การศึกษาประสิทธิภาพการทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์สร้างจากวัสดุที่มีค่าการนำความร้อนต่างกันโดยใช้อากาศเป็นสารทำงาน

สินีพร จันทร์สว่าง

วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
กรกฎาคม 2562
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

วิทยานิพนธ์ เรื่อง "การศึกษาประสิทธิภาพการทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์สร้างจากวัสดุ
ที่มีค่าการนำความร้อนต่างกันโดยใช้อากาศเป็นสารทำงาน"
ของ นางสาวสินีพร จันทร์สว่าง
ได้รับการพิจารณาให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นริส ประทินทอง)

.....ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วราภรณ์ รัตตนงพิสัตย์)

.....กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(รองศาสตราจารย์สมชาย กฤตพลวิวัฒน์)

.....กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บัณฑูร เวียงมูล)

อนุมัติ

.....
(ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล มุณีสว่าง)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
1 ก.ค. 252

ประกาศคุณูปการ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ภายใต้การดูแลและให้คำปรึกษาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วราภรณ์ รัตตนงพิสัตย์ ที่ให้ความกรุณาและความเมตตาเสียสละเวลาอันมีค่าเพื่อให้คำแนะนำ ชี้แนะแนวทางแก้ไขข้อบกพร่อง อ่านงาน ตรวจงาน อย่างไม่รู้จักเหน็ดเหนื่อย คอยให้ทั้งความรู้ ให้ความช่วยเหลือ หาทุนสนับสนุนให้เรียน ถามไถ่ถึงความก้าวหน้า และเป็นกำลังใจเสมอมาโดยตลอด จนวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จตามวัตถุประสงค์และก้าวเข้าสู่ความสำเร็จ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง มา ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นริส ประทินทอง รองศาสตราจารย์ สมชาย กฤตพลวิวัฒน์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บัณฑูร เวียงมูล ท่านอาจารย์ให้ความกรุณาเป็นกรรมการสอบ ให้ความรู้ คำชี้แนะ เทคนิคการแก้ปัญหา จนทำให้งานวิจัยนี้มีเนื้อหาและขอบเขตที่ชัดเจน ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่าน ที่ได้เสนอมุมมองที่เป็นประโยชน์และชี้แนะแนวทางสำหรับการปรับปรุงวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์และทรงคุณค่า

ขอขอบคุณครูช่าง ทศวรรษ อินเกาะช้าง ที่คอยช่วยให้คำแนะนำ ช่วยสร้างและแก้ไขชิ้นงานจนสำเร็จ สามารถทำงานได้ตามวัตถุประสงค์ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ บุคลากร ตลอดจนพี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ และคณาจารย์ภายในภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่คอยให้ความช่วยเหลือและการสนับสนุนในทุกด้าน และสุดท้ายผู้วิจัยต้องขอขอบคุณคนรอบข้างทุกคนที่ยื่นโอกาส มอบความรู้ กำลังใจและประสบการณ์ที่ดี จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จ

งานวิจัยนี้ "ได้รับทุนอุดหนุนการทำกิจกรรมส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัยประเภททุนบัณฑิตศึกษาจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปี 2561" ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช) มา ณ ที่นี้ด้วย

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นเครื่องบูชาพระคุณบิดา มารดา บูรพาจารย์และผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่าน ผู้วิจัยหวังว่างานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้ที่สนใจไม่มากก็น้อย หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้วิจัยขอน้อมรับไว้เพียงผู้เดียว ขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

สินีพร จันทร์สว่าง

ชื่อเรื่อง	การศึกษาประสิทธิภาพการทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์สร้างจากวัสดุที่มีค่าการนำความร้อนต่างกันโดยใช้อากาศเป็นสารทำงาน
ผู้วิจัย	สินีพร จันทร์สว่าง
ประธานที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วราภรณ์ รัตตนงพิสัตย์
ประเภทสารนิพนธ์	วิทยานิพนธ์ วท.ม. สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์, มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2561
คำสำคัญ	ท่อวอร์เท็กซ์ ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิก ความสามารถการทำความเย็น สมรรถนะการทำความเย็น ค่าดัชนีผลกระทบที่มีต่อการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนเทียบเท่าโดยรวม

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบ สร้าง และทดสอบประสิทธิภาพการทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ทำจากวัสดุที่มีค่าการนำความร้อนต่างกัน ได้แก่ ทองเหลืองและสแตนเลส รวมถึงศึกษาการประเมินค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของท่อวอร์เท็กซ์ ในการศึกษาได้ใช้อากาศเป็นสารทำความเย็นจากธรรมชาติ ทำการทดสอบประสิทธิภาพการทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ที่ความดันอากาศคงที่ 1.5 bar และ 3 bar พบว่าชนิดของวัสดุมีผลต่อประสิทธิภาพทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ ทั้งนี้ท่อวอร์เท็กซ์ทองเหลืองที่มีต้นกำเนิดกระแสหมุนวนพลาสติกให้ค่าความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็นสูงสุด 21.6°C และ ค่าความแตกต่างอุณหภูมิอากาศร้อนสูงสุด 30.3°C ซึ่งสูงกว่าท่อวอร์เท็กซ์สแตนเลส 11% และ 10% ตามลำดับ นอกจากนั้นพบว่าท่อวอร์เท็กซ์ทองเหลืองมีประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกสูงสุด 0.27 ความสามารถการทำความเย็นสูงสุด 70.7 W และสมรรถนะการทำความเย็นสูงสุด 0.117 ซึ่งสูงกว่าท่อวอร์เท็กซ์สแตนเลส 11% 18% และ 12% ตามลำดับ ผลการประเมินค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของท่อวอร์เท็กซ์จากค่าดัชนีผลกระทบที่มีต่อการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนเทียบเท่าโดยรวม ท่อวอร์เท็กซ์เป็นอุปกรณ์ที่ไม่ใช้สารทำความเย็นที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมแต่จำเป็นต้องใช้พลังงานไฟฟ้า แต่ถึงอย่างไรท่อวอร์เท็กซ์ที่ใช้อากาศเป็นสารทำความเย็นก็มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่ำกว่าท่อวอร์เท็กซ์ทำความเย็นที่ใช้สารทำความเย็น R134a

Title	A STUDY ON COOLING EFFICIENCY OF VORTEX TUBE MADE FROM DIFFERENT THERMAL CONDUCTIVITY MATERIALS WITH AIR AS WORKING FLUID
Author	Sineeporn Jansawang
Advisor	Assistant Professor Waraporn Rattanongphisat, Ph.D.
Academic Paper	Thesis M.S. in Applied Physics, Naresuan University, 2018
Keywords	Vortex tube, Isentropic efficiency, Cooling capacity, Coefficient of Performance, Total equivalent warming impact

ABSTRACT

This research aims to design, construct and test the cooling efficiency of vortex tube made from different thermal conductivity materials. The materials used in the current study are brass and stainless. The evaluation of greenhouse gas emission from the operating of vortex tube is also investigated. In this study, a compressed air is used as a natural refrigerant. The experimental testing for the cooling efficiency of vortex tube is carried out at the inlet air pressure of 1.5 bar and 3 bar. It has been found that the material type does affect the cooling efficiency of the vortex tube. The results show that a brass vortex tube with plastic vortex generator provided the highest cooling temperature difference of 21.6°C and the highest heating temperature difference of 30.3°C. That are higher than the stainless vortex tube by 11% and 10% respectively. In addition, a brass vortex tube offers the maximum isentropic efficiency of 0.27, cooling capacity of 70.7 W, and coefficient of performance of 0.117 that are higher than the stainless vortex tube by 11%, 18% and 12% respectively. The greenhouse gas emission of vortex tube is analyzed based on the total equivalent warming impact (TEWI). The vortex tube does not need refrigerants that contributes the emission of greenhouse gas; however, the vortex tube requires electrical power to drive the system. The vortex tube with air as the refrigerant has lower global warming impact than the vortex tube with R134a refrigerant

สารบัญ

บทที่		หน้า
1	**บทนำ**	1
	ความเป็นมาของปัญหา	1
	จุดมุ่งหมายของการศึกษา	3
	ขอบเขตของการวิจัย	3
	นิยามศัพท์เฉพาะ	4
	สมมติฐานของการวิจัย	5
2	**เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง**	6
	ท่อวอร์เท็กซ์	6
	ทฤษฎีอธิบายปรากฏการณ์ภายในท่อวอร์เท็กซ์	11
	ประสิทธิภาพการทำงานของท่อวอร์เท็กซ์	17
	ชนิดและผลต่อสิ่งแวดล้อมของสารทำความเย็น	26
	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	32
3	**วิธีดำเนินงานวิจัย**	41
	ขนาดชิ้นส่วนประกอบของท่อวอร์เท็กซ์	42
	โครงสร้างและส่วนประกอบของท่อวอร์เท็กซ์	48
	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	54
	วิธีการทดลอง	58

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
4	**ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล**	60
	คุณลักษณะทางอุณหภูมิของท่อวอร์เท็กซ์	60
	ประสิทธิภาพของท่อวอร์เท็กซ์	65
	การเปรียบเทียบผลการทดลองกับงานวิจัยอื่น	76
	การประเมินค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของท่อวอร์เท็กซ์	78
5	**บทสรุป**	81
	สรุปผลการวิจัย	81
	ข้อเสนอแนะ	82
บรรณานุกรม		83
ภาคผนวก		90
ประวัติผู้วิจัย		98

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
1	ก๊าซเรือนกระจกที่ถูกควบคุมภายใต้พิธีสารเกียวโตและค่า GWP 100.....	29
2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบท่อวอร์เท็กซ์.....	37
3	ค่าการนำความร้อนของวัสดุ.....	47
4	ข้อมูลและขนาดตัวแปรที่ศึกษาในงานวิจัยนี้.....	48
5	ผลการบันทึกข้อมูลอุณหภูมิด้วยเครื่องบันทึกข้อมูลสำหรับชุดทดสอบท่อวอร์เท็กซ์ที่ทำจากสแตนเลสและทองเหลือง ที่ติดตั้งต้นกำเนิดกระแสหมุนวนพลาสติก ทดสอบที่ความดันอากาศ 3 bar.....	91
6	ผลการบันทึกและการคำนวณผลเมื่อความแตกต่างอุณหภูมิคงที่ ณ เวลา 10 นาที ของชุดทดสอบท่อวอร์เท็กซ์ที่ทำจากสแตนเลส.....	97
7	ผลการบันทึกและการคำนวณผลเมื่อความแตกต่างอุณหภูมิคงที่ ณ เวลา 10 นาที ของชุดทดสอบท่อวอร์เท็กซ์ที่ทำจากทองเหลือง.....	97

สารบัญภาพ

ภาพ		หน้า
1	ลักษณะรูปร่างและการทำงานของท่อวอร์เท็กซ์	1
2	ลักษณะการเกิดกระแสหมุนวนภายในท่อวอร์เท็กซ์	6
3	ท่อวอร์เท็กซ์แบบไหลสวนทางกัน	7
4	ท่อวอร์เท็กซ์แบบไหลไปทางเดียวกัน	8
5	เสื้อทำความเย็นจากท่อวอร์เท็กซ์	10
6	การทำความเย็นสำหรับการกลึงชิ้นงาน	10
7	การทำความเย็นสำหรับตู้ควบคุมไฟฟ้าที่มีแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์	11
8	อัตราการถ่ายเทพลังงานต่อความยาวท่อ	13
9	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแปรผันตามสัดส่วนขนาดท่อร้อน	15
10	อุณหภูมิทางเข้า อุณหภูมิปลายท่อเย็น และอุณหภูมิปลายท่อร้อนของท่อวอร์เท็กซ์ที่ใช้น้ำเป็นของไหลทำงาน	15
11	การไหลวนของของไหลภายในท่อวอร์เท็กซ์	17
12	กระบวนการลดความดัน	19
13	ลักษณะการไหลของของไหลผ่านหัวฉีด	20
14	หัวฉีดแบบลู่เข้า	21
15	หัวฉีดแบบบานออก	21
16	หัวฉีดแบบลู่เข้า-บานออก	22
17	แผนภาพเอนทาลปี-เอนโทรปีของกระบวนการที่เกิดขึ้นในหัวฉีด	22
18	การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของการใช้ไฟฟ้าในแต่ละภูมิภาค	31
19	การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อหน่วยการผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย	32
20	แผนผังขั้นตอนการดำเนินงาน	41
21	ความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็นและประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของท่อวอร์เท็กซ์มีหัวฉีดเท่ากับ 6	42

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ		หน้า
22	(ซ้าย) ความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็น (ขวา) ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกต่อสัดส่วนของช่องอากาศเย็น	43
23	ความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ที่มีขนาดช่องอากาศเย็นใกล้เคียงกันเท่ากับ 0.5 ถึง 0.56	44
24	ความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็นและอากาศร้อนของท่อวอร์เท็กซ์ที่มีสัดส่วนขนาดท่อร้อนเท่ากับ 17.5 ถึง 20	46
25	โครงสร้างและส่วนประกอบของท่อวอร์เท็กซ์	48
26	ปลายท่อเย็น	49
27	ต้นกำเนิดกระแสหมุนวน	49
28	จานรอง	50
29	ห้องสร้างกระแสหมุนวน	50
30	ทางเข้าของอากาศ	51
31	ท่อร้อน	51
32	ข้อต่อปรับขนาด	52
33	วาล์วควบคุม	52
34	ตัวล็อค	53
35	ท่อวอร์เท็กซ์จริงที่ใช้ทดสอบ	53
36	ชุดปรับอากาศและกรองอากาศ	54
37	โรตามิเตอร์	55
38	เครื่องบันทึกข้อมูล	55
39	เทอร์โมคัปเปิล ชนิดเค	56
40	เกจวัดความดัน	56
41	ปั๊มลม	57

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ		หน้า
42	แผนผังระบบทดสอบการทำงานของท่อวอร์เท็กซ์.....	58
43	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศทางเข้าและทางออกท่อวอร์เท็กซ์กับเวลา....	60
44	การเปลี่ยนแปลงค่าความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็นเทียบกับเวลา.....	61
45	การเปลี่ยนแปลงค่าความแตกต่างอุณหภูมิอากาศร้อนเทียบกับเวลา.....	62
46	ค่าความแตกต่างอุณหภูมิอากาศตามสัดส่วนมวลอากาศเย็น.....	63
47	ความดันอากาศขาเข้าต่อการแยกชั้นอุณหภูมิอากาศของท่อวอร์เท็กซ์ทองเหลือง.....	64
48	ความดันอากาศขาเข้าต่อการแยกชั้นอุณหภูมิอากาศของท่อวอร์เท็กซ์สแตนเลส.....	65
49	ความแตกต่างอุณหภูมิอากาศของท่อวอร์เท็กซ์ทองเหลืองและสแตนเลสทั้งชุด ที่ความดันอากาศ 1.5 bar.....	66
50	ความแตกต่างอุณหภูมิอากาศของท่อวอร์เท็กซ์ทองเหลืองและสแตนเลสทั้งชุด ที่ความดันอากาศ 3 bar.....	67
51	ความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็นของต้นกำเนิดกระแสหมุนวนทองเหลืองและพลาสติก.....	68
52	ความแตกต่างอุณหภูมิอากาศของท่อวอร์เท็กซ์ที่ทำจากทองเหลือง.....	69
53	ความแตกต่างอุณหภูมิอากาศของท่อวอร์เท็กซ์ที่ทำจากสแตนเลส.....	69
54	ความแตกต่างอุณหภูมิอากาศของท่อวอร์เท็กซ์ ที่มีต้นกำเนิดกระแสหมุนวนพลาสติก ที่ความดันอากาศ 1.5 bar.....	70
55	ความแตกต่างอุณหภูมิอากาศของท่อวอร์เท็กซ์ ที่มีต้นกำเนิดกระแสหมุนวนพลาสติก ที่ความดันอากาศ 3 bar.....	71

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ		หน้า
56	ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของท่อวอร์เท็กซ์ ทดสอบที่ความดันอากาศ 3 bar.	72
57	ความสามารถการทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ทดสอบ ที่ความดันอากาศ 3 bar.....	73
58	สมรรถนะการทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ ทดสอบที่ความดันอากาศ 3 bar.	74
59	การลดลงของความดันอากาศปกติที่มีผลต่อการแยกชั้นอุณหภูมิอากาศ.....	76
60	ความสัมพันธ์ที่คล้ายกันตามฟังก์ชันของสัดส่วนมวลอากาศ.....	77

อักษรย่อ

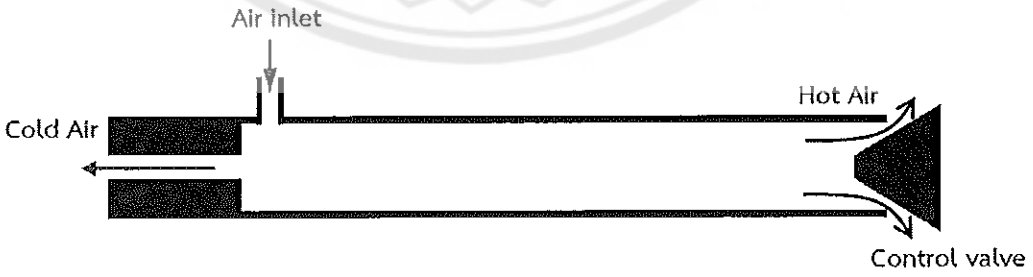
T_{in}	=	อุณหภูมิอากาศทางเข้าท่อ
T_c	=	อุณหภูมิอากาศปลายท่อเย็น
T_h	=	อุณหภูมิอากาศปลายท่อร้อน
ΔT_c	=	ความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็น
ΔT_h	=	ความแตกต่างอุณหภูมิอากาศร้อน
P_{in}	=	ความดันอากาศขาเข้า
P_{atm}	=	ความดันบรรยากาศ
k	=	อัตราส่วนความร้อนจำเพาะของอากาศ
CF	=	สัดส่วนมวลอากาศเย็น
COP	=	สมรรถนะการทำความเย็น
L/D	=	ความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง
TEWI	=	ค่าดัชนีผลกระทบที่มีต่อการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนเทียบเท่าโดยรวม
GWP	=	ค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน
CO_2	=	ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
W	=	วัตต์
mm	=	มิลลิเมตร

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาของปัญหา

ท่อวอร์เท็กซ์ (vortex tube) เป็นอุปกรณ์ทำความเย็นชนิดหนึ่งที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มีลักษณะเฉพาะตัวคือสามารถผลิตอากาศร้อนและอากาศเย็นได้ในเวลาพร้อมกัน สามารถทำงานได้โดยการป้อนของไหลที่มีความดันสูงเข้าไปในท่อวอร์เท็กซ์ ของไหลที่ใช้คืออากาศ อุณหภูมิอากาศปกติที่ใส่เข้าไปในท่อ เกิดการหมุนวนของกระแสอากาศคล้ายกับสปริง หลังจากนั้นเกิดการแยกชั้นของอุณหภูมิอากาศร้อนและอากาศเย็นออกจากกัน ท่อวอร์เท็กซ์จะมีปลายท่อ 2 ด้าน ลักษณะของท่อวอร์เท็กซ์แสดงในภาพ 1 อากาศร้อนหรืออากาศที่มีอุณหภูมิสูงจะไหลออกจากท่อด้านขวา ส่วนอากาศเย็นหรืออากาศที่มีอุณหภูมิต่ำจะไหลออกที่ปลายท่อด้านซ้าย ท่อวอร์เท็กซ์เป็นอุปกรณ์ที่เหมาะสำหรับการทำความเย็นเฉพาะจุด เนื่องจากช่องที่ปลายท่อทางออกมีขนาดเล็ก เหมาะสำหรับการทำความเย็นที่มีขนาดไม่ใหญ่เกินไป เช่น การเป่าให้ความเย็นกับตู้ควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ที่มีอุณหภูมิสูงให้มีอุณหภูมิลดลง การเป่าให้ความเย็นกับชิ้นงานที่มีการตัดหรือการเจาะโลหะซึ่งได้รับความร้อนที่สูง อีกทั้งท่อวอร์เท็กซ์ยังมีขนาดเล็ก แข็งแรง กะทัดรัด มีน้ำหนักเบา จึงสะดวกต่อการใช้งาน และขณะทำงานภายในท่อวอร์เท็กซ์ไม่มีชิ้นส่วนใดเคลื่อนที่ ทำให้ลดการดูแลและการบำรุงรักษา ด้วยข้อดีของท่อวอร์เท็กซ์จึงทำให้ท่อวอร์เท็กซ์เป็นอุปกรณ์ทำความเย็นชนิดหนึ่งที่ได้รับความสนใจจากผู้สนใจศึกษาหลายท่าน (วราภรณ์ รัตตนงพิสัตย์, 2011)



ภาพ 1 ลักษณะรูปร่างและการทำงานของท่อวอร์เท็กซ์

ที่มา: Eiamsa-ard, & Promvonge, 2008

อุปกรณ์ทำความเย็นที่ใช้งานทั่วไปมีหลายชนิด เช่น ตู้เย็น ตู้แช่ เครื่องปรับอากาศ หรือแม้กระทั่งการทำความเย็นในโรงงานอุตสาหกรรม สารทำความเย็นที่ใช้ในปัจจุบันประกอบด้วยสารคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (Chlorofluorocarbon หรือ CFC) ซึ่งเป็นสารที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก ส่งผลให้ชั้นบรรยากาศของโลกมีอุณหภูมิสูงขึ้นในระดับที่แตกต่างกันตามส่วนประกอบของสารที่ส่งผลกระทบต่อชั้นบรรยากาศ โดยพิจารณาจากค่าศักยภาพในการเกิดภาวะโลกร้อน (Global Warming Potential หรือ GWP) ในการทำงานท่อวอร์เท็กซ์จะไม่ใช้สารทำความเย็นที่เป็นอันตราย แต่สามารถใช้อากาศเป็นสารทำความเย็น โดยทำให้เกิดปรากฏการณ์การแยกชั้นอากาศในท่อวอร์เท็กซ์ เช่นเดียวกับ ไนโตรเจน ออกซิเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งถือได้ว่าท่อวอร์เท็กซ์เป็นอุปกรณ์ทำความเย็นชนิดหนึ่งที่ไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

หากกล่าวถึงอุปกรณ์ทำความเย็นที่ไม่มีการใช้สารทำความเย็นที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเช่นเดียวกับท่อวอร์เท็กซ์ วัสดุเทอร์โมอิเล็กตริกเป็นอีกแหล่งพลังงานทางเลือกหนึ่งที่สะอาดและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำที่สามารถผลิตไฟฟ้าได้เมื่อเกิดความแตกต่างของด้านที่มีอุณหภูมิสูงและต่ำ แต่ถ้าหากมีการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในตัววัสดุเทอร์โมอิเล็กตริก จะสามารถผันกลับทำให้เกิดด้านที่เกิดความร้อนและความเย็นได้ด้วย วัสดุเทอร์โมอิเล็กตริก มีลักษณะเป็นแผ่นโลหะกึ่งตัวนำสองด้าน ด้านหนึ่งสร้างความเย็นและอีกด้านหนึ่งสร้างความร้อน ทำงานได้โดยการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไปในวัสดุ มีการนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นกระติกเก็บวัคซีนด้วยอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กตริก ช่วยรักษาอุณหภูมิที่เหมาะสมกับวัคซีนเคลื่อนย้ายได้ง่าย (วิรัช กองสิน, 2557) แต่ถึงอย่างไรก็ตาม ท่อวอร์เท็กซ์ยังเป็นอุปกรณ์ทำความเย็นที่ได้เปรียบกว่าวัสดุเทอร์โมอิเล็กตริกเนื่องจากสามารถทำความเย็นเฉพาะจุดได้ดีกว่า

การทำงานของท่อวอร์เท็กซ์ที่ไม่ซับซ้อน เพียงการป้อนอากาศที่มีความดันสูงเข้าไปในท่อก็สามารถทำความเย็นได้ ได้มีนักวิจัยหลายท่านเล็งเห็นประโยชน์และความสามารถของท่อวอร์เท็กซ์ โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่หนึ่งสนใจศึกษาเพื่อการพัฒนาประสิทธิภาพของท่อวอร์เท็กซ์ให้มีประสิทธิภาพการทำงานดีขึ้น และส่วนที่สองศึกษาเพื่อนำท่อวอร์เท็กซ์ไปประยุกต์ใช้งาน ในงานวิจัยส่วนใหญ่มีการพัฒนาท่อวอร์เท็กซ์อย่างต่อเนื่อง จากบทความวิจัยท่อวอร์เท็กซ์ของ Eiamsa-ard, & Promvonge (2008) พบว่าประสิทธิภาพของท่อวอร์เท็กซ์ ขึ้นอยู่กับตัวแปรหลักสองกลุ่ม กลุ่มแรกคือตัวแปรทางกายภาพ (Thermo-physical parameters) เช่น ความดันที่ป้อน ชนิดของของไหล สัดส่วนมวลอากาศเย็น และกลุ่มที่สองคือลักษณะรูปทรงทางเรขาคณิตของชิ้นส่วนประกอบท่อวอร์เท็กซ์ (Geometrical characteristics) เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของท่อร้อนและท่อเย็น เส้นผ่านศูนย์กลางช่องอากาศเย็น รูปร่างของท่อ

ร้อน จำนวนหัวฉีด รูปร่างของหัวฉีด และรูปร่างของวาล์วควบคุมอัตราการไหลอากาศ เป็นต้น เมื่อท่อวอร์เท็กซ์มีประสิทธิภาพการทำงานที่ดี จะส่งผลทำให้ความสามารถในการทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์สูงขึ้นและยังช่วยให้อุณหภูมิที่ปล่อยออกจากท่อเย็นลดลงด้วย

งานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เห็นถึงประโยชน์ของท่อวอร์เท็กซ์ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สามารถทำความเย็นและเป็นอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็ก การทำงานง่าย ไม่ซับซ้อน ท่อวอร์เท็กซ์ในปัจจุบันเป็นอุปกรณ์ที่มีราคาค่อนข้างสูง และส่วนมากถูกผลิตขึ้นสำหรับเป็นสินค้าเชิงพาณิชย์ เพื่อเป็นการลดต้นทุนในการสร้างท่อวอร์เท็กซ์ และเพื่อให้ท่อวอร์เท็กซ์มีประสิทธิภาพการทำงานที่ดี จากงานวิจัยที่ได้ศึกษามาก่อนหน้านี้ พบว่าวัสดุที่นำมาทำท่อวอร์เท็กซ์มีส่วนประกอบหลักทำจากวัสดุหลายชนิด ได้แก่ สแตนเลส ทองเหลือง ทองแดง อะลูมิเนียม พลาสติก ซึ่งในหลายงานวิจัยมีการใช้วัสดุที่แตกต่างกัน อีกทั้งยังมีขนาดและลักษณะที่แตกต่างกันด้วย ถือว่ายากต่อการนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของท่อวอร์เท็กซ์ ดังนั้นงานวิจัยนี้สนใจศึกษาประสิทธิภาพการทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ โดยเน้นไปที่การศึกษาชนิดวัสดุที่นำมาสร้างท่อวอร์เท็กซ์ ระหว่างท่อวอร์เท็กซ์ที่ทำจากสแตนเลส ซึ่งเป็นวัสดุที่มีการนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมการผลิตท่อวอร์เท็กซ์ เปรียบเทียบกับท่อวอร์เท็กซ์ที่ทำจากทองเหลือง ซึ่งเป็นวัสดุที่มีค่าการนำความร้อนสูงกว่าสแตนเลส อีกทั้งยังเป็นวัสดุที่ได้รับความสนใจนำมาทดสอบประสิทธิภาพจากนักวิจัยหลายท่าน ในการสร้างท่อวอร์เท็กซ์ จะอ้างอิงข้อมูลขนาด สัดส่วน ของชิ้นส่วนประกอบที่สำคัญของท่อวอร์เท็กซ์จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบสร้างท่อวอร์เท็กซ์

จุดมุ่งหมายของการศึกษา

1. เพื่อออกแบบสร้างท่อวอร์เท็กซ์ และทดสอบประสิทธิภาพการทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ที่ทำจากสแตนเลสและทองเหลือง
2. เพื่อศึกษาการประเมินค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของท่อวอร์เท็กซ์

ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับการทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ สำหรับอ้างอิงการออกแบบและสร้างท่อวอร์เท็กซ์
2. สร้างชิ้นส่วนประกอบทั้งหมดของท่อวอร์เท็กซ์ ที่ทำจากวัสดุต่างกัน 2 ชนิด ได้แก่ ทองเหลืองทั้งชุด และสแตนเลสทั้งชุด
3. ทดสอบการทำงานของท่อวอร์เท็กซ์โดยใช้อากาศเป็นสารทำความเย็น

4. ทดสอบประสิทธิภาพการทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ ที่ความดันอากาศ 1.5 bar และ 3 bar และทำการปรับค่าสัดส่วนมวลอากาศเย็นต่างกัน

5. ศึกษาอุณหภูมิอากาศขาเข้าที่ป้อนเข้าไปในท่อวอร์เท็กซ์ภายใต้สภาวะแวดล้อมจริง และไม่พิจารณาความชื้นของอากาศ

6. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ที่ทำจากทองเหลืองและสแตนเลส

7. ประเมินค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของท่อวอร์เท็กซ์ที่ใช้สารทำความเย็นจากธรรมชาติเปรียบเทียบกับระบบทำความเย็นที่ใช้สารทำความเย็นอื่น ซึ่งเป็นสารทำงานที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยการพิจารณาการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากค่าผลกระทบรวมของค่าดัชนีผลกระทบที่มีต่อการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนเทียบเท่าโดยรวม (Total Equivalent Warming Impact หรือ TEWI)

นิยามศัพท์เฉพาะ

1. ท่อวอร์เท็กซ์เป็นอุปกรณ์ทำความเย็นชนิดหนึ่ง ที่สามารถผลิตกระแสอากาศร้อนและกระแสอากาศเย็นได้ภายในเวลาพร้อมกัน ทำงานโดยการอัดอากาศที่มีความดันสูงเข้าไปภายในท่อ

2. สารทำความเย็นธรรมชาติ คือสารทำงานชนิดหนึ่งที่ได้จากธรรมชาติ ใช้สำหรับระบบทำความเย็น ซึ่งจะไม่มีผลก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกหรือเรียกได้ว่าเป็นสารทำความเย็นที่มีค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (GWP) เท่ากับ 0 ซึ่งสารทำความเย็นจากธรรมชาติมีหลายชนิด เช่น น้ำ อากาศ ไนโตรเจน ออกซิเจน แอมโมเนีย ในการวิจัยนี้จะใช้อากาศเป็นสารทำความเย็นสำหรับท่อวอร์เท็กซ์

3. ความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็น คือความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศที่ป้อนเข้าไปในท่อและอุณหภูมิอากาศปลายท่อเย็นของท่อวอร์เท็กซ์

4. ความแตกต่างอุณหภูมิอากาศร้อน คือความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศปลายท่อร้อนและอุณหภูมิอากาศที่ป้อนเข้าไปในท่อวอร์เท็กซ์

5. ค่าสัดส่วนมวลอากาศเย็น คือตัวแปรที่บอกถึงประสิทธิภาพของท่อวอร์เท็กซ์ สามารถหาได้จากอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของมวลอากาศเย็นต่ออัตราการไหลของมวลอากาศที่ป้อนเข้าไปในท่อวอร์เท็กซ์

6. ประสิทธิภาพการทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ สามารถพิจารณาได้จากประสิทธิภาพไอเซนโทรปิก ความสามารถการทำความเย็น และสมรรถนะการทำความเย็น

7. การประเมินค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของท่อวอร์เท็กซ์ สามารถพิจารณาจากค่าดัชนีผลกระทบที่มีต่อการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนเทียบเท่าโดยรวม (Total Equivalent Warming Impact หรือ TEWI) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงผลกระทบรวมที่มีต่อภาวะโลกร้อน เป็นผลกระทบทางตรงจากการใช้สารทำความเย็น และผลกระทบทางอ้อมจากการใช้ไฟฟ้าในการทำงาน

สมมติฐานของการวิจัย

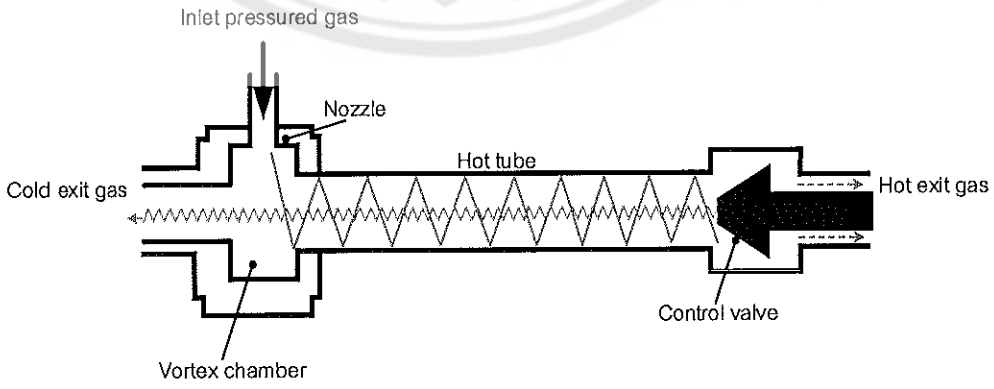
ท่อวอร์เท็กซ์ที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นจากวัสดุต่างกันสองชนิด ระหว่างวัสดุที่ทำจากทองเหลืองและสแตนเลสสามารถผลิตอากาศร้อนและอากาศเย็นได้ ท่อวอร์เท็กซ์ที่ทำจากทองเหลืองมีประสิทธิภาพการทำความเย็นดีกว่าท่อวอร์เท็กซ์ที่ทำจากสแตนเลสซึ่งเป็นวัสดุที่มีค่าการนำความร้อนต่ำกว่า และท่อวอร์เท็กซ์ที่ใช้อากาศเป็นสารทำความเย็นมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่ำกว่าการใช้สารทำความเย็นอื่นเป็นสารทำงาน

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ท่อวอร์เท็กซ์ (Vortex tube)

ท่อวอร์เท็กซ์หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ท่อแรงคิว-ฮีลช์วอร์เท็กซ์ (Ranque-Hilsch vortex tube) เป็นท่อที่มีลักษณะเรียบง่าย ภายในลำท่อเกิดการแยกชั้นของกระแสอากาศร้อนและกระแสอากาศเย็นออกจากกันได้ภายในเวลาเดียวกัน ถูกค้นพบครั้งแรกในปี 1933 โดยนักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศสชื่อ แรงคิว ในช่วงแรกท่อวอร์เท็กซ์มีประสิทธิภาพต่ำมากจึงไม่ได้รับความสนใจและยังไม่เป็นที่รู้จักของนักวิจัย ต่อมาได้มีนักฟิสิกส์ชาวเยอรมันชื่อ ฮิลช์ ศึกษาการทำงานของท่อวอร์เท็กซ์ด้วยการสร้างท่อวอร์เท็กซ์ที่มีลักษณะโครงสร้าง ขนาด ชิ้นส่วนเป็นตัวแปรที่มีผลต่อสมรรถนะของท่อ ผลการศึกษาของฮิลช์สามารถนำมาใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ท่อวอร์เท็กซ์จึงเป็นที่รู้จักมากขึ้น ท่อวอร์เท็กซ์ถูกตั้งชื่อตามผู้คิดค้นและลักษณะการเกิดกระแสหมุนวนภายในท่อ ดังภาพ 2 ท่อมีลักษณะรูปทรงกระบอกคล้ายตัวที การทำงานเริ่มจากอากาศที่มีความดันสูงถูกป้อนเข้าไปในท่อ อากาศไหลผ่านหัวฉีดหรือนอสเซิล เกิดกระแสหมุนวนของอากาศคล้ายสปริงไหลไปตามลำท่อ กระแสอากาศร้อนจะเคลื่อนที่ไปรอบผิวด้านในซึ่งใกล้กับผนังและไหลไปตามลำท่อร้อน อากาศส่วนหนึ่งเป็นกระแสอากาศร้อนได้ไหลออกไปที่ปลายท่อร้อนที่มีวาล์วควบคุมติดตั้งอยู่ทางด้านขวาของภาพ ส่วนอากาศบริเวณแกนกลางลำท่อจะมีอุณหภูมิต่ำกว่า ไหลไปชนกับพื้นที่หน้าตัดของวาล์วควบคุม แล้วไหลกลับไปที่หัวฉีดอีกครั้ง โดยมีช่องอากาศขนาดเล็กสำหรับปล่อยกระแสอากาศเย็นออกไปที่ปลายท่อด้านซ้ายของภาพ 2

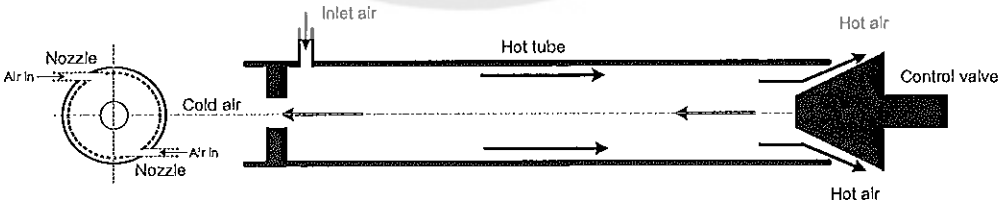


ภาพ 2 ลักษณะการเกิดกระแสหมุนวนภายในท่อวอร์เท็กซ์

1. รูปแบบของท่อวอร์เท็กซ์

โดยทั่วไปแล้วท่อวอร์เท็กซ์สามารถแบ่งประเภทตามลักษณะการไหลออกเป็น 2 แบบ คือท่อวอร์เท็กซ์แบบไหลสวนทางกันและท่อวอร์เท็กซ์แบบไหลไปทางเดียวกัน ลักษณะของแต่ละรูปแบบแสดงดังภาพ 3 และภาพ 4 ตามลำดับ

1.1 ท่อวอร์เท็กซ์แบบไหลสวนทางกัน (Counter flow vortex tube) หมายถึงกระแสอากาศที่เกิดขึ้นภายในท่อวอร์เท็กซ์มีการไหลออกจากปลายท่อคนละทาง ซึ่งกระแสอากาศร้อนไหลไปตามลำท่อร้อนแล้วถูกปล่อยออกที่ปลายท่อด้านขวา และกระแสอากาศเย็นไหลออกไปที่ปลายท่อด้านซ้าย ลักษณะของท่อวอร์เท็กซ์แบบไหลสวนทางกันแสดงในภาพ 3 ประกอบไปด้วยทางเข้าของอากาศที่อยู่ติดกับหัวฉีดและมีช่องอากาศอยู่ตรงกลาง ท่อร้อน และวาล์วควบคุม เมื่ออากาศที่มีความดันสูงถูกอัดเข้าไปในท่อในแนวสัมผัสผ่านหัวฉีดที่มีช่องสำหรับอากาศเข้ามากกว่าหรือเท่ากับหนึ่งที่ความเร็วสูง อากาศที่เข้าไปในท่อจะเกิดการหมุนขึ้นอย่างรวดเร็ว อากาศจะไหลไปตามลำท่อมากกว่าที่จะไหลออกไปที่ช่องอากาศ เพราะช่องอากาศที่อยู่ติดกับหัวฉีดมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับขนาดท่อ ขณะที่อากาศกระจายตัวไปตามลำท่อ ความดันอากาศลดลงอย่างรวดเร็วซึ่งมีค่าสูงกว่าความดันบรรยากาศเพียงเล็กน้อย และความเร็วของอากาศมีค่าเข้าใกล้กับความเร็วเสียง อากาศจะไหลไปที่ปลายท่อด้านขวา ปริมาณอากาศส่วนหนึ่งซึ่งเป็นกระแสอากาศร้อนจะไหลออกไปที่ปลายท่อด้านร้อนซึ่งมีวาล์วควบคุมติดตั้งอยู่ ซึ่งสามารถปรับปริมาณการไหลของอากาศได้ที่วาล์วควบคุม อากาศส่วนที่เหลือจะไหลกลับมาตามแกนกลางของท่อ ซึ่งจะมีลักษณะเป็นกระแสการไหลของอากาศแบบสวนทางกับกระแสอากาศร้อน หลังจากนั้นกระแสอากาศที่อยู่บริเวณแกนกลางท่อซึ่งเป็นอากาศเย็นจะไหลออกไปที่ปลายท่อด้านขวาผ่านช่องอากาศที่อยู่ตรงกลางของหัวฉีด (Eiamsa-ard, & Promvonge, 2008)



ภาพ 3 ท่อวอร์เท็กซ์แบบไหลสวนทางกัน

ที่มา: Eiamsa-ard, & Promvonge, 2008

1.2 ท่อวอร์เท็กซ์แบบไหลไปทางเดียวกัน (Uni-flow vortex tube) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าแบบไหลขนานกัน คือกระแสอากาศร้อนและกระแสอากาศเย็นไหลไปในทิศทางเดียวกัน แต่ทั้งสองกระแสอากาศมีการไหลออกจากท่อคนละช่อง โดยที่อากาศร้อนจะไหลออกไปตามผิวด้านข้างของวาล์วควบคุม และอากาศเย็นจะไหลออกไปยังช่องตรงกลางของวาล์วควบคุม ถูกแสดงลักษณะในภาพ 4 ซึ่งประกอบด้วยทางเข้าของอากาศที่อยู่ติดกับหัวฉีด ท่อร้อน และวาล์วควบคุมอากาศที่มีช่องอากาศอยู่ตรงกลาง ซึ่งจะไม่เหมือนกับท่อวอร์เท็กซ์แบบไหลสวนทางกัน ทางออกของอากาศเย็นจะเป็นช่องวงกลมตรงกลางของวาล์วควบคุม การทำงานของท่อวอร์เท็กซ์แบบไหลไปทางเดียวจะทำงานเหมือนกับท่อวอร์เท็กซ์แบบไหลสวนทางกัน (Eiamsa-ard, & Promvonge, 2008)

ภาพ 4 ท่อวอร์เท็กซ์แบบไหลไปทางเดียวกัน

ที่มา: Eiamsa-ard, & Promvonge, 2008

ท่อวอร์เท็กซ์ทั้งสองรูปแบบถูกนำไปใช้งานในอุตสาหกรรม โดยที่ท่อวอร์เท็กซ์แบบไหลสวนทางเป็นรูปแบบมาตรฐาน มีการนำมาใช้งานสำหรับการประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถปล่อยกระแสอากาศร้อนและกระแสอากาศเย็นได้อย่างชัดเจนที่ปลายท่อคนละด้าน โดยทั่วไปรูปแบบการไหลทางเดียวกันจะมีประสิทธิภาพต่ำเมื่อเทียบกับรูปแบบการไหลสวนทางกัน (Ameen, 2006)

2. ส่วนประกอบของท่อวอร์เท็กซ์

ชิ้นส่วนสำคัญของท่อวอร์เท็กซ์ ที่สามารถทำให้ท่อวอร์เท็กซ์ทำงานผลิตความร้อนและความเย็นได้ มีส่วนประกอบหลักดังนี้

2.1 ต้นกำเนิดกระแสหมุนวน (Vortex generator) เป็นชิ้นส่วนประกอบสำคัญของท่อวอร์เท็กซ์ ต้นกำเนิดกระแสหมุนวนมีช่องของหัวฉีดหรือนอสเซิล (Nozzle) สำหรับให้อากาศไหลผ่านได้ ตำแหน่งของหัวฉีดแสดงในด้านซ้ายของภาพ 2 ติดตั้งบริเวณห้องสร้างกระแสหมุนวน

อากาศที่ถูกอัดเข้าไปในท่อวอร์เท็กซ์จะไหลผ่านหัวฉีด ทำให้เกิดกระแสหมุนวนของอากาศขึ้น มีลักษณะเป็นวงกลมคล้ายสปริง โดยทั่วไปหัวฉีดที่นำมาศึกษากับท่อวอร์เท็กซ์จะมีตั้งแต่ 1 หัวฉีดขึ้นไป นอกจากนั้นต้นกำเนิดกระแสหมุนวนยังมีช่องอากาศอยู่ตรงกลางเรียกว่า ช่องอากาศเย็น ซึ่งทำหน้าที่ปล่อยกระแสอากาศเย็นออกไปยังปลายท่อ

2.2 ท่อร้อน (Hot tube) เป็นชิ้นส่วนที่อยู่ติดกับห้องสร้างกระแสหมุนวน มีการลำเลียงอากาศไปตามลำท่อ แสดงลักษณะและตำแหน่งของท่อร้อนในภาพ 2 ซึ่งเป็นบริเวณที่มีการเกิดการแยกชั้นของกระแสอากาศร้อนและอากาศเย็นออกจากกัน จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่ามีการเกิดความเสียดทานของอากาศและผนังภายในท่อ จึงทำให้อุณหภูมิอากาศที่ใกล้กับผนังท่อร้อนสูงขึ้น

2.3 วาล์วควบคุม (Control valve) เป็นชิ้นส่วนประกอบหนึ่งถูกติดตั้งบริเวณปลายท่อด้านร้อน ตำแหน่งด้านขวาของภาพ 2 หลังจากเกิดกระแสหมุนวนภายในท่อวอร์เท็กซ์ กระแสอากาศที่อยู่รอบผิวท่อร้อนถูกปล่อยออกไปที่ปลายท่อด้านที่มีวาล์วควบคุม โดยมีช่องว่างสำหรับให้อากาศร้อนไหลออกไปนอกท่อได้ นอกจากนั้นวาล์วควบคุมยังทำหน้าที่ให้กระแสอากาศที่อยู่บริเวณแกนกลางท่อไหลย้อนกลับไปที่ช่องอากาศเย็นของต้นกำเนิดกระแสหมุนวน ซึ่งสามารถควบคุมปริมาณอากาศที่ไหลออกจากท่อได้ด้วยการหมุนวาล์วควบคุมที่ปลายท่อตามที่ต้องการ

3. **การประยุกต์ใช้งานท่อวอร์เท็กซ์**

Reddy et al. (2013) ได้ทำการทดลองนำอากาศเย็นที่ได้จากