในรูปของความสัมพันธ์ของกราฟ เพื่ออภิปรายผลถึงความแตกต่างตามขอบเขตการทดสอบ และสรุปผลของความสัมพันธ์ของกราฟเพื่อที่จะแสดงถึงสมรรถนะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมที่ใช้ร่วมกับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว ดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

7.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายโอนความร้อนภายในเปลือกกับความเร็วดูดความร้อนทิ้ง

9.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายโอนความร้อนภายในท่อกับความเร็วดูดความร้อนทิ้ง

7.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลดส์ภายในเปลือกกับความเร็วดูดความร้อนทิ้ง

7.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลดส์ภายในท่อกับความเร็วดูดความร้อนทิ้ง

7.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซลท์ภายในเปลือกกับความเร็วดูดความร้อนทิ้ง

7.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขนัสเซลท์ภายในท่อกับความเร็วดูดความร้อนทิ้ง

7.7 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนภายในเปลือกกับความเร็วดูดความร้อนทิ้ง

7.8 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนภายในท่อกับความเร็วดูดความร้อนทิ้ง

7.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดภายในเปลือกกับความเร็วดูดความร้อนทิ้ง

7.10ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดภายในท่อกับความเร็วดูดความร้อนทิ้ง

7.11ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิผลอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อกับความเร็วดูดความร้อนทิ้ง

8. การวิเคราะห์ความคุ้มค่าและการประหยัดพลังงาน

ในการวิเคราะห์หาอัตราการประหยัดพลังงานเชื้อเพลิงจากกรณีใช้ความร้อนทิ้งมาอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือก และท่อระหว่างของไหลที่เป็นความร้อนทิ้งกับของไหลเป็นน้ำและระยะเวลาคืนทุน มีรายละเอียดดังนี้

8.1 นำค่าปริมาณความร้อนจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือก และท่อที่ได้มาจากใช้ความร้อนทิ้งแลกเปลี่ยนความร้อนให้แก่น้ำเย็นภายในท่อ แล้วทำให้น้ำในท่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งเป็นค่าความร้อนที่ประหยัดได้

8.2 นำค่าปริมาณความร้อนที่ประหยัดได้ไปเปรียบเทียบกับชั่วโมงการทำงานใน 1 วัน ซึ่งกำหนดชั่วโมงการทำงานวันละ 6 ชั่วโมง

8.3 นำค่าปริมาณความร้อนที่ประหยัดได้ในชั่วโมงการทำงานไปคำนวณค่าเชื้อเพลิงดีเซลที่ต้องจ่ายต่อชั่วโมงการทำงาน

8.4 คำนวณค่าการประหยัดค่าเชื้อเพลิงดีเซล โดยคิดต่อปีของชั่วโมงการทำงาน

8.5 คำนวณระยะเวลาคืนทุน

9. แนวทางการนำผลงานการวิจัยไปใช้ประโยชน์เพื่อประเมินสมรรถนะอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม

ตามที่ภาคอุตสาหกรรมขอขึ้นทะเบียนผู้ใช้หม้อน้ำและอุปกรณ์ระบบของหม้อน้ำสำหรับหม้อน้ำขนาดเล็กมีอัตราการผลิตไอน้ำระหว่าง 10-2,600 kg/h มีความดันใช้ไอน้ำไม่เกิน 10 kg/cm^2 ต่อกรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม มีไม่น้อยกว่า 350 ลูก (สถิติการขอขึ้นทะเบียนการใช้หม้อน้ำ, 2551) โดยเฉพาะภาคอุตสาหกรรมที่ใช้หม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว (Once-Through Boiler) และบริษัทที่ผลิตหม้อน้ำและอุปกรณ์ประหยัดพลังงาน (Economizer) ในประเทศไทยไม่น้อยกว่า 100 บริษัท นอกจากนี้การใช้พลังงานจากหม้อน้ำหรือจากอุปกรณ์ของระบบยังมีการควบคุมโดยกฎหมาย เนื่องจากหม้อน้ำทำงานภายใต้ความดันการใช้งานสูง ๆ สำหรับงานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก บริษัท ไทยสตรีมเซอร์วิสแอนด์ซัพพลาย จำกัด ตั้งอยู่เลขที่ 22 ซอยปุณณวิถี แขวงบางจากเขตพระโขนง กรุงเทพมหานคร 10260 เป็นจำนวนเงิน 150,000 บาท เพื่อดำเนินการวิจัย ซึ่งผลงานวิจัยเมื่อเสร็จสิ้นแล้วทางบริษัทมีความประสงค์ที่จะนำผลงานการวิจัยไปใช้ในเชิงพาณิชย์ให้แก่ภาคอุตสาหกรรมที่มีการใช้หม้อน้ำขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก ซึ่งเมื่อภาคอุตสาหกรรมได้ติดตั้งอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมร่วมกับหม้อน้ำขนาดเล็กจะส่งผลให้บริษัทที่ใช้หม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียวเกิดการประหยัดพลังงาน (มูลค่าเชื้อเพลิงลดลง) นอกจากนี้จะยังส่งผลดีต่อสิ่งแวดล้อม คือ อุณหภูมิความร้อนทิ้งที่อยู่ในรูปของ

ก๊าซชนิดต่าง ๆ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2), ก๊าซออกซิเจน (O_2), ก๊าซคาร์บอนมอนน๊อกไซด์ (CO) เป็นต้น อุณหภูมิปกติที่ออกจากปล่องไอเสียของหม้อน้ำจะอยู่ระหว่าง 300-400 ^{o}C ซึ่งเมื่อติดตั้งอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมร่วมกับหม้อน้ำแล้ว อุณหภูมิจะลดลงประมาณครึ่งหนึ่งของอุณหภูมิปล่องไอเสียของหม้อน้ำ

สำหรับการทดสอบสมรรถนะหรือประสิทธิภาพอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม ผู้วิจัยจะใช้วิธีการทดสอบเปรียบเทียบกับอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อ (Shell and Tube) ที่ใช้ร่วมกับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว ที่มีอัตราการผลิตไอน้ำ 500 kg/h มีความดันใช้ไอน้ำไม่เกิน 5 kg/cm^2 โดยมีขอบเขตการออกแบบใช้ข้อมูลเหมือนกันและขอบเขตการทดสอบ การวิเคราะห์ผลที่ใช้ตัวแปรเหมือนกัน เพื่อทดสอบสมรรถนะ หรือประสิทธิภาพอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนทั้ง 2 แบบ ว่าอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมหรือแบบเปลือกและท่อ ชนิดใดจะมีสมรรถนะสูงสุด ก่อนที่บริษัท ไทยสตรีมเซอร์วิสแอนด์ซัพพลาย จำกัด จะนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ต่อไป

10. การเผยแพร่อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมให้แก่ภาคอุตสาหกรรม

ศูนย์วิจัยพลังงาน สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี เป็นศูนย์วิจัยด้านพลังงาน โดยเฉพาะพลังงานที่เหลือจากการใช้ เช่น น้ำมันพืชใช้แล้ว (Biodiesel) ก๊าซร้อนทิ้งที่เหลือจากการใช้จากปล่องไอเสียหม้อน้ำ (Boiler) ซึ่งมีหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียวที่มีอัตราการผลิตไอน้ำ 500 kg/h และหม้อน้ำแบบหลอดไฟขนาดอัตราการผลิตไอน้ำ 1,000 kg/h เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีครุภัณฑ์สนับสนุนการวิเคราะห์คุณสมบัติของเชื้อเพลิงและความร้อนทิ้งฯ ศูนย์วิจัยพลังงาน จึงได้ขอขึ้นทะเบียนเป็นหน่วยจัดฝึกอบรมเชิงปฏิบัติการ “หลักสูตรผู้ควบคุมประจำหม้อน้ำ” หมายเลขทะเบียน 111 - 100 - 003 กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม ศูนย์วิจัยพลังงานแห่งนี้ได้จัดหลักสูตรอบรมเชิงปฏิบัติการ “ผู้ควบคุมประจำหม้อน้ำ” มาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2540 ถึงปัจจุบัน จัดถึงจำนวน 17 รุ่น ในแต่ละรุ่นจะรับผู้ที่มีหน้าที่ควบคุมหม้อน้ำจากภาคอุตสาหกรรมประมาณ 30 - 40 คน หลักสูตรดังกล่าวจะอบรมภาคทฤษฎีและปฏิบัติ 36 ชั่วโมง ซึ่งผู้ที่เข้าอบรมจะต้องสอบโดยใช้ข้อสอบมาตรฐานจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งมีเกณฑ์การผ่าน 60% ขึ้นไป ผู้ที่สอบผ่านหน่วยจัดและกรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม จะออกวุฒิบัตรให้ เพื่อขอขึ้นทะเบียนเป็นผู้ควบคุมประจำหม้อน้ำต่อกรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม

เพื่อให้ผลงานวิจัย การนำความร้อนทิ้งมาใช้ประโยชน์สำหรับหม้อน้ำขนาดเล็ก โดยออกแบบและสร้างอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมใช้ร่วมกับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว ผู้วิจัยจะเพิ่มการบรรยายร่วมในหัวข้อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพเพื่อการประหยัดพลังงาน สำหรับการออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมในภาคทฤษฎี ส่วนในภาคปฏิบัติจะสาธิตการใช้งานและทดสอบสมรรถนะอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อ ชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมให้แก่ผู้เข้ารับการอบรมเชิงปฏิบัติการทุกคน เพื่อให้ผู้ปฏิบัติและผู้อำนวยการใช้ หรือเจ้าของกิจการให้ความสำคัญต่อการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่าและมีประสิทธิภาพ ในหลักสูตรผู้ควบคุมประจำหม้อน้ำและการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์ รุ่นที่ 17 จัดระหว่างวันที่ 10-15 มีนาคม 2557 ณ ศูนย์วิจัยพลังงาน สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี

บทที่ 4
ผลการออกแบบ และการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

ในการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ต้นแบบ อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมสำหรับหม้อน้ำแบบให้ความร้อนไหลผ่านทางเดียว ซึ่งได้ใช้ข้อมูลจากการทดสอบเบื้องต้นเพื่อใช้การออกแบบและสร้างอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมซึ่งได้ทำการทดสอบ นำผลที่ได้มาวิเคราะห์ตัวแปรต่าง ๆ ตามวัตถุประสงค์ที่ได้กำหนดไว้และได้วิเคราะห์ความคุ้มค่า และการประหยัดพลังงาน โดยได้แบ่งการอธิบายผลต่างๆ ดังมีรายละเอียด ต่อไปนี้

1. การออกแบบเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม
2. ผลกระทบที่เกิดจากการดูดก๊าซร้อนทิ้งออกจากอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม
   - 2.1 อัตราการถ่ายโอนความร้อนภายในเปลือกและภายในท่อ
   - 2.2 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนในเปลือกและในท่อ
   - 2.3 ความดันลดในเปลือกและในท่อ
   - 2.4 ประสิทธิผลอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อ
3. การประหยัดพลังงานและความเหมาะสมการลงทุน

1. ผลการออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม

สำหรับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว ซึ่งใช้ข้อมูลจากการทดสอบการทำงานจริงของหม้อน้ำเพื่อการออกแบบดังตารางสรุปผลการออกแบบดังนี้

ตารางที่ 4.1 สรุปผลการออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม

เงื่อนไขที่ใช้ออกแบบ	ผลที่ได้
$T_{s,i}$ = 180 °C	- พื้นที่ผิวท่อสำหรับการถ่ายโอนความร้อน 3.55 m^2
$T_{s,o}$ = 120°C	- ความยาวท่อ 34 m
$T_{t,i}$ = 30 °C	- อุณหภูมิเฉลี่ยลอการิทึม 98.10°C
$T_{t,o}$ = 60 °C	- อัตราการถ่ายโอนความร้อน 17.33 kW
$\dot{m}$ = 500 kg/h	- พื้นที่ผิวเปลือก 5.17 m^2
= 4.186 kJ/kg°C	- ความยาวเปลือก 2.18 m
	- ระยะห่างระหว่างแถวตั้ง 0.07 m

สรุปในการออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมที่ใช้ร่วมกับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว ซึ่งใช้อัตราการผลิตไอน้ำสูงสุดที่ 500 kg/h ส่วนอุณหภูมิจะใช้อุณหภูมิต่ำสุดของความร้อนทิ้งที่ออกจากปล่องไอเสียหม้อน้ำ 180°C การเลือกใช้อุณหภูมิที่ 180°C เพราะว่า ถ้าใช้อุณหภูมิต่ำกว่านี้จะส่งผลต่อการเกิดอุณหภูมิจุดน้ำค้างเป็นผลให้ปล่องไอเสียหม้อน้ำและอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมเกิดการผุกร่อนได้ง่ายและถ้าออกแบบโดยใช้อุณหภูมิสูงสุดของความร้อนทิ้งจะมีผลกระทบการทำงาน ต่อหม้อน้ำและต้นทุนการผลิตอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมจะสูง ดังนั้นจึงเลือกใช้อุณหภูมิที่ 180 °C ส่วนอุณหภูมิน้ำป้อนเลือกใช้ที่ 30°C เพราะเป็นอุณหภูมิการทำงานเริ่มต้นของหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว

ผลที่ได้จากการออกแบบดังที่ได้กล่าวในเบื้องต้น ผู้วิจัยจะนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาบางตัวแปร เช่น พื้นที่ผิวการถ่ายโอนความร้อนเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม ความยาวท่อฯ ส่วนอัตราการผลิตไอน้ำจะใช้ที่ 200 kg/h เหตุผลที่เลือกใช้อัตราการผลิตไอน้ำต่ำกว่าอัตราการผลิตไปน้ำที่ใช้ออกแบบ เพราะว่าการผลิตไอน้ำที่ออกแบบจะใช้ระยะเวลาต่อหนึ่งชั่วโมง ส่วนการทดสอบที่ใช้ในงานวิจัยจะใช้ระยะเวลา 20 นาที ต่อการทดสอบ 1 ครั้ง และมีค่าความดันการใช้งานไอน้ำอยู่ระหว่าง 1 - 4 kg/cm^2

2. ผลกระทบที่เกิดจากการดูดความร้อนทิ้งต่อตัวแปรต่าง ๆ

เงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบ

ในการทดสอบสมรรถนะ อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมสำหรับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียวนี้ได้กำหนดเงื่อนไข และขอบเขตในการทดลองไว้ ตามตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 เงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบ

ตัวแปร	ขอบเขต
- อุณหภูมิของความร้อนทิ้ง	180 - 300°C
- อุณหภูมิของน้ำป้อน	30 - 40°C
- ความเร็วดูดความร้อนทิ้ง	5 - 6.5 m/s
- ความดันการใช้งานไอน้ำ	1 - 4 kg/cm^2
- อัตราการผลิตไอน้ำ	200 kg/h

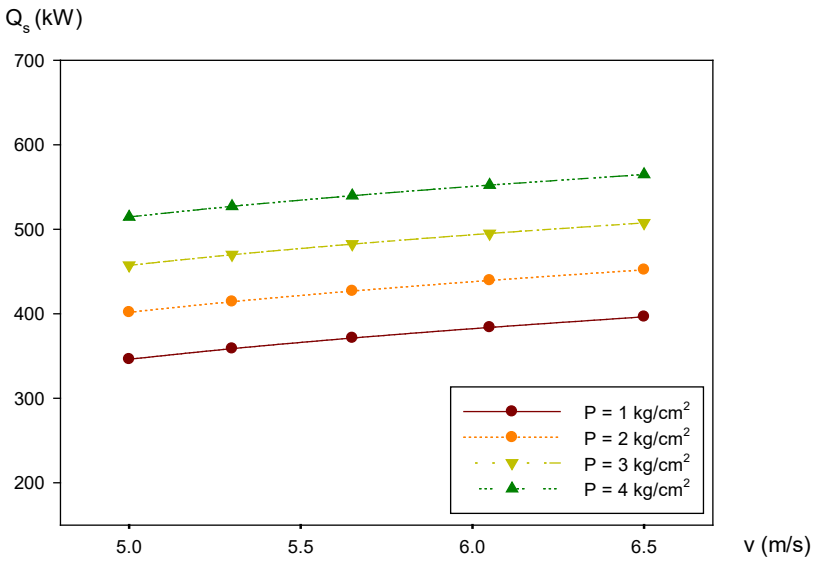
จากตารางที่ 4.2 เป็นเงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบเพื่อนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ตัวแปรส่วนเปลือก ส่วนท่อ สมรรถนะ และความคุ้มค่าพลังงานซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ หม้อน้ำทำงานมีความดันใช้งานไอน้ำระหว่าง 1-4 kg/cm^2 ซึ่งจะมีอุณหภูมิปล่อยออกจากปล่องไอเสียหม้อน้ำประมาณ 180 -300°C และปรับความถี่ของรอบอินเวอร์เตอร์เพื่อการควบคุมปริมาณการใช้งานกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ที่เป็นต้นกำลังของพัดลมดูดก๊าซร้อนทิ้งที่ความถี่ 3-7 Hz ที่ความเร็ว 5-6.5 m/s ส่วนความเร็วการไหลของน้ำป้อน จะขึ้นอยู่กับขนาดอัตราการผลิตไอน้ำที่ 200 kg/h โดยมีความเร็วของน้ำป้อนเฉลี่ย 0.000015 m/s อุณหภูมิที่ 30-40°C

การทดสอบของงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบตามเงื่อนไขและขอบเขตตามตารางที่ 4.2 ข้างต้น เพราะข้อจำกัดของอุปกรณ์และเครื่องมือที่สามารถจัดหาได้อีกทั้งเงื่อนไขและขอบเขตดังกล่าวมีค่าต่าง ๆ ที่ควบคุมตัวแปรของหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว อัตราการผลิตไอน้ำ 200 kg/h ทั่วๆ ไปได้พอสมควรและเพื่อต้องการทดสอบตัวแปรที่มีผลต่อสมรรถนะของอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบร้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมเพื่อนำผลการวิเคราะห์มาหาความเหมาะสม ในการออกแบบและสร้างและนำไปใช้ในโอกาสต่อไป สำหรับการอธิบายผลการทดสอบ เพื่อให้มีความชัดเจนมากขึ้น จะมีการอ้างอิงตัวแปรต่าง ๆ จากผลงานวิจัย และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ดังกล่าวมาแล้วข้างต้น

2.1 อัตราการถ่ายโอนความร้อนของอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม (ส่วนเปลือก)

การประเมินสมรรถนะของอุปกรณ์อุ่นน้ำแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม (ส่วนเปลือก) ประเมินได้จากค่าอัตราการถ่ายโอน ความร้อนซึ่งมีตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อสมรรถนะ คือ ความเร็วดูดความร้อนทิ้ง ดังนี้

อิทธิพลของความเร็วดูดความร้อนทิ้ง จากกราฟที่ 4.1 เป็นการแสดงอิทธิพลของความเร็วภายในอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม หลังจากนั้นความร้อนทิ้งจะถูกดูดออกด้วยความเร็วที่ความถี่ต่างๆ ต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อน, $\dot{Q}_{s,act}$ ที่อยู่ภายในส่วนเปลือก



กราฟที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายโอนความร้อน (ส่วนเปลือก) ต่อความเร็วดูดความร้อนทิ้ง

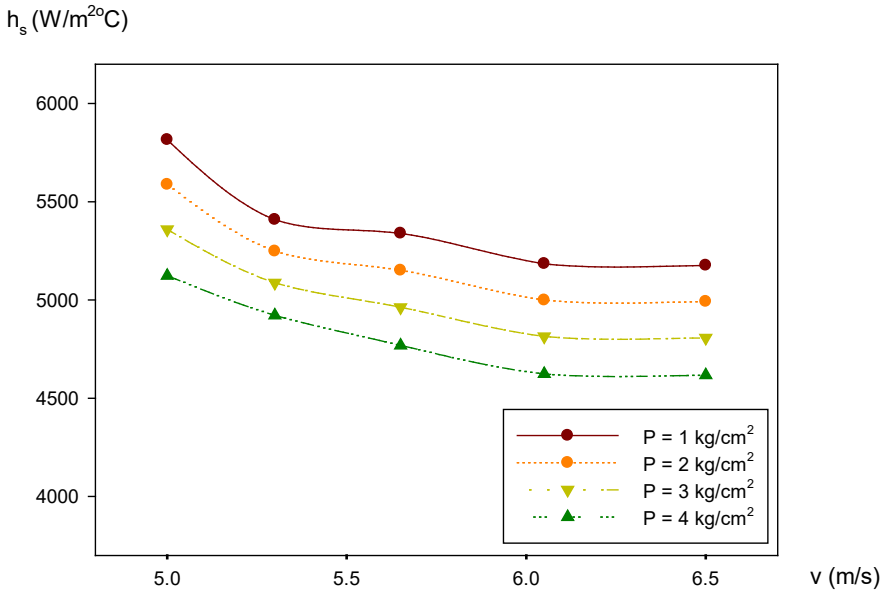
จากกราฟที่ 4.1 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายโอนความร้อนกับการดูดความร้อนทิ้งที่ออกจากอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม ที่ความดันไอน้ำ 1-4 kg/cm^2 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ ที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้ง 5.00 m/s มีอัตราการถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ย 429.90 kW ที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้ง 5.30 m/s มีอัตราการถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ย 442.46 kW ที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้ง 5.65 m/s มีอัตราการถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ย 455.02 kW ที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้ง 6.05 m/s มีอัตราการถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ย 467.57 kW ที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้ง 6.50 m/s มีอัตราการถ่ายโอนความร้อน 480.13 kW ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวแสดงว่า ถ้าปรับความเร็วดูดความร้อนทิ้งเพิ่มขึ้นเป็นผลให้ปริมาณความร้อนเพิ่มซึ่งอัตราการถ่ายโอนความร้อนจะสูงขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั้งมีความเร็วเกิน 6.50 m/s จะมีปริมาณความร้อนลดลง เพราะว่าในช่วงเวลาดังกล่าวน้ำป้อนถูกส่งเขามายังอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม (น้ำมีอุณหภูมิต่ำ) เป็นผลให้ปริมาณความร้อนลดลง และหลังจากนั้นปริมาณความร้อนจะเพิ่มขึ้น ตามสมการ

$$\dot{Q}_{s,act} = C_s Cp_s(T_{s,i} - T_{s,o})$$

2.2 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน(ส่วนเปลือก)

อิทธิพลความเร็วดูดความร้อนทิ้ง จากกราฟที่ 4.2 เป็นการแสดงถึงอิทธิพลของความเร็วภายในเปลือกของอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม ต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่พื้นผิวท่อภายนอก (h_o)



กราฟที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน (ส่วนเปลือก) ต่อความเร็วดูดความร้อนทิ้ง

จากกราฟที่ 4.2 เป็นการแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนกับความเร็วดูดความร้อนทิ้งที่ความดันไอน้ำ 1-4 kg/cm^2 พบว่า ที่ความเร็วในการดูดความร้อนทิ้ง 5.0 m/s มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่พื้นผิวท่อภายนอกเฉลี่ย 5,470.96 W/m^2°C ที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้ง 5.3 m/s มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนให้แก่พื้นผิวท่อภายนอกเฉลี่ย 5,166.03 W/m^2°C ที่ความเร็วดูดความร้อนทั้ง 5.65 m/s มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนให้แก่

พื้นผิวท่อภายนอกเฉลี่ย 5,054.98 $W/m^2{}^\circ C$ ที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้ง 6.05 m/s มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนให้แก่พื้นผิวท่อภายนอกเฉลี่ย 4,904.96 $W/m^2{}^\circ C$ ที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้ง 6.50 m/s มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนให้แก่พื้นผิวท่อภายนอกเฉลี่ย 4,897.70 $W/m^2{}^\circ C$ ตามลำดับ

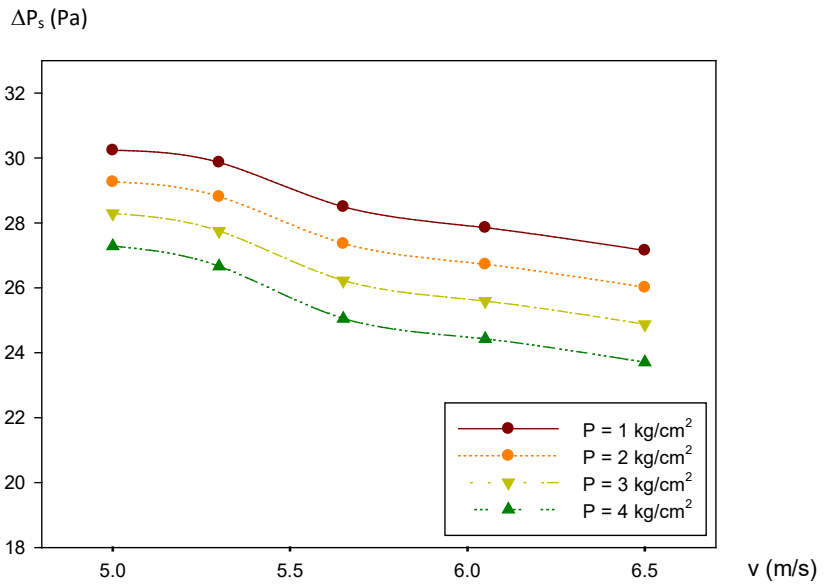
ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวแสดงว่าในการปรับความเร็วดูดความร้อนทิ้งเพิ่มขึ้นส่งผลให้สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนลดลงดังสมการ

$$h_s = \frac{Nu_s k_s}{D_o}$$

หลังจากนั้นเมื่อความเร็วเพิ่มมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนลดลง เพราะว่าในช่วงเวลาดังกล่าวมีปริมาณน้ำป้อนส่งเข้ามาในอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมเพิ่มขึ้น ซึ่งน้ำมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิในอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อฯ ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนลดลงตามลำดับ

2.3 ความดันลดในเปลือก

อิทธิพลของความเร็วดูดความร้อนทิ้งจากกราฟที่ 4.3 เป็นการแสดงถึงอิทธิพลของความเร็วดูดความร้อนทิ้งภายในเปลือกของอุปกรณ์อุ่นน้ำร้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมต่อความดันลด (Pressure drop) ดังนี้



กราฟที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดต่อความเร็วดูดความร้อนทิ้ง

จากกราฟที่ 4.3 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับความเร็วดูดความร้อนทิ้งที่ออกจากอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมที่ความดันไอน้ำ 1 - 4 kg/cm^2 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์พบว่า ที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้งที่ 5.0 m/s มีความดันลดเฉลี่ย 28.77 Pa ที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้ง 5.3 m/s มีความดันลดเฉลี่ย 28.27 Pa ที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้ง 5.65 m/s มีความดันลดเฉลี่ย 26.78 Pa ที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้ง 6.05 m/s มีความดันลดเฉลี่ย 26.51 Pa และที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้ง 6.50 m/s มีค่าความดันลด 25.44 Pa จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวแสดงว่าในการปรับความเร็วดูดความร้อนทิ้งเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้เกิดความดันลด ๆ ลงตามสมการ

$$\Delta P_s = \frac{2 f_s G_{max}^2 N_L}{\rho_s} \left(\frac{\mu_w}{\mu_s} \right)^{0.14}$$

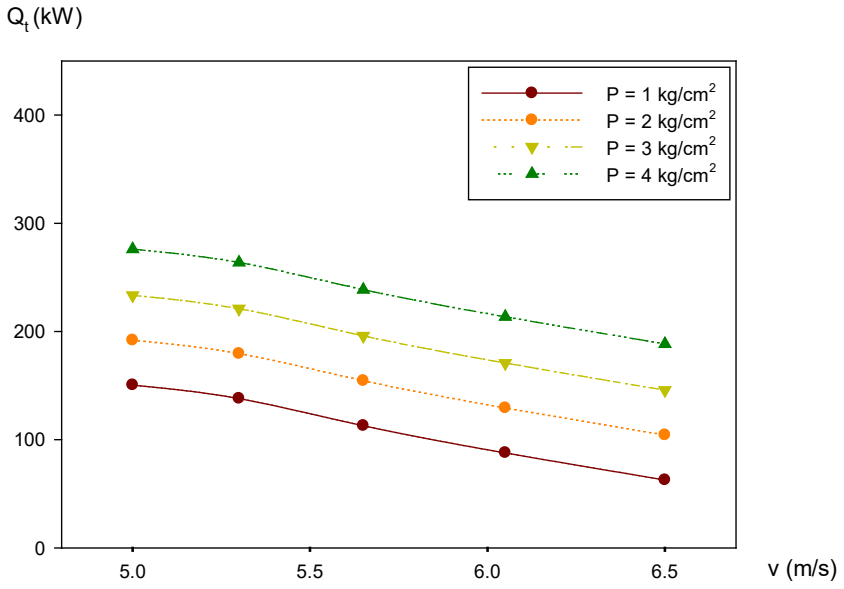
จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าเมื่อปรับความเร็วดูดความร้อนทิ้งเพิ่มขึ้นพบว่าความดันลด ๆ ลง เพราะว่าปริมาณความร้อนของน้ำป้อนมีอุณหภูมิสูงขึ้นจาก 30-40 $^\circ$C ตามลำดับ

สรุปการวิเคราะห์ผลอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม (ส่วนเปลือก) ที่อัตราการไหลของความร้อนทิ้ง 0.205 kg/s มีอัตราการผลิตไอน้ำของหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียวที่ 200 kg/h ที่ความดันการใช้งานไอน้ำที่ 1 - 4 kg/cm^2 ความร้อนทิ้งที่ถูกดูดเข้าไปในอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมที่ความเร็ว 5.00 - 5.30 m/s ให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนสูงสุดเฉลี่ย 429.90-480.13 kW มีความดันลดเฉลี่ย 28.77 – 25.44 Pa และมีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ย 5470.96 - 5166.03 W/m$^2{}^\circ$C ซึ่งตำแหน่งดังกล่าวเป็นช่วงที่นำพลังงานของความร้อนทิ้งกลับมาใช้อุ่นน้ำป้อนและมีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนสูงสุด

2.4 อัตราการถ่ายโอนความร้อนของอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม (ส่วนท่อ)

การประเมินสมรรถนะอุปกรณ์อุ่นป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม (ส่วนท่อ) ประเมินได้จากค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนซึ่งมีตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อสมรรถนะ คือความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่จ่าย ให้แก่ มอเตอร์ ที่เป็นต้นกำลังขับเครื่องพัดลมในการดูดความร้อนทิ้งออกจากอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อน ดังนี้

อิทธิพลของความเร็วดูดความร้อนทิ้งขึ้นอยู่กับการปรับความถี่ของกระแสไฟฟ้าซึ่งปริมาณความร้อนทิ้งที่อยู่ภายในส่วนเปลือกจะถ่ายโอนความร้อนให้แก่ พื้นผิวท่อด้านนอกเป็นผลให้น้ำที่อยู่ในท่อเกิดความร้อน ทั้งนี้อัตราการถ่ายโอนความร้อนจะขึ้นอยู่กับความเร็วการดูดความร้อนทิ้งดังกราฟที่ 4.4



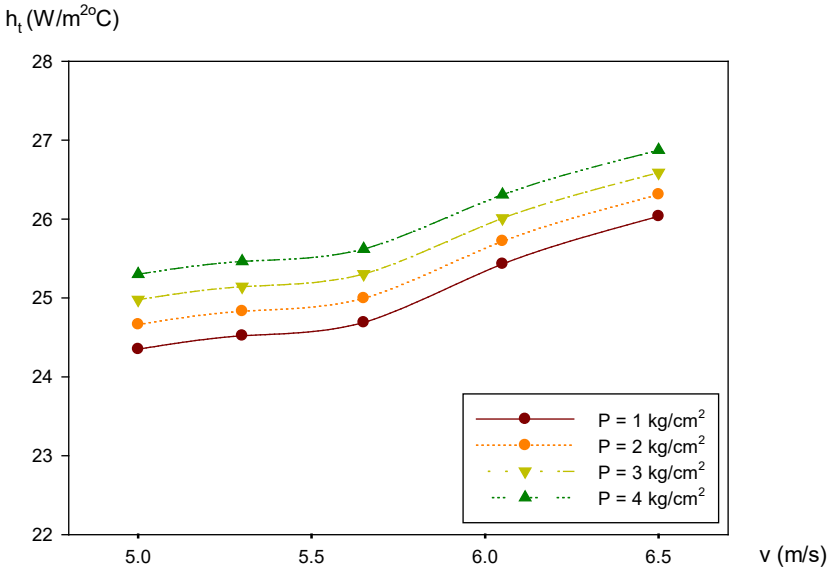
กราฟที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายโอนความร้อนต่อความเร็วการดูดความร้อนทิ้ง

จากกราฟที่ 4.4 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายโอนความร้อนกับความเร็วการดูดความร้อนทิ้งที่ออกจากอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลาง เป็นสี่เหลี่ยม (ส่วนท่อ) ที่ความดันไอน้ำ 1-4 kg/cm^2 ผลจากการวิเคราะห์พบว่าที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้ง 5.0 m/s มีอัตราการถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ย 212.85 kW ที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้ง 5.3 m/s มีอัตรา การถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ย 200.47 kW ที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้ง 5.65 m/s มีอัตราการถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ย 175.37 kW ที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้ง 6.05 m/s มีอัตราการถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ย 150.28 kW ที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้ง 6.5 m/s มีอัตราการถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ย 125.18 kW ตามลำดับ ซึ่งเป็นไปตามสมการ

$$\dot{Q}_t = C_t Cp_t(T_{t,i} - T_{t,o})$$

2.5 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนภายในท่อ

อิทธิพลของความเร็วดูดความร้อนทิ้ง จากกราฟที่ 4.5 เป็นการแสดงถึงอิทธิพลของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนภายในท่อ (h_i) ต่อความเร็วการดูดความร้อนทิ้ง



กราฟที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนภายในท่อต่อความเร็วดูดความร้อนทิ้ง

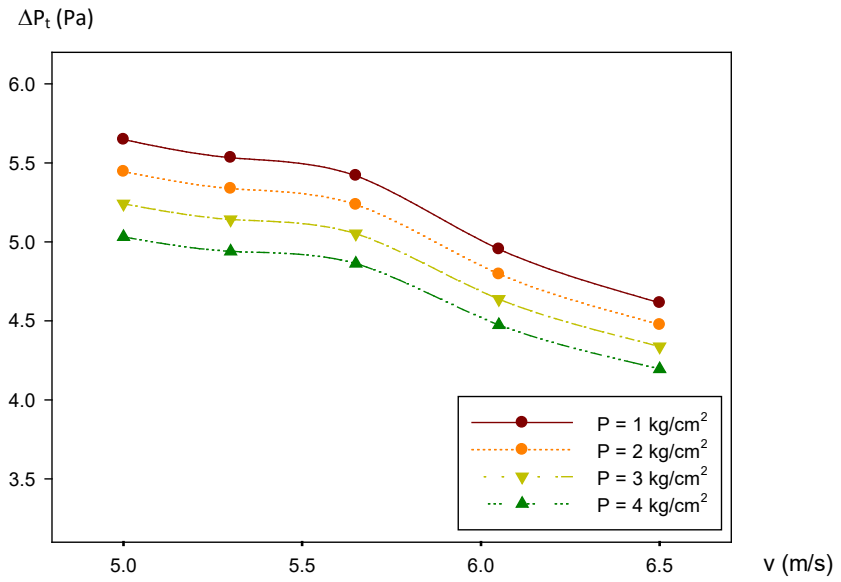
จากกราฟที่ 4.5 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน (h_i) ภายในท่อกับความเร็วดูดความร้อนทิ้ง ที่ออกจากเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม (ส่วนท่อ) ที่ความดันไอน้ำ 1-4 kg/cm^2 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์พบว่าที่ความเร็วรอบ 5.0 m/s มีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ย 24.82 W/m^2°C ที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้งที่ 5.3 เมตรต่อวินาทีมีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ย 24.99 W/m^2°C ที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้งที่ 5.65 m/s มีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ย 25.15 W/m^2°C ที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้งที่ 6.05 m/s มีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ย 25.87 W/m^2°C ที่ ความเร็วดูดความร้อนทิ้งที่ 6.5 m/s มีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ย 256.45 W/m^2°C ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์ พบว่าที่ความเร็ว 5.0 m/s มีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนสูงสุด 23.99 W/m^2°C เมื่อมีความเร็วดูดความร้อนทิ้งเพิ่มขึ้น สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนจะลดเพราะว่าในช่วงเวลาดังกล่าวน้ำป้อนที่มีอุณหภูมิต่ำถูกส่งเข้ามาในอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนเพิ่มขึ้นเป็นผลให้สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนลดลงตามสมการ

$$h_i = \frac{kNu_t}{D_i}$$

2.6 ความดันลดในท่อ

อิทธิพลของความเร็วดูดความร้อนทิ้ง จากกราฟที่ 4.6 เป็นการแสดงถึงอิทธิพลของความเร็วดูดความร้อนทิ้งของอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม (ส่วนท่อ) ต่อความดันลด (Pressure drop) ดังนี้



กราฟที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดต่อความเร็วดูดความร้อนทิ้ง

จากกราฟที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับความเร็วดูดความร้อนทิ้งที่ออกจากอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม (ส่วนท่อ) ที่ความดันไอน้ำ 1-4 kg/cm^2 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์พบว่าที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้งที่ 5.0 m/s มีความดันลดภายในท่อเฉลี่ย 5.34 Pa ที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้งที่ 5.3 m/s มีความดันลดภายในท่อเฉลี่ย 5.24 Pa ที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้งที่ 5.65 m/s มีความดันลดภายในท่อเฉลี่ย 5.14 Pa ที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้งที่ 6.05 m/s มีความดันลดภายในท่อเฉลี่ย 4.71 Pa ที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้งที่ 6.5 m/s มีความดันลดภายในท่อเฉลี่ย 4.41 Pa ตามลำดับ

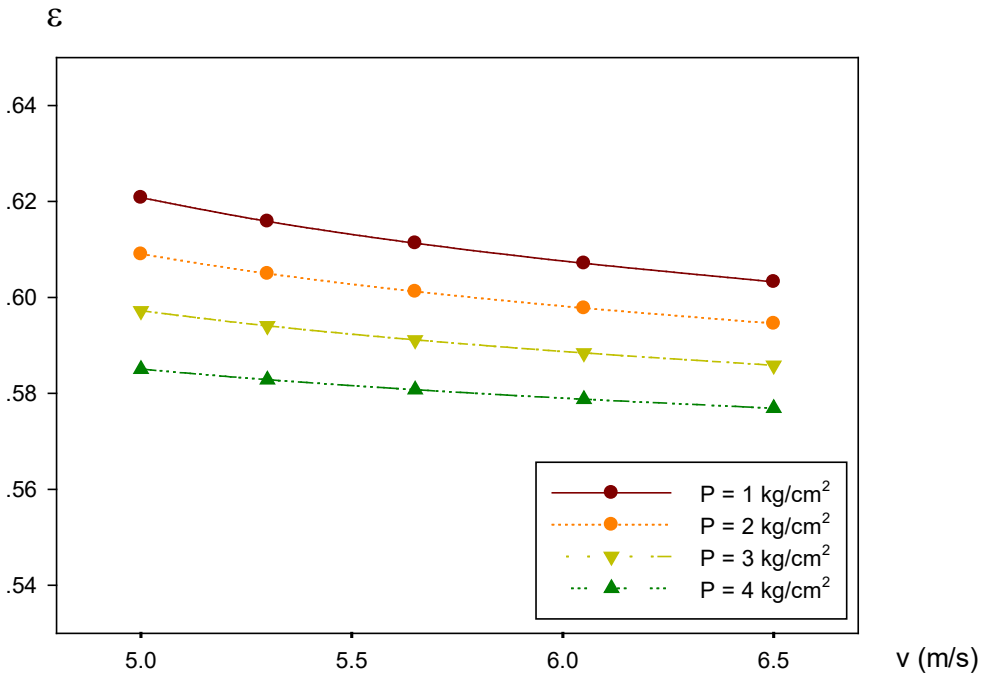
ผลการวิเคราะห์พบว่าที่ความเร็ว 5.0 m/s เป็นช่วงที่มีค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อน 212.85 kW มีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน 24.82 W/m^2°C มีความดันลดในท่อสูงสุด 5.34 Pa เป็นไปตามสมการ

$$\Delta P_t = \frac{f_t N_L L G_t^2}{2000 D_i S_t \phi}$$

ซึ่งในช่วงเวลาดังกล่าวเป็นช่วงที่นำความร้อนของความร้อนทิ้งกลับมาใช้อุ่นน้ำป้อนในท่อได้มากที่สุด

2.7 ประสิทธิผลอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม

การแสดงและการทำนายสมรรถนะของอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมนอกจากจะอาศัยการถ่ายโอนความร้อนในส่วนเปลือกและส่วนท่อแล้วยังสามารถแสดงได้ในรูปของค่าประสิทธิผล (Effectiveness, ε) ต่อความเร็วดูดความร้อนทิ้งที่ออกจากอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมซึ่งเป็นสัดส่วนระหว่างความร้อนทิ้งที่อยู่ในเปลือกกับน้ำที่อยู่ภายในท่อ



กราฟที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิผลอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อต่อความเร็วดูดความร้อนทิ้ง

จากกราฟที่ 4.7 การแสดงอิทธิพลของความเร็วดูดความร้อนทิ้งออกจากอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม ต่อประสิทธิผลของอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมของสารที่ใช้ความร้อน (อุณหภูมิสูง) กับของเหลว (อุณหภูมิต่ำ) ที่ความดันไอน้ำ 1-4 kg/cm^2 จากการวิเคราะห์พบว่า ที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้ง 5.0 m/s มีประสิทธิผลเฉลี่ย 0.60 ที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้ง 5.3 m/s มีประสิทธิผลเฉลี่ย 0.59

ที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้ง 5.65 m/s มีประสิทธิผลเฉลี่ย 0.58 ที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้ง 6.05 m/s มีประสิทธิผลเฉลี่ย 0.587 ที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้ง 6.5 m/s มีประสิทธิผลเฉลี่ย 0.56 ตามลำดับ

ผลจากการวิเคราะห์พบว่าประสิทธิผลอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้งที่ 5.0 m/s มีประสิทธิผล 0.60 ในขณะที่อุณหภูมิน้ำป้อนอยู่ระหว่าง 30 °C และถ้าอุณหภูมิของน้ำป้อนสูง (40 - 45°C) เพิ่มขึ้นอีก ความเร็วดูดความร้อนทิ้งเพิ่มขึ้น (5.30-6.50 m/s) จะมีผลต่อประสิทธิผลอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมเริ่มจะลดลงเพราะว่าน้ำป้อนมีอุณหภูมิต่ำถูกปั๊มเข้ามาในอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมเพิ่มขึ้น ตามลำดับ

สรุปจากผลการวิเคราะห์กราฟที่ 4.7 ประสิทธิผลอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมกับความเร็วดูดความร้อนทิ้ง พบว่าประสิทธิผลอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมกับความเร็วดูดความร้อนทิ้งที่เหมาะสมกับอัตราการผลิตไอน้ำที่ 200 kg/h ซึ่งมีประสิทธิผลเฉลี่ย 0.60 ซึ่งประสิทธิผลอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมและความเร็วดูดความร้อนทิ้งดังกล่าวนั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของความร้อนทิ้งที่ออกจากปล่องไอเสียหม้อน้ำ ถ้ามีอุณหภูมิความร้อนทิ้งสูง ประสิทธิผลจะสูงเพิ่มขึ้น ในขณะเดียวกันความเร็วการดูดความร้อนทิ้งต้องมีความเร็วที่สอดคล้องกับความเร็วที่ไม่ติดตั้งอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมซึ่งมีความเร็วระหว่าง 5-6.5 m/s ที่อุณหภูมิความร้อนทิ้งเฉลี่ย 240°C และอุณหภูมิของน้ำป้อนเข้าอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมอยู่ระหว่าง 30 - 45 °C ซึ่งการวิเคราะห์เป็นไปตามสมการ

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_{act}}{\dot{Q}_{max}}$$

ผลจากการวิเคราะห์ดังกล่าว มีความสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ การออกแบบเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อ (อุทัย ผ่องรัศมี, 2556) พบว่า ที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้ง 7.20-7.65 m/s ส่วนเปลือกและท่อมีอัตราการถ่ายโอนความร้อน 90 และ 65 kW อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อมีสมรรถนะ 0.40 ซึ่งเมื่อใส่แผ่นตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมจะทำให้ของเหลวเกิดการหมุนควงเพิ่มเป็นผลให้อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมมีสมรรถนะเพิ่มขึ้นกว่าแบบไม่ใส่แผ่นบิด

3. การประหยัดพลังงานและความเหมาะสมการลงทุน

จากข้อมูลศูนย์วิจัยพลังงาน หน่วยจัดอบรมเชิงปฏิบัติ หลักสูตรผู้ควบคุมประจำหม้อน้ำ หมายเลขทะเบียน 111-100-003 กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี ได้ข้อมูลจากการทดสอบหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียวที่อัตราการผลิตไอน้ำ 200 kg/h นำข้อมูลมาวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ (ข้อมูลวันที่ 10-15 มิถุนายน 2556) ได้ดังนี้

- หม้อไอน้ำผลิตในประเทศไทย (บริษัท ไทยสตีมเซอร์วิส แอนด์ ซับพลาย จำกัด)มีขนาดอัตราการผลิตไอน้ำ 500 kg/h ในการทดสอบใช้อัตราการผลิตไอน้ำที่ 200 kg/h
- หม้อน้ำทำงานครั้งล่ะ 6 ชั่วโมงต่อ 1 วัน (ทำงาน 300 วันต่อปี)
- ใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง (ปตท.) มีค่าความร้อนสูง เท่ากับ 36.420 MJ/liters
- อุณหภูมิความร้อนทิ้งเฉลี่ย 233.55°C
- อุณหภูมิบรรยากาศ(ห้องทดสอบ) 34°C
- อุณหภูมิน้ำป้อน 30°C
- ความเร็วดูดความร้อนทิ้ง 5.0 m/s (3 Hz)
- ประสิทธิภาพหม้อน้ำ 85%
- อัตราน้ำป้อน 200 kg/h (ความดันการใช้ไอน้ำ 1-4 kg/cm^2)

การคำนวณเพื่อเปรียบเทียบหาค่าใช้จ่ายในการสร้างอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมกับค่าใช้จ่ายในการซื้อเชื้อเพลิง ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

จากการทดสอบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมที่จัดสร้างขึ้นและนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้ง 5.0 m/s น้ำป้อนมีอุณหภูมิเฉลี่ย 30°C อุณหภูมิน้ำที่ได้รับการถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ย 60°C ต่อความร้อนจำเพาะของน้ำ 4.186 kJ/kg°C อัตราการผลิตไอน้ำที่ 200 kg/h และปริมาณความร้อนของน้ำมันดีเซลเท่ากับ 36.420 MJ/liters ถ้าคิดโดยนำอัตราการถ่ายโอนความร้อนจากอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนมาใช้ 50% ของอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมได้ว่า

$$Q = 0.50(17.34\ \text{kW})$$

$$Q = 8.67\ \text{kW}$$

จากประสิทธิภาพหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียวขนาดอัตราการผลิตไอน้ำ 200 kg/h วัดประสิทธิภาพการเผาไหม้ในหม้อน้ำได้ 0.80% ดังนั้นปริมาณความร้อนของอุปกรณ์อุ่นน้ำ

ป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมทำได้โดยคิดเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซลที่ได้คือ

$$\frac{Q}{HHV \cdot \eta} = \frac{8.67}{36{,}420 \text{ kJ/l}(0.80)}$$

$$= 2.9757 \times 10^{-4} \text{ L/s}$$

$$= 1.07 \text{ L/h}$$

เมื่อพิจารณาในระยะเวลา 1 ปี จะได้ปริมาณน้ำมันดีเซลประหยัดได้ดังนี้

$1.07 \text{ l/h} \times 6 \text{ W/d} \times 300 \text{ d/y} = 1{,}928.25 \text{ l/y}$

คิดเป็นน้ำมันดีเซลได้ 1,928.25 l/y

คิดเป็นน้ำมันดีเซล 30.15 B/l

ฉะนั้นคิดเป็นเงินในการประหยัดน้ำมันดีเซลที่อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมทำได้คือ

$1{,}928.25 \text{ l/y} \times 30.15 \text{ B/l} = 58{,}136.85 \text{ B/y}$

ข้อมูลจากการสร้างอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม

ต้นทุนการสร้างรวมค่าบำรุงรักษาเท่ากับ 150,000 บาท โดยแยกรายละเอียดดังนี้

- ท่อเหล็ก *STB* 35.8 จำนวน 10 เส้น รวมจำนวนเงิน 18,500 บาท
- ท่อเหล็กทำปล่องไอเสียหม้อน้ำ รวมเงินจำนวนเงิน 8,000 บาท
- แผ่นเหล็กทำส่วนเปลือกรวมเป็นจำนวนเงิน 15,000 บาท
- แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมรวมเป็นจำนวนเงิน 15,000 บาท
- ค่าแรงสร้างอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อน รวมเป็นจำนวนเงิน 40,000 บาท
- ค่าออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อขด รวมเป็นจำนวนเงิน 25,000 บาท
- ค่าอุปกรณ์เกจวัดต่าง ๆ รวมเป็นจำนวนเงิน 28,500 บาท
- คิดอายุการใช้งานอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อน 15 ปี
- คิดอัตราดอกเบี้ยทบต้น เท่ากับ 10% ต่อปี

หมายเหตุ ไม่คิดผลกระทบอันเนื่องมาจากอัตราเงินเฟ้อ สำหรับอัตราดอกเบี้ยคิดตามอัตราของกลุ่มอุตสาหกรรมและไม่คิดราคาอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อแถวเรียง หลังจากหมดอายุการใช้งานแล้ว

จากการหามูลค่าในอนาคตหาได้จาก $P(1+i)^n$

เมื่อ P = มูลค่าปัจจุบันที่มีการใช้จ่ายครั้งคือ 150,000 บาท

i = อัตราดอกเบี้ยทบต้น = 0.10 (10%)

n = จำนวนปี 15 ปี

ดังนั้นมูลค่าในอนาคตของอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อฯ คือ

= 150,000 บาท $(1 + 0.10)^{15}$

= 627,450 บาท

จากการเปรียบเทียบเป็นค่าน้ำมันดีเซลจากอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมประหยัดได้คือ 58,136.85 B/y

จากมูลค่าในอนาคตคิดได้จาก $\frac{A}{i}\left[(1+i)^n - 1\right]$

เมื่อ A = มูลค่าปัจจุบันของเงินรายปีเท่ากับ 58,136.85 บาท

i = อัตราดอกเบี้ยทบต้น = 0.10

n = จำนวนปี 15 ปี

ดังนั้นมูลค่าในอนาคตสำหรับอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อฯ

$$= \frac{58,136.85}{0.10}\left[(1+0.10^{15}\text{-}1)\right]$$

= 2,817,311.72 บาท

ดังนั้นอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมที่สร้างจะสามารถประหยัดพลังงานได้

= 2,817,311.72 - 627,450

= 2,189,861.71 บาทต่อระยะเวลา 15 ปี

จากการทดสอบจะพบว่า ถ้าใช้อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมร่วมกับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียวขนาดอัตราการผลิตไอน้ำ 200 kg/h จะสามารถประหยัดพลังงานได้ 3,704,117.72 บาทต่อช่วงระยะเวลา 15 ปี

อัตราผลตอบแทนภายใน (*IRR*, Internal Rate of Return) ในที่นี้จะหมายถึง อัตราผลตอบแทนคิดเป็นดอกเบี้ยที่ให้มูลค่าอนาคตของอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมเท่ากับมูลค่าอนาคตของค่าน้ำมันดีเซลที่สามารถประหยัดได้ ถ้ามีผลตอบแทนภายในสูงก็แสดงว่าสมควรแก่การลงทุน

จากเงื่อนไขข้างต้นจะได้สมการ

$$P(1+i)^n = \frac{A}{i}\left[(1+i)^n - 1\right]$$

$$150,000\ \text{Baht}(1+i)^{15} = \frac{58,136.85}{i}\left[(1+i)^n - 1\right]$$

i = 29.49 %

จากการหาค่าอัตราผลตอบแทนภายใน(*IRR*) อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมมีผลตอบแทนภายใน 29.49% นำค่าดังกล่าวมาเปรียบเทียบกับอัตราดอกเบี้ยของธนาคาร เพื่อกลุ่มอุตสาหกรรม 10% จะเห็นได้ว่า ผลตอบแทนภายในดังกล่าวข้างต้นมีค่ามากกว่าจึงน่าจะลงทุนการผลิตหรือสร้างอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมใช้ร่วมกับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว เพราะจะทำให้เกิดการประหยัดพลังงานและเป็นการลดอุณหภูมิความร้อนทิ้งที่ปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมลดลง ดังนั้นจึงเห็นสมควรแก่การลงทุน

สรุปสำหรับการวิเคราะห์ช่วงของเวลาของเงินลงทุนกลับคืนมาหมด ก็คือจำนวนของปีที่ผ่านไประหว่างที่ลงทุนและเวลาที่ได้รับเงินจาการลงทุน เท่ากับจำนวนเงินลงทุนที่ไม่คิดดอกเบี้ย จะเป็นการวัดความเร็วของเวลาในการลงทุนที่ได้ทุนกลับคืนมา ในที่นี้สามารถหาค่าได้ดังนี้ จากการสร้างอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมต้นทุนการสร้างรวมค่าบำรุงรักษา เท่ากับ 150,000 บาท และจากที่อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนนี้สามารถใช้งานคิดเป็นค่าการประหยัดได้คือ 58,136.85 บาทต่อปี ดังนั้นช่วงเวลาของเงินลงทุนกลับคืนมาทั้งหมดเท่ากับ 150,000 บาทต่อ 58,136.85 บาทต่อปี เท่ากับ 2.6 ปี (30 เดือน) ในที่นี้คิดการทำงานเฉลี่ยของเครื่อง 6 ชั่วโมงต่อวัน และ 1 ปี ทำงาน 300 วัน แต่ถ้าคิดเพิ่มชั่วโมงและวันทำงานช่วงเวลาของเงินลงทุนกลับคืนจะลดลงมาอีก ซึ่งในการวิเคราะห์ความคุ้มค่าการลงทุนและการประหยัดพลังงานในครั้งนี้ใช้ข้อมูลจริงจากอัตราการผลิตไอน้ำที่ 200 kg/h เป็นหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียวที่ความดันการใช้งานไอน้ำ 1 - 4 kg/cm^2 ที่ความเร็วดูดความร้อนทิ้ง 5.0 m/s เท่านั้น

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

1. สรุปผลการทดลอง

ได้ทำการออกแบบและสร้างอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นสำหรับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว มีขนาดอัตราการผลิตไอน้ำ 500 kg/h โดยการแลกเปลี่ยนความร้อนจากความร้อนทิ้งของหม้อน้ำให้แก่น้ำป้อนก่อนเข้าสู่หม้อน้ำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น โดยสามารถอธิบายผลการทดสอบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมได้ผลสรุปดังนี้

1.1 อิทธิพลของความเร็วดูดความร้อนทิ้งที่ 5.00 m/s พบว่า มีอุณหภูมิความร้อนทิ้ง 245.0 °C อุณหภูมิน้ำป้อน 30 °C และมวลของน้ำ 200 kg/h มีผลทำให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนสูงสุดตามความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\dot{Q}_{max} = \dot{m}Cp(T_{s,i} - T_{t,i})$$

1.2 อิทธิพลของความเร็วดูดความร้อนทิ้งที่ 5.00 m/s (3 Hz) พบว่า มีอุณหภูมิความร้อนทิ้งเข้าและออกจากอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อน 245.0°C และ 125.0°C และมีอุณหภูมิน้ำป้อนเข้าและออก 30°C และ 60°C มีผลทำให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนสูงสุดตามความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\dot{Q}_{act} = (\dot{m}Cp(T_{s,i} - T_{s,o})) + (\dot{m}Cp(T_{t,o} - T_{t,i}))$$

1.3 อิทธิพลของความเร็วดูดความร้อนทิ้งที่ 5.00 m/s พบว่า อัตราการถ่ายโอนความร้อนในอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนสูงสุด มีประสิทธิผลสูงสุดซึ่งเหมาะสมกับอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมสำหรับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียวขนาดอัตราการผลิตไอน้ำ 200 kg/h ตามความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_{act}}{\dot{Q}_{max}}$$

1.4 การวิเคราะห์เปรียบเทียบเชิงเศรษฐศาสตร์โดยใช้ข้อมูลอ้างอิงจากการทดสอบจริงที่ศูนย์วิจัยพลังงาน สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี หน่วยจัดอบรมหลักสูตร ผู้ควบคุมประจำหม้อน้ำหมายเลขทะเบียน 111 - 100 - 003 กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม นำมาเปรียบเทียบได้ผลสรุปว่า อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมที่ออกแบบและสร้างสำหรับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียวเป็นการออกแบบตามอัตราการผลิตไอน้ำของหม้อน้ำจริงที่ 500 kg/h แต่ใน

งานวิจัยนี้ได้ทำงานศึกษาทดสอบที่อัตราการผลิตไอน้ำที่ 200 kg/h ที่ความดันไอน้ำใช้งาน 1 - 4 kg/cm^2 โดยนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ความคุ้มค่าการประหยัดพลังงาน สามารถประหยัดพลังงานได้ 8.67 k/W (อุณหภูมิน้ำที่เพิ่มขึ้น 50%) เมื่อเทียบเป็นการประหยัดเชื้อเพลิงดีเซลที่ใช้สามารถประหยัดได้ 1,928.25 ลิตรต่อปี ถ้าราคาน้ำมันลิตรละ 30.15 บาทต่อลิตร จะลดค่าใช้จ่ายน้ำมันดีเซลได้ 58,136.85 บาทต่อปี

สรุปผลการวิจัยการเพิ่มสมรรถนะอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม พบว่า อุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม มีสมรรถนะร้อยละ 0.62 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดไม่ใส่แผ่นบิด พบว่า มีสมรรถนะร้อยละ 0.40 และอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อขด พบว่า มีสมรรถนะร้อยละ 0.36 ซึ่งในการออกแบบสร้างและเงื่อนไขการทดลองใช้เงื่อนไขเดียวกัน จากผลดังกล่าวการเพิ่มสมรรถนะอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมมีความเหมาะสมกับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียวมากที่สุด

2. ข้อเสนอแนะ

2.1 ในการออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมควรเพิ่มอัตราความเร็วของการไหลของน้ำ ซึ่งจะเป็นผลต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนเพิ่มขึ้น

2.2 ถ้าสามารถเพิ่มพื้นที่การรับความร้อน ส่วนท่อ (Tube) อาจจัดทำโดยการใส่ครีบลักษณ์อื่น ๆ ซึ่งจะทำให้อัตราการถ่ายโอนความร้อน และค่าประสิทธิผลเพิ่มขึ้น

2.3 ควรหาวิธีการที่เพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนของความร้อนทิ้ง ซึ่งอาจจะใช้วิธีใช้สารเคลือบท่อซึ่งมีคุณสมบัติที่จะต้องวิจัยต่อไป

2.4 ต้นทุนการผลิต ถ้าสามารถลดได้ จะทำให้ค่าประหยัดเพิ่มขึ้นและมีอัตราผลตอบแทนภายใน (*IRR*) เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งจะทำให้การลงทุนนั้นคุ้มค่าสมควรแก่การลงทุน

2.5 ควรมีการกำหนดอัตราของน้ำป้อน และสามารถที่จะปรับอัตราความเร็วของความร้อนได้ เมื่ออัตราการถ่ายโอนความร้อนลักษณะการไหลของน้ำที่มีความเหมาะสม จะทำให้ได้ค่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนที่สูงขึ้น ซึ่งเป็นผลให้อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return, *IRR*) หรือช่วงเวลาของเงินทุนกลับคืน (Payback Period) ดีขึ้น

บรรณานุกรม

เกษม เสรีภาพสกล. (2547). **ระบบการนำความร้อนกลับมาใช้ของน้ำทิ้งหม้อน้ำ.** คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน.

การนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้โดยอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซกับของเหลว. (2547, มิถุนายน 1). **กรมพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน,** หน้า 2.

กฎกระทรวง. (2549). **กำหนดมาตรฐานความปลอดภัยเกี่ยวกับหม้อน้ำ.** กระทรวงอุตสาหกรรม : ผู้ประกาศ.

กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน. (2551). **การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพของหม้อน้ำในอุตสาหกรรม.** กระทรวงพลังงาน.

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2550). **เทคนิคการนำความร้อนทิ้งจากก๊าซเสียที่มีอุณหภูมิสูงกลับมาใช้ใหม่.** กระทรวงพลังงาน.

กองฝึกอบรม กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2550). **เทคนิคการนำความร้อนทิ้งจากก๊าซเสียที่มีอุณหภูมิสูงกลับมาใช้ใหม่.** กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน.

ขวัญชัย ไทรทอง และอติพงศ์ นันทพันธุ์. (2548). **การประยุกต์ใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตามขวางดัดแปลงจากคอนเดนเซอร์ระบบปรับอากาศรถยนต์ : กรณีศึกษาถึงความร้อนทิ้งจากน้ำร้อนมาใช้อุ่นอากาศ.** บทความวิชาการวิจัย มหาวิทยาลัยนเรศวร.

จตุรงค์ สมตระกูล. (2550). **การศึกษาสมรรถนะทางความร้อนของระบบความร้อนทิ้งกลับคืน.** คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

จรัล จิรวิบูลย์. (2553). **หม้อไอน้ำ.** กรุงเทพมหานคร : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น.

ณดา จันทร์สม. (2543). **บัญชีและการเงินความเชื่อมโยงสำหรับการวิเคราะห์ทางการเงิน.** กรุงเทพมหานคร : คณะพัฒนาการเศรษฐกิจ สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์.

ณัฐ ธวรยศ และทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. (2549). **อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับการนำความร้อนทิ้งจากอากาศร้อนลอยตัวอย่างธรรมชาติกลับมาใช้ใหม่.** คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. (2547). **การใช้หม้อน้ำรถยนต์เป็นอุปกรณ์นำความร้อนทิ้งกลับคืน.** สำนักงานนโยบายและพลังงาน กระทรวงพลังงาน.

ทวีศักดิ์ ทวีวิทยาการ. (2547). **การออกแบบเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบท่อความร้อน.** คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ธนากร ณ พัทลุง และคณะ. (2550). **การนำความร้อนจากปล่องไอเสียมาอุ่นน้ำป้อนในงานอุตสาหกรรม (กรณีศึกษา).** กรมพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน.

ธนิต ดวงมุสิกร์. (2547). **การนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้อุ่นโดยอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซร้อนทิ้งจากหม้อน้ำไปใช้อุ่นน้ำป้อน : กรณีศึกษา กองฝึกอบรมศูนย์วิทยาการอนุรักษ์พลังงาน.**

ธนณัฐฐ์ เอื้อภราดร. (2547). **การนำความร้อนจากไอเสียกลับมาใช้ประโยชน์ : กรณีศึกษา บริษัทน้ำตาลราชบุรี.** สำนักพัฒนา บัณฑิตศึกษา สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์.

ธรณ์ บพิตรพิทักษ์. (2543). **การบำรุงรักษาหม้อน้ำ.** กรุงเทพมหานคร : วอเตอร์ จี เค บี.

บริษัทวันไทยอุตสาหกรรมอาหาร จำกัด. (2550). **การนำความร้อนทิ้งจากปล่องไอเสียหม้อน้ำมาอุ่นน้ำป้อน.** กรมพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน.

ปิยภัทร์ คุ้มปรีดี และมิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล. (2546). **การศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับเตาเผาเซรามิก.** เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17 ปราจีนบุรี.

ประดิษฐ์ เทอดทูล และคณะ. (2543). **ศึกษาออกแบบและสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอน สำหรับหม้อไอน้ำสำเร็จรูป.** คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ผ่องศรี ศิวราศักดิ์. (2551). **การถ่ายเทความร้อน.** กรุงเทพมหานคร : ทริปเพิ้ล เอ็ดดูเคชั่น.

พงศ์ธร จรัญญากรณ์. (2542). **อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับงานอุตสาหกรรม.** คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

มนต์ทิพย์ ช่ำชอง, ธงชัย ศรีนพคุณ และเกษม เสรีภาพสากล. (2547). **การประหยัดพลังงานในอุตสาหกรรมอาหาร ระบบการนำความร้อนกลับมาใช้ของน้ำ Blow Down หม้อไอน้ำ.** คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน.

โยชิฮิโกะ นาคามูระ. (2543). **การประหยัดพลังงานความร้อนในอุตสาหกรรม.** กรุงเทพมหานคร : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น.

วิชัย พฤกษ์ธาราธิกูล. (2539). **ผู้ควบคุมหม้อไอน้ำ.** กรุงเทพมหานคร : ธวิพัฒน์.

วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล. (2536) . **อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในงานอุตสาหกรรม.** กรุงเทพมหานคร : ส.เอเชียเพรส.

ศิริกัลยา สุวจิตตานนท์ และสมพงษ์ พิเชษฐ์ภิญโญ. (2541). **เทคนิคการอนุรักษ์พลังงานในโรงงานอุตสาหกรรม.** กรุงเทพมหานคร : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศูนย์ทรัพยากรฝึกอบรมเพื่อการอนุรักษ์พลังงาน. **การนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้โดยอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซกับของเหลว**. (2547). กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม.

สุรพล รูปงาน, ณัฏฐ์ เทศยปนันทน์ และทวีวัฒน์ สุภารส. (2551). **การวิเคราะห์สมรรถนะเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อ.** บทความวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 6 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

สุมิตร แสงบุริมทิศ. (2544). **การออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเชลล์และท่อ โดยเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล.** คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถานบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

สมเกียรติ บุญณสะ. (2548). **การประเมินพลังงานที่ประหยัดได้ของการนำความร้อนทิ้งกลับใช้ใหม่จากเครื่องอัดอากาศ.** เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 1 ชลบุรี.

สำนักงานเทคโนโลยีความปลอดภัย. (2549). **ความปลอดภัยเกี่ยวกับหม้อน้ำ.** กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม.

สำนักงานวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. (2543). **เทคนิคการตรวจประเมินเทคโนโลยีสะอาด.** คณะวิศวกรรมศาสตร์ : มหาวิทยาลัยขอนแก่น .

อัมพร พรพิพัฒน์กุล. (2527). **แนวทางการประหยัดพลังงานโดยการผลิตและใช้ไอน้ำอย่างมีประสิทธิภาพ.** โครงการวิจัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อุทัย ผ่องรัศมี. (2553). **การออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อขด สำหรับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว.** ศูนย์วิจัยพลังงาน มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี.

_____. (2555). **การออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อสำหรับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว.** ศูนย์วิจัยพลังงาน มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี.

อนุชา วิเชียร. (2547). **การจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ.** คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

ออมรอน อีเลคทรอนิคส์. **ผลิตภัณฑ์**. ค้นเมื่อ กรกฎาคม 2, 2554 จาก http://www.omron-ap.co.th/product_info/PS-%5B%5DS(R)/index.asp

Alireza Bahadori and Hari B. Vuthaluru. (2010). **A method for estimation of recoverable heat from blowdown systems during steam generator.** Curtin University : ELSE VIER.

A. Yumnus Cengel and A. Michael Boles. (2008). **Thermodynamics an Engineering Approach.** New York : Mc Graw-Hill.

Ben Lu, Pei-Xue Jiang, Experimental and Numerical Investigation of Convection Heat Transfer. **Thermal and Fluid Science 30 (2006);** pp. 513-521.

Cabeza Gome. Etal. (2549). **การจัดเรื่องของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตัดกัน.**

E. V. Cavasen. (editor). (1979). **Process heat exchanger.** New York : McGraw-Hill.

Eiamsa-ard, S., and Promvonge, P. (2006). Experimental Investigation of Heat Transfer and Friction Characteristicsin a Circular Tube Fitted with V-Nozzle Tabulators, **International Communication Heat and Mass Transfer,** 33, 591-600.

Eiamsa-ard, S. and Promvonge, P. (2010). Performance assessment in a heat exchanger tube with alternate clockwise and counterclockwise twisted-tape inserts. **International Journal of Heat and Mass Transfer,** 53, 1364-1372.

Frass P. (1989). **Heat Exchanqer Design.** 2nd ed. New York : John Wiley and Sons, Inc.

L. Cabeza – Gome, H. A. Navarro, S. M. Godoy and J. M. Saiz – Jabardo. (2006). **A New Cross-Flow Thermally Efficiency Heat Exchanger Flow Arrangment.** Universidade de Sao Paulo Brazil, and Universidade Estadual Spain.

M. Akyurt, N. J. Lamfon, Y. S. H. Najjar, M. H. Habeebullan and T. Y. Alp. (2010). **Modeling of Waste Heat Recovery by Leaped Water-Insteel Heat Pipes.** King Abdulaziz University Saudi Arabia.

N. V. Suryanarayana and Oner Arici. (2003). **Design and Simulation of Thermal System.** New York : McGraw-Hill.

Nuntaphan A. (2002). **Performance Analysis of Heat Pipe Heat Exchanger Using Binary Working Fluids.** Unpublished Doctoral Dissertation, King Mongkut's University of Technology Thonburi.

P.Chattopadhyay. (2001). **Boiler Operation Engineering.** Tata McGraw – Hill.

P. K. Nag. (2002). **Heat Transfer.** Tata McGraw-Hill.

S. Ramchandran, P. Kalaichelvi and S. Sundaram. (2006). **Heat Transfer Studies for Two Phase Flow in a Spiral Plate Heat Exchanger.** National Institute of Technology. Thamilnady India.

Seemawute, P. and Eiamsa-ard, S. (2010). Thermohydraulics of turbulent flow through a round tube by a peripherally-cutt wisted tape with analternate axis. **International Communications in Heat and Mass Transfer,** 37: 652-659.

Somkiat Boonnasa. (2007). **The Effect of Waste Heat Recovery Efficiency on the Cost Reduction of the Electric Generation Fueled by a Paddy Husk.** King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok.

Tanda G. (2004). Heat Transfer in Rectangular Channels with Transverse and V-Shaped Broken Ribs. **Int J Heat Mass Transfer 2004;** 47: pp.229-243.

Thai Support Engineering. (2010). **Standards of Mechanical Engineering Designs**. ค้นเมื่อ กรกฎาคม 2, 2554 จาก http://www.seddesigns.com/webboard/index.php

The Natural gas boiler burner consortium. (2011). **Boiler Efficiency**. ค้นเมื่อ กรกฎาคม 2, 2554, จาก http://cleanboiler.org/eff_Improve/efficiency/Index_boiler_efficiency.asp

V. Gannapathy. (2005). **Heat Recovery Stean-Generator for Change Cycle Application.** B. heil International power technology palo alto california.

Wongcharee, K. and Eiamsa-ard, S. (2011). Friction and heat transfer characteristics of laminar swirl flow through the round tubes inserted with alternate clockwise and counterclockwise twisted-tapes. **International Communications in Heat and Mass Transfer,** 38: 348-52.

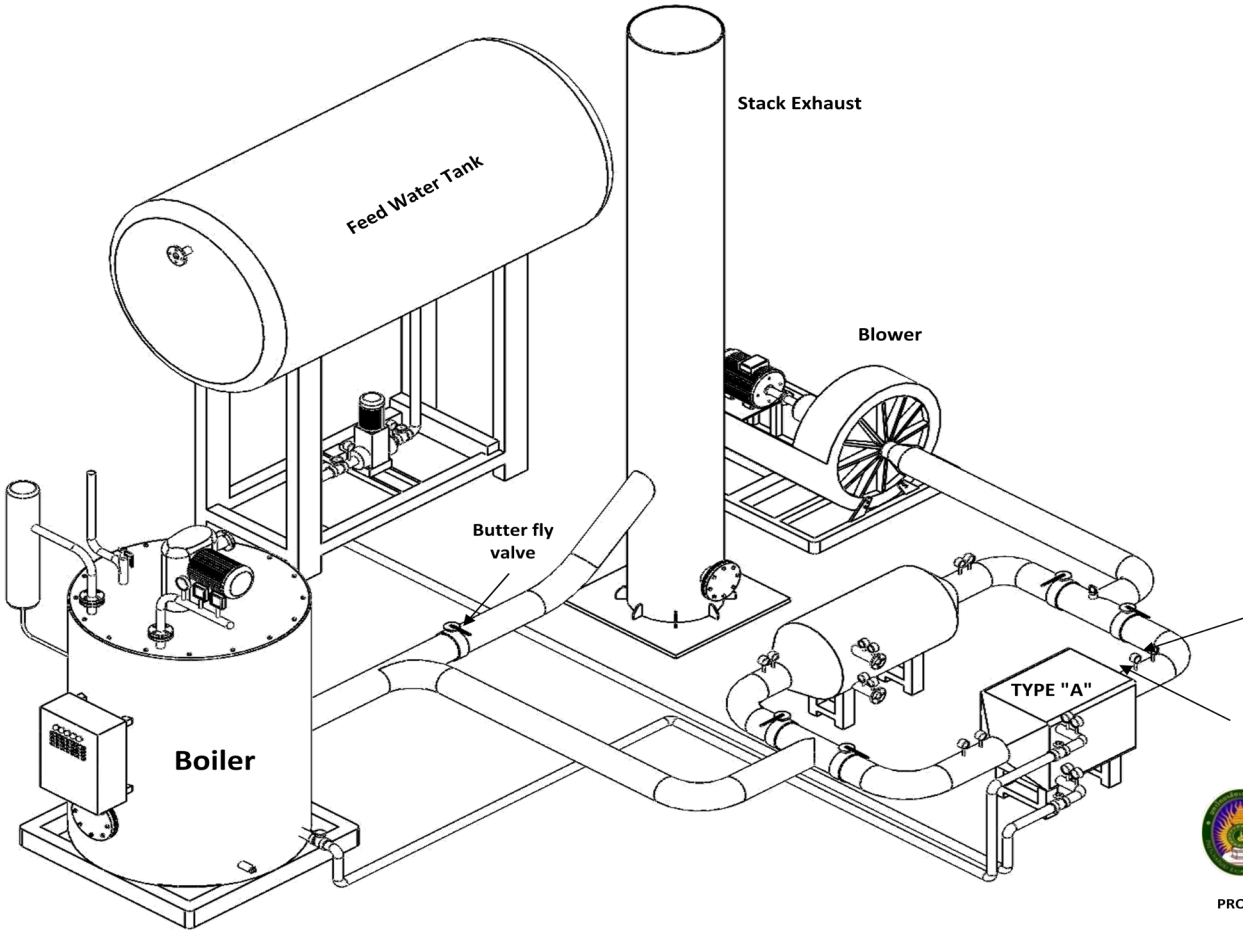
Xian – Guo Ma and Zhi – Hang Chen. (1997). **Heat Recovery From the Staring Vessel of a Once-Through Boiler System.** University of Shanghai China.

Y. Suzve, K. Morimoto, N. Shikazano, Y. Suzuki and N. Kasagi. (2006). **High Performance Heat Exchanger With Oblique - Wave Wall.** Interwadianal heat transfer sydney australia.

Yunus A. Cengel. (2008). **Heat Transfer.** New York : McGraw-Hill.

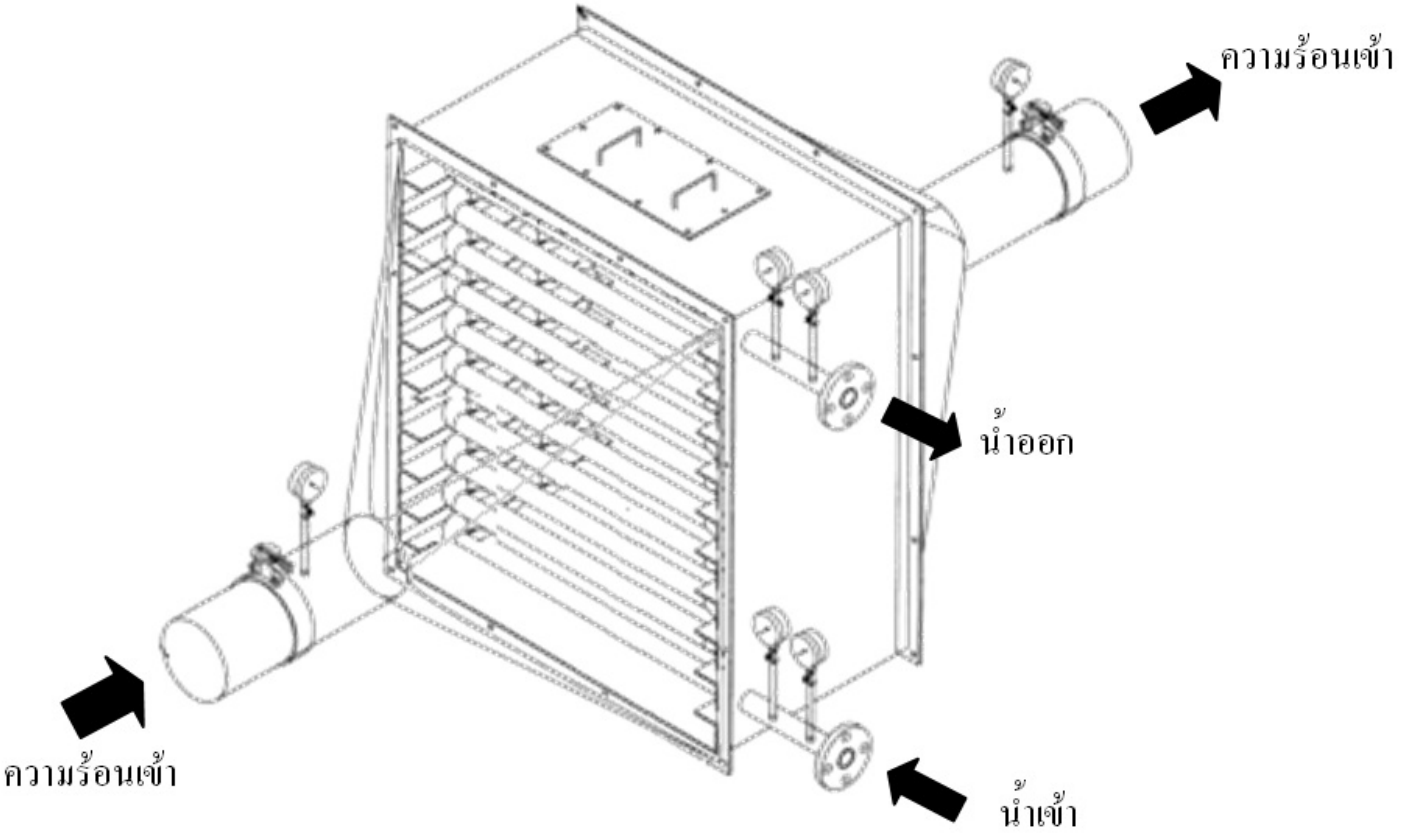
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
แบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อ



PHHECHABURI RAJBHAT UNIVERSITY
38 Moo 8 Hardjaosumran Rd.
Nawong Muang Phetchaburi 76000
Tel. 032-493-300-6 Fax. 032-493-308

PROJECT :	ECONOMIZER		
TITLE :	SHELL AND TUBE		
DWG NO.	.....	DRAWN BY	K.JAKKRIT
CUST. CODE	.....	CHECK BY	P.UTHAI

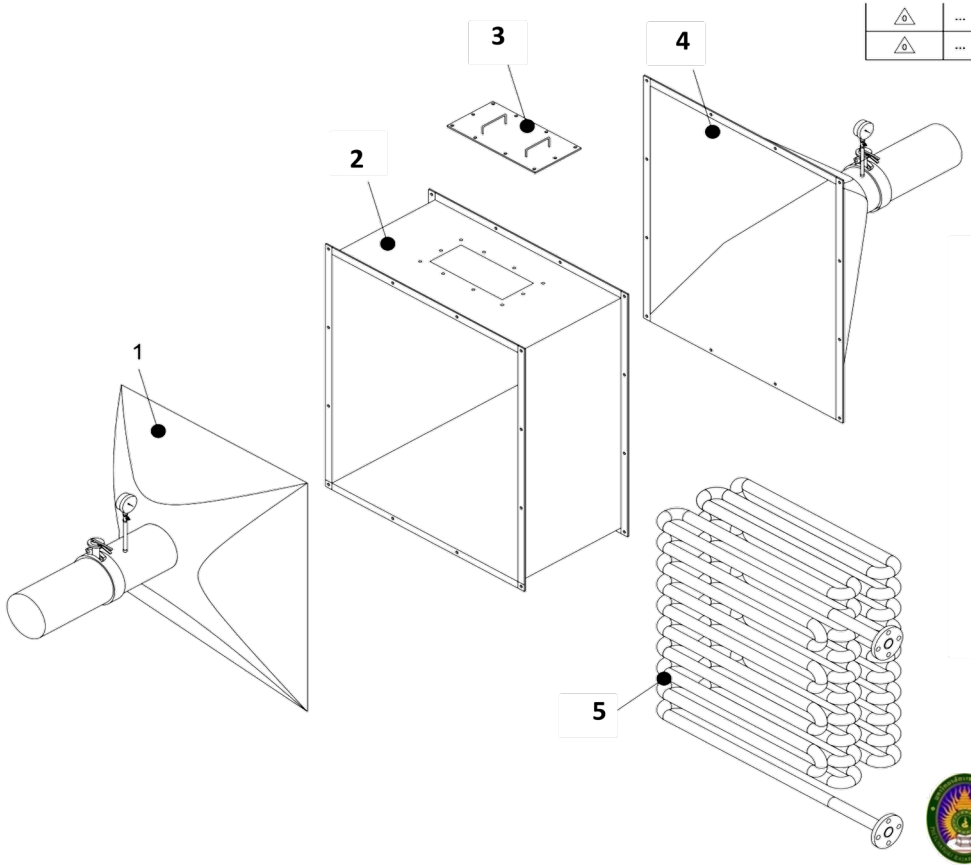


ECONOMIZER

PHHECHABURI RAJBHAT UNIVERSITY
38 Moo 8 Hardjaosumran Rd.
Nawong Muang Phetchaburi 76000
Tel. 032-493-300-6 Fax. 032-493-308

PROJECT :	ECONOMIZER		
TITLE :	SHELL AND TUBE		
DWG NO.	—	DRAWN BY	K.JAKKRIT
CUST. CODE	—	CHECK BY	P.UTHAI

0	...	mm-dd-yy
0	...	mm-dd-yy

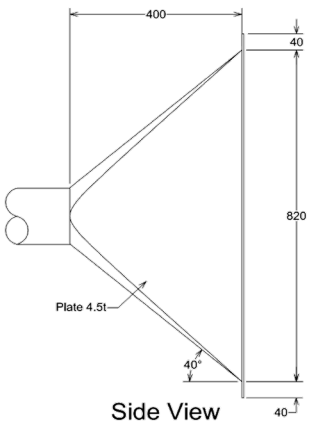


ส่วนประกอบ ECONOMIZER

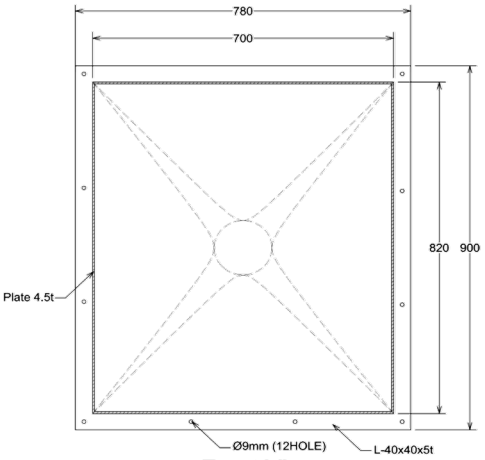
1. ฝาหน้า
2. ที่ครอบ coil
3. ฝาไว้ทำความสะอาด
4. ฝาหลัง
5. coil

PHHECHABURI RAJBHAT UNIVERSITY
38 Moo 8 Hardjaosumran Rd.
Nawong Muang Phetchaburi 76000
Tel. 032-493-300-6 Fax. 032-493-308

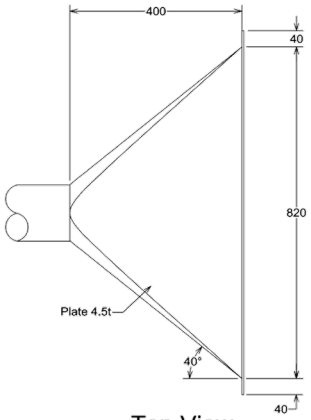
PROJECT :	ECONOMIZER
TITLE :	SHELL AND TUBE
DWG NO. -----	DRAWN BY K.JAKKRIT
CUST. CODE -----	CHECK BY P.UTHAI



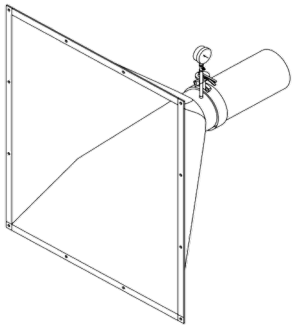
Side View



Front View



Top View

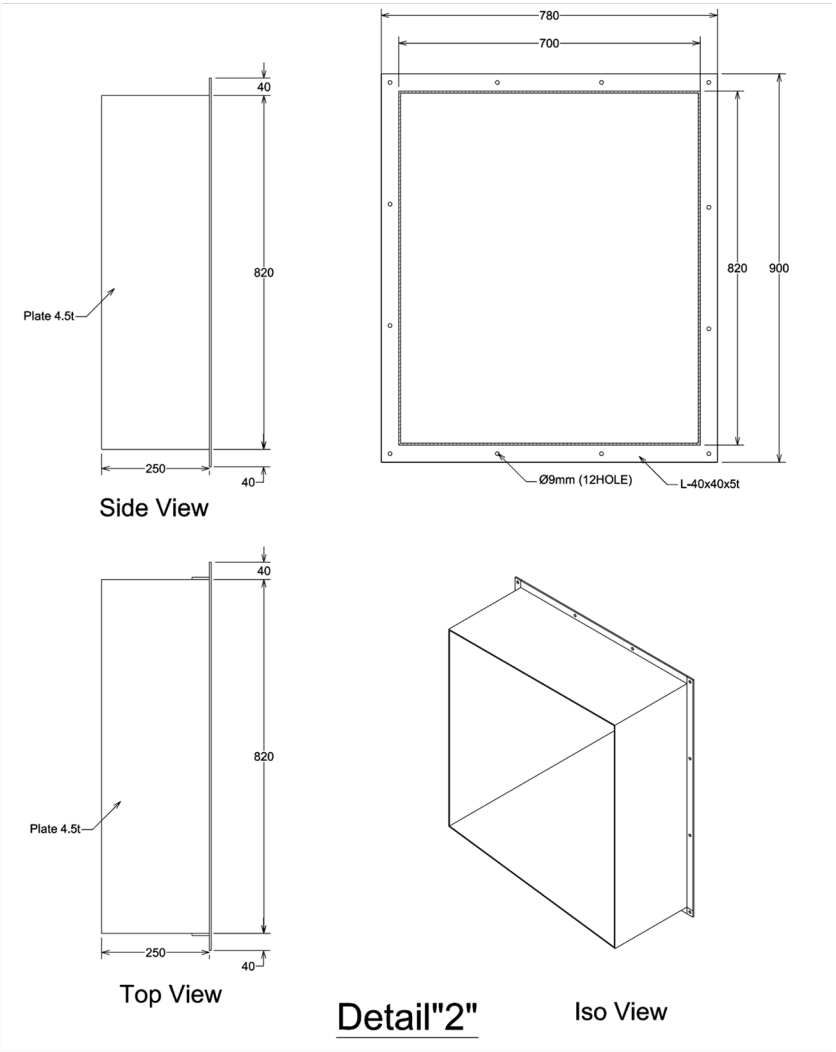


Iso View

Detail"5"

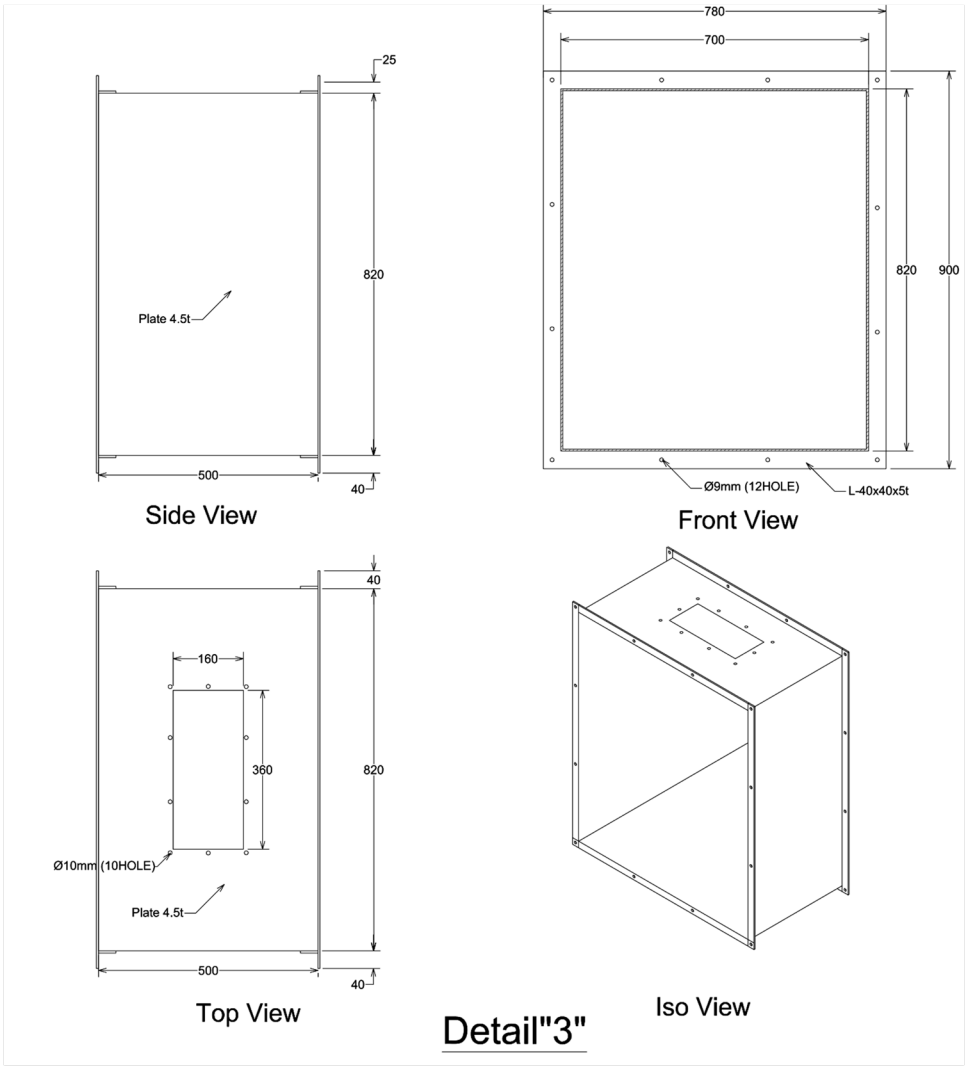
PHHECHABURI RAJBHAT UNIVERSITY
38 Moo 8 Hardjaosumran Rd.
Nawong Muang Phetchaburi 76000
Tel. 032-493-300-6 Fax. 032-493-308

PROJECT :	ECONOMIZER		
TITLE :	SHELL AND TUBE		
DWG NO.	.....	DRAWN BY	K.JAKKRIT
CUST. CODE	.....	CHECK BY	P.UTHAI



PHHECHABURI RAJBHAT UNIVERSITY
38 Moo 8 Hardjaosumran Rd.
Nawong Muang Phetchaburi 76000
Tel. 032-493-300-6 Fax. 032-493-308

PROJECT :	ECONOMIZER		
TITLE :	SHELL AND TUBE		
DWG NO.	.....	DRAWN BY	K.JAKKRIT
CUST. CODE	.....	CHECK BY	P.UTHAI



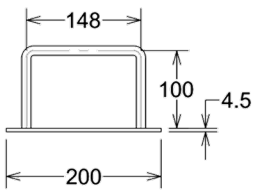
PHHECHABURI RAJBHAT UNIVERSITY
38 Moo 8 Hardjaosumran Rd.
Nawong Muang Phetchaburi 76000
Tel. 032-493-300-6 Fax. 032-493-308

PROJECT : **ECONOMIZER**

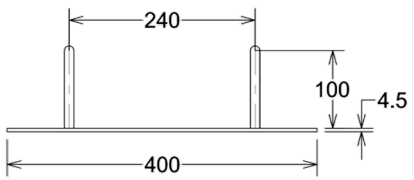
TITLE : **SHELL AND TUBE**

DWG NO. ------ DRAWN BY K.JAKKRIT

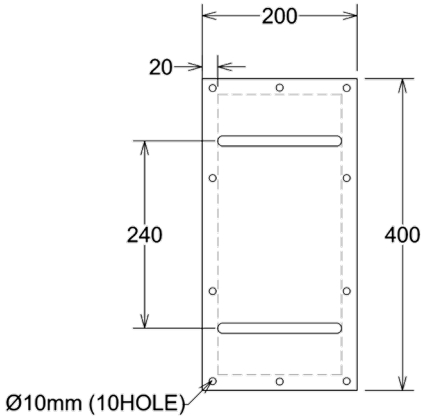
CUST. CODE ------ CHECK BY P.UTHAI



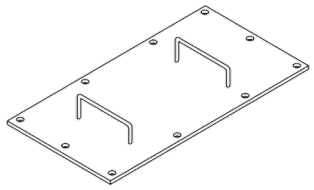
Side View



Front View



Top View

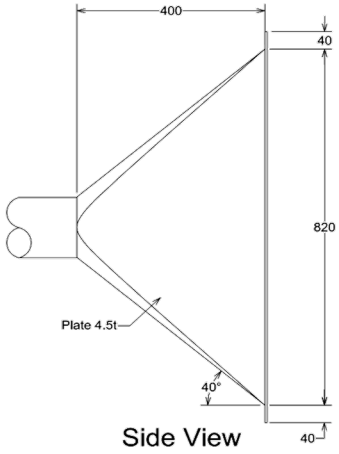


Iso View

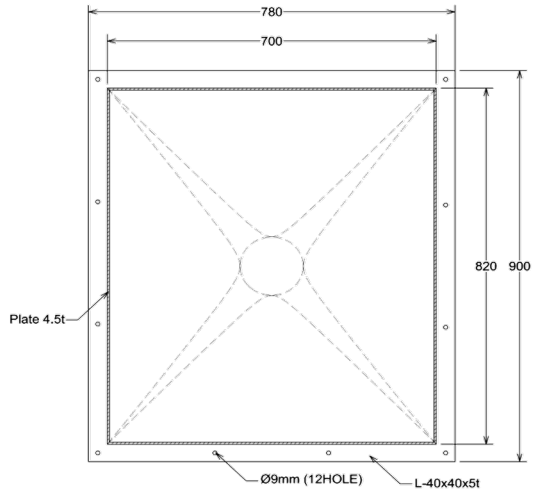
Detail "4"

PHHECHABURI RAJBHAT UNIVERSITY
38 Moo 8 Hardjaosumran Rd.
Nawong Muang Phetchaburi 76000
Tel. 032-493-300-6 Fax. 032-493-308

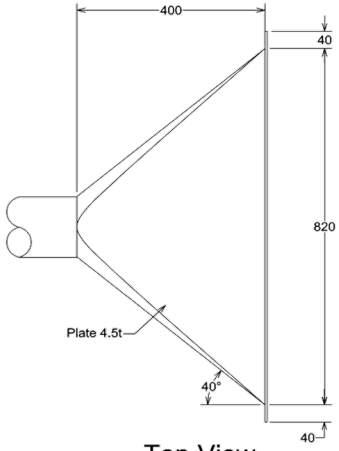
PROJECT :	ECONOMIZER
TITLE :	SHELL AND TUBE
DWG NO.	.....
CUST. CODE	.....
DRAWN BY	K.JAKKRIT
CHECK BY	P.UTHAI



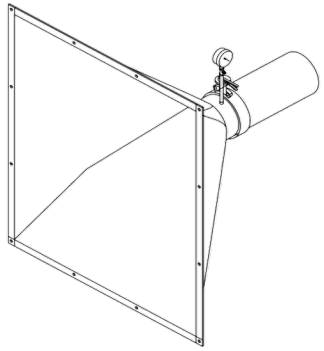
Side View



Front View



Top View

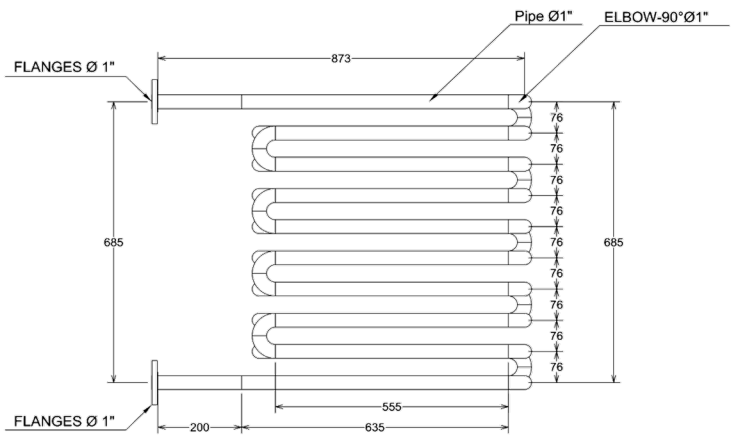


Iso View

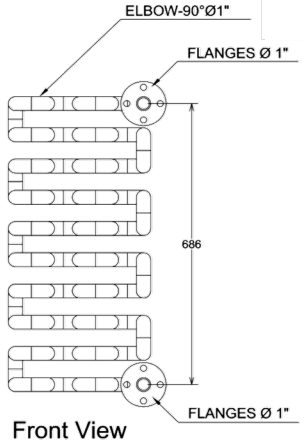
Detail"5"

PHHECHABURI RAJBHAT UNIVERSITY
38 Moo 8 Hardjaosumran Rd.
Nawong Muang Phetchaburi 76000
Tel. 032-493-300-6 Fax. 032-493-308

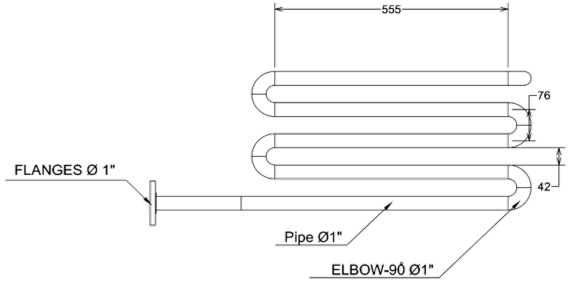
PROJECT :	ECONOMIZER		
TITLE :	SHELL AND TUBE		
DWG NO.	-----	DRAWN BY	K.JAKKRIT
CUST. CODE	-----	CHECK BY	P.UTHAI



Side View

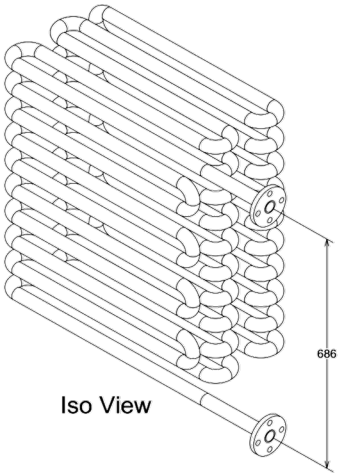


Front View



Top View

Detail"6"



Iso View

PHHECHABURI RAJBHAT UNIVERSITY
38 Moo 8 Hardjaosumran Rd.
Nawong Muang Phetchaburi 76000
Tel. 032-493-300-6 Fax. 032-493-308

PROJECT : **ECONOMIZER**

TITLE : **SHELL AND TUBE**

DWG NO. ----- DRAWN BY K.JAKKRIT

CUST. CODE ----- CHECK BY P.UTHAI

ภาคผนวก ข

ตารางบันทึกผลการทดสอบงานวิจัย

ใบบันทึกผลการทดลองงานวิจัย

เรื่อง การออกแบบเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดแผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมสำหรับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านครั้งเดียว

ครั้งที่ 1 ความถี่ 3 Hz (ความเร็วเข้า.....ออก..... m/s)

วันที่ทดสอบ ……... (เวลา ……... น)

Velocity hot Air. (Shell)		Temp.Eco.(Shell)		Temp.Eco.(Tube)		Pressure.Eco. (Tube)		T_{Air}	T_g	P_g	FC
$V_{s,i}$ (m/s)	$V_{s,o}$ (m/s)	$T_{s,i}$ (^oC)	$T_{s,o}$ (^oC)	$T_{t,i}$ (^oC)	$T_{t,o}$ (^oC)	P_i (kg/cm^2)	P_o (kg/cm^2)	(^oC)	(^oC)	(kg/cm^2)	(L)
9.0	2.1	220.5	123.8	48.0	54.0	2.1	1.8	32.5	220.5	1.0	6.6
8.8	3.3	229.8	127.6	48.0	64.0	2.8	2.6	32.5	229.8	2.0	
8.7	3.8	240.7	130.6	48.0	63.0	3.8	3.6	32.6	240.7	3.0	
8.6	3.1	246.6	137.3	50.0	60.0	4.6	4.4	32.8	246.6	4.0	

ใบบันทึกผลการทดลองงานวิจัย

เรื่อง การออกแบบเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดแผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมสำหรับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านครั้งเดียว

ครั้งที่ 1 ความถี่ 3 Hz (ความเร็วเข้า.....ออก..... m/s)

วันที่ทดสอบ …….... (เวลา …….... น)

Pd (hPa)	O_2 (%)	η_b (%)	λ	Loss (%)	CO_2 (%)	CO (ppm)	D_p (°C)	No_x (ppm)	SO_2	η_b (%)	λ	Loss (%)	CO_2 (%)	CO (ppm)	D_p (°C)	No_x (ppm)	SO_2	Pd (hPa)	O_2 (%)
0.48	8.1	88.8	1.63	11.2	9.5	3	44.0	38	8	94.7	1.58	5.3	9.8	8	44.5	48	8	-0.03	7.3
0.46	6.9	89.1	1.49	10.9	10.3	10	45.3	51	7	93.5	1.91	6.5	8.1	7	41.3	36	8	0.02	10.0
0.48	6.3	88.8	1.45	11.2	10.6	1	45.8	51	10	95.2	1.3	1.3	11.9	16	47.8	44	8	0.03	4.8
0.41	4.4	89.7	1.27	10.3	12.2	15	48.2	72	5	91.3	2.36	8.7	6.5	10	37.9	31	9	-0.01	12.1

ใบบันทึกผลการทดลองงานวิจัย

เรื่อง การออกแบบเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดแผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมสำหรับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านครั้งเดียว

ครั้งที่ 2 ความถี่ 4 Hz (ความเร็วเข้า.....ออก..... m/s)

วันที่ทดสอบ ……... (เวลา ……... น)

Velocity hot Air. (Shell)		Temp.Eco.(Shell)		Temp.Eco.(Tube)		Pressure.Eco. (Tube)		T_{Air}	T_g	P_g	FC
$V_{s,i}$ (m/s)	$V_{s,o}$ (m/s)	$T_{s,i}$ (^oC)	$T_{s,o}$ (^oC)	$T_{t,i}$ (^oC)	$T_{t,o}$ (^oC)	P_i (kg/cm^2)	P_o (kg/cm^2)	(^oC)	(^oC)	(kg/cm^2)	(L)
7.4	2.2	175.0	88.0	20.0	30.0	2.0	2.0	25.7	175.0	1.0	10.7
7.4	2.6	196.7	96.4	22.0	38.0	2.4	2.4	25.9	196.7	2.0	
7.5	3.7	228.3	107.8	24.0	44.0	3.8	3.8	26.7	228.3	3.0	
7.6	4.5	254.5	123.1	26.0	46.5	4.4	4.4	27.7	254.5	4.0	

หมายเหตุ ใช้เวลาในการทดลอง 45 นาที

ใบบันทึกผลการทดลองงานวิจัย

เรื่อง การออกแบบเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดแผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมสำหรับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านครั้งเดียว

ครั้งที่ 2 ความถี่ 4 Hz (ความเร็วเข้า.....ออก..... m/s)

วันที่ทดสอบ …….... (เวลา …….... น)

Pd (hPa)	O_2 (%)	η_b (%)	λ	Loss (%)	CO_2 (%)	CO (ppm)	D_p (°C)	No_x (ppm)	SO_2	η_b (%)	λ	Loss (%)	CO_2 (%)	CO (ppm)	D_p (°C)	No_x (ppm)	SO_2	Pd (hPa)	O_2 (%)
0.40	3.6	93.1	1.21	6.9	12.8	11.5	49.0	77	4	96.7	1.41	3.3	10.9	10.0	46.3	53	3.0	-0.16	5.6
0.30	4.0	32.0	1.24	8.0	12.5	11.0	48.6	75	3	96.3	1.40	3.7	11.0	9.0	46.5	58	3.0	-0.02	6.0
0.37	3.5	90.8	1.20	9.2	12.8	12.5	49.0	77	5	95.8	1.37	4.3	11.2	10.0	46.8	56	4.0	-0.01	5.7
0.35	3.6	89.6	1.21	10.4	12.8	12.0	49.0	75	3	95.0	1.42	5.0	10.9	10.0	46.3	60	2.0	-0.02	6.2

ใบบันทึกผลการทดลองงานวิจัย

เรื่อง การออกแบบเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดแผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมสำหรับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านครั้งเดียว

ครั้งที่ 3 ความถี่ 5 Hz (ความเร็วเข้า.....ออก..... m/s)

วันที่ทดสอบ ……... (เวลา ……... น)

Velocity hot Air. (Shell)		Temp.Eco.(Shell)		Temp.Eco.(Tube)		Pressure.Eco. (Tube)		T_{Air}	T_g	P_g	FC
$V_{s,i}$ (m/s)	$V_{s,o}$ (m/s)	$T_{s,i}$ (^oC)	$T_{s,o}$ (^oC)	$T_{t,i}$ (^oC)	$T_{t,o}$ (^oC)	P_i (kg/cm^2)	P_o (kg/cm^2)	(^oC)	(^oC)	(kg/cm^2)	(L)
8.2	2.1	215.9	114.1	28.0	40.0	2.0	2.0	28.2	215.9	1.0	9.50
8.4	2.4	224.0	116.0	28.0	42.0	3.0	3.0	29.1	224.0	2.0	
8.6	2.7	240.3	121.4	32.0	44.0	3.8	3.6	29.5	244.3	3.0	
8.9	2.8	260.3	131.0	32.0	46.0	4.6	4.4	29.5	260.3	4.0	

ใบบันทึกผลการทดลองงานวิจัย

เรื่อง การออกแบบเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดแผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมสำหรับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านครั้งเดียว

ครั้งที่ 3 ความถี่ 5 Hz (ความเร็วเข้า.....ออก..... m/s)

วันที่ทดสอบ …….... (เวลา …….... น)

Pd (hPa)	O_2 (%)	η_b (%)	λ	Loss (%)	CO_2 (%)	CO (ppm)	D_p (°C)	No_x (ppm)	SO_2	η_b (%)	λ	Loss (%)	CO_2 (%)	CO (ppm)	D_p (°C)	No_x (ppm)	SO_2	Pd (hPa)	O_2 (%)
0.46	3.8	91.3	1.22	8.7	12.6	13.0	48.7	70	3	95.5	1.43	4.5	10.8	12.0	46.1	50	4.0	0.04	6.3
0.45	4.3	90.7	1.27	9.3	12.2	13.0	48.2	64	3	95.9	1.23	4.1	12.5	12.0	48.6	72	3.0	0.04	3.9
0.51	9.5	85.9	1.83	14.1	8.4	14.0	41.9	38	5	95.6	1.27	4.4	12.1	11.0	48.1	69	4.0	0.06	4.5
0.45	9.8	89.3	1.22	10.7	12.6	14.0	48.7	72	2	94.5	1.48	5.5	10.4	12.0	45.5	57	2.0	-0.05	6.8

ใบบันทึกผลการทดลองงานวิจัย

เรื่อง การออกแบบเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดแผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมสำหรับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านครั้งเดียว

ครั้งที่ 4 ความถี่ 6 Hz (ความเร็วเข้า.....ออก..... m/s)

วันที่ทดสอบ ……... (เวลา ……... น)

Velocity hot Air. (Shell)		Temp.Eco.(Shell)		Temp.Eco.(Tube)		Pressure.Eco. (Tube)		T_{Air}	T_g	P_g	FC
$V_{s,i}$ (m/s)	$V_{s,o}$ (m/s)	$T_{s,i}$ (^oC)	$T_{s,o}$ (^oC)	$T_{t,i}$ (^oC)	$T_{t,o}$ (^oC)	P_i (kg/cm^2)	P_o (kg/cm^2)	(^oC)	(^oC)	(kg/cm^2)	(L)
7.5	4.0	174.5	91.8	40.0	44.0	2.0	2.0	30.6	174.5	1.0	8.70
7.9	4.5	197.8	101.6	41.0	48.0	2.8	2.8	31.1	4197.8	2.0	
8.2	4.5	229.6	115.3	40.0	50.0	3.6	3.6	31.4	229.6	3.0	
8.5	5.0	252.1	129.2	40.0	52.0	4.4	4.4	31.8	252.1	4.0	

หมายเหตุ ใช้เวลา 30 นาทีในการทดลอง

ใบบันทึกผลการทดลองงานวิจัย

เรื่อง การออกแบบเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดแผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมสำหรับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านครั้งเดียว

ครั้งที่ 4 ความถี่ 6 Hz (ความเร็วเข้า.....ออก..... m/s)

วันที่ทดสอบ …….... (เวลา …….... น)

Pd (hPa)	O_2 (%)	η_b (%)	λ	Loss (%)	CO_2 (%)	CO (ppm)	D_p (°C)	No_x (ppm)	SO_2	η_b (%)	λ	Loss (%)	CO_2 (%)	CO (ppm)	D_p (°C)	No_x (ppm)	SO_2	Pd (hPa)	O_2 (%)
0.41	3.5	92.0	1.20	6.6	12.8	7.0	49.0	73	1	97.1	1.25	2.9	12.3	12.0	48.3	67	2.0	0.50	4.2
0.34	5.5	91.5	1.35	8.5	11.4	3.0	47.4	48	4	96.0	1.54	4.0	10	13.0	44.8	48	3.0	-0.01	6.8
0.48	4.1	90.6	1.24	9.4	12.4	19.0	48.5	66	3	96.1	1.23	3.9	12.5	15.0	48.6	69	2.0	-0.06	3.9
0.40	3.7	89.8	1.21	10.2	12.7	15.0	48.9	71	3	95.2	1.23	4.6	12.5	14.0	48.6	9	4.0	-0.10	3.9

ใบบันทึกผลการทดลองงานวิจัย

เรื่อง การออกแบบเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดแผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมสำหรับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านครั้งเดียว

ครั้งที่ 5 ความถี่ 7 Hz (ความเร็วเข้า.....ออก..... m/s)

วันที่ทดสอบ ……... (เวลา ……... น)

Velocity hot Air. (Shell)		Temp.Eco.(Shell)		Temp.Eco.(Tube)		Pressure.Eco. (Tube)		T_{Air}	T_g	P_g	FC
$V_{s,i}$ (m/s)	$V_{s,o}$ (m/s)	$T_{s,i}$ (^oC)	$T_{s,o}$ (^oC)	$T_{t,i}$ (^oC)	$T_{t,o}$ (^oC)	P_i (kg/cm^2)	P_o (kg/cm^2)	(^oC)	(^oC)	(kg/cm^2)	(L)
7.2	5.1	212.9	119.8	40.0	45.0	1.2	1.2	31.3	212.9	1.0	7.60
7.8	5.7	229.2	112.9	40.0	50.0	2.1	2.0	32.1	229.2	2.0	
8.0	5.8	242.9	112.2	42.0	54.0	2.8	2.7	32.1	242.9	3.0	
8.1	5.9	256.6	135.2	42.0	55.0	3.7	3.6	32.5	256.6	4.0	

ใบบันทึกผลการทดลองงานวิจัย

เรื่อง การออกแบบเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดแผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยมสำหรับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านครั้งเดียว

ครั้งที่ 5 ความถี่ 7 Hz (ความเร็วเข้า.....ออก..... m/s)

วันที่ทดสอบ …….... (เวลา …….... น)

Pd (hPa)	O_2 (%)	η_b (%)	λ	Loss (%)	CO_2 (%)	CO (ppm)	D_p (°C)	No_x (ppm)	SO_2	η_b (%)	λ	Loss (%)	CO_2 (%)	CO (ppm)	D_p (°C)	No_x (ppm)	SO_2	Pd (hPa)	O_2 (%)
0.34	3.7	91.4	1.21	8.6	12.7	14.0	48.9	72	3	95.1	1.52	4.9	10.1	10.0	45.0	51	6.0	-0.15	7.2
0.31	6.5	89.4	1.45	10.6	10.6	12.0	45.8	56	4	95.6	1.28	4.4	12.0	10.0	47.9	67	4.0	-0.11	4.6
0.34	4.6	89.8	1.28	10.2	12.0	12.0	47.9	63	5	95.3	1.32	4.7	11.2	7.0	47.5	62	5.0	-0.15	4.9
0.34	5.8	88.4	1.38	11.6	11.1	13.0	46.6	53	10	93.9	1.60	6.1	9.6	9.0	44.1	47	8.0	-0.12	7.9

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ - นามสกุล รศ.อุทัย ผ่องรัศมี

วันเดือนปีเกิด 9 ตุลาคม 2497

ประวัติการศึกษา พ.ศ. 2527 คณิตศาสตร์ ครุศาสตรบัณฑิต (ค.บ.) สถาบันราชภัฏเทพสตรี จังหวัดลพบุรี

พ.ศ. 2536 วิศวกรรมเครื่องกล ครุศาสตรอุตสาหกรรมบัณฑิต (ค.อ.บ.) สถาบันเทคโนโลยี ราชมงคล (เทเวศร์) กรุงเทพฯ

พ.ศ. 2539 บริหารอาชีวะและเทคนิคศึกษา ครุศาสตรอุตสาหกรรมมหาบัณฑิต (ค.อ.ม.) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ

พ.ศ. 2552 วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) มหาวิทยาลัยปทุมธานี จังหวัดปทุมธานี

พ.ศ. 2554 วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร กรุงเทพฯ

พ.ศ. 2557 การจัดการเทคโนโลยี (ปร.ด.)

มหาวิทยาราชภัฏเพชรบุรี จังหวัดเพชรบุรี

ประวัติการทำงาน (บริหารและผู้สอน) พ.ศ. 2523 อาจารย์ (ช่างยนต์) โรงเรียนช่างกลภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

พ.ศ. 2524 - 2537 อาจารย์, หัวหน้าแผนกช่างยนต์, และหัวหน้าวิชาชีพ โรงเรียนเทคโนโลยีละโว้

พ.ศ. 2538 อาจารย์ (อ.1 ระดับ 3) วิทยาลัยเทคนิคสมุทรสาคร

พ.ศ. 2539 - 2547 อาจารย์, ประธานสาขาวิชาเทคโนโลยีเครื่องกล และรองคณบดีคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี

พ.ศ. 2548 - 2555 คณบดีคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี

ปัจจุบัน ประธานสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี

ประวัติการทำงาน

(วิชาการ/วิจัย/บริการวิชาการ)

1. ตำรา
   - 1.1 กลศาสตร์ของไหล
   - 1.2 เทอร์โมไดนามิกส์วิศวกรรม
   - 1.3 วิศวกรรมโรงจักรต้นกำลัง
   - 1.4 กลศาสตร์วัสดุ
2. เอกสารประกอบการสอน
   - 2.1 ปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล 2
   - 2.2 ปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล 3
   - 2.3 ปฏิบัติวิศวกรรมพื้นฐาน 1
   - 2.4 ปฏิบัติวิศวกรรมพื้นฐาน 2
3. งานวิจัย (เสร็จแล้วและเผยแพร่)

3.1 รศ.อุทัย ผ่องรัศมี, เครื่องสลัดน้ำมัน สำหรับผลิตภัณฑ์อาหารประเภททอด (ทุน มรภ.เพชรบุรี) เผยแพร่ Thailand Research Expo,2009 และเลขที่สิทธิบัตร 24412 พ.ศ.2551

3.2 รศ.อุทัย ผ่องรัศมี, การออกแบบเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบท่อขดสำหรับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว (ทุน มรภ.เพชรบุรี) เผยแพร่ The 11th Conference Energy Heat and Mass Transfer in thermal Equipments 8 – 9 March 2012 จังหวัดจันทบุรี (คำขอหมายเลขสิทธิบัตร 0301001682 วันที่ 2 พ.ค. 2551)

3.3 รศ.อุทัย ผ่องรัศมี, การนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์สำหรับหม้อน้ำขนาดเล็ก (เปลือกและท่อ) ทุนภาคอุตสาหกรรม เผยแพร่ Thailand Research Expo 2012 28 สิงหาคม 2555

3.4 รศ.อุทัย ผ่องรัศมี, การพัฒนาสมรรถนะเครื่องสลัดน้ำมันสำหรับผลิตภัณฑ์อาหารประเภททอด (ทุน สกอ.) ปี พ.ศ.2555 The First Higher Education Research Promotion Congress, HERP. 20 – 23 มกราคม 56

3.5 รศ.อุทัย ผ่องรัศมี, ผศ.ดร.เสนีย์ ศิริไชย, รศ.สำรวจ อินแบน, การออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อ สำหรับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว (ทุนภาคอุตฯ) เผยแพร่ The 24th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand, 24 – 27 October 2012

3.6 รศ.อุทัย ผ่องรัศมี, ผศ.ดร.เสนีย์ ศิริไชย, รศ.สำรวจ อินแบน, การนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์สำหรับหม้อน้ำขนาดเล็ก Burapha Science Journal ปีที่ 18 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2556 (งานวิจัยดุษฎีนิพนธ์)

3.7 รศ.อุทัย ผ่องรัศมี, ผศ.ดร.เสนีย์ ศิริไชย, รศ.สำรวจ อินแบน, การเปรียบเทียบสมรรถนะอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อกับแบบท่อขดสำหรับหม้อน้ำแบบความร้อนไหลผ่านทางเดียว, KKU Science Journal (ปีที่ 42 ฉบับที่ 2 เม.ย. – มิ.ย. 2557) หมายเลขคำขอสิทธิบัตร 1401000806, 9 ม.ค. 2557 (งานวิจัยดุษฎีนิพนธ์)

3.8 รศ.อุทัย ผ่องรัศมี, ผศ.ดร.เสนีย์ ศิริไชย, รศ.สำรวจ อินแบน, การออกแบบอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบท่อขด, Industrial Technology Lampang Ratjabhat University Journal ปีที่ 6 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2556

3.9 ปรัชญา มุขดา, อุทัย ผ่องรัศมี, กุลเชษฐ์ เพียรทอง และวิระพันธ์ สีหานาม, การเพิ่มขึ้นของอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันจากการเปิดกระจกข้างและติดอุปกรณ์เสริมของรถบรรทุกเล็ก, ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 4-7 ต.ค. 2557

3.10 ปรัชญา มุขดา, อนุชา สายสร้อย อุทัย ผ่องรัศมี, กุลเชษฐ์ เพียรทอง และวิระพันธ์ สีหานาม, การเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันในการติดตั้งอุปกรณ์เสริมของรถบรรทุกเล็ก, ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24. มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี 20-22 ตุลาคม 2553

3.11 ปรัชญา มุขดา, พิเชฐ นิลดวงดี, อาทิตย์ ทับทิมหอม, อุทัย ผ่องรัศมี และกุลเชษฐ์ เพียรทอง, อุปกรณ์ด้านอากาศพลศาสตร์ ที่มีผลกับการเปลี่ยนแปลงอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของรถบรรทุก, ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 8. มหาวิทยาลัยมหาสารคาม 2-4 พฤศภาคม 2555.

3.12 วิชาญ คงเกียรติไพบูลย์, อุทัย ผ่องรัศมี และวชิรวิทย์ สงสุวรรณ์, อิทธิพลของแผ่นใบบิดคู่ซ้อนกันต่อการถ่ายเทความร้อนและตัวประกอบความเสียดทานในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน, The 9th Conference on Energy Network of Thailand. 8 – 10 พ.ค. 2556 จังหวัดนครนายก

3.13 J.Bamrungwongtatree, U.Phongrassamee and P. Woratsoonton : Investigation of Reflow Lap. Bonding Defection, The 8th Annual Conference of Thai Physics Society Chang Mai, Thailand March 21-23, 2013

4. งานวิจัย (กำลังดำเนินการ)

4.1 การเพิ่มสมรรถนะอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสามเหลี่ยม (ทุน สกอ. ปี 2556)

4.2 การเพิ่มสมรรถนะอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อชนิดใส่แผ่นบิดตัดตรงกลางเป็นสี่เหลี่ยม (ทุน วช. ปี 2557)

4.3 การศึกษาอัตราส่วนแผ่นบิดภายในท่อต่อพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน (ทุนคณะฯ ปี 2557)

4.4 การสร้างแบบจำลองอุปกรณ์อุ่นน้ำป้อนแบบเปลือกและท่อด้วยแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ (ทุนคณะฯ ปี 2557)

5. การบริการวิชาการ

5.1 วิทยากรบรรยายอบรมเชิงปฏิบัติการหลักสูตร ผู้ควบคุมประจำหม้อน้ำ รุ่นที่ 1 - 17 หมายเลขทะเบียน 111 - 100 - 003 กรมโรงงานกระทรวงอุตสาหกรรม (2540 - ปัจจุบัน)

สถานที่ติดต่อ 16 หมู่ 5 ต.โพไร่หวาน อ.เมือง จ.เพชรบุรี 76000 โทรศัพท์ 081 - 939 9069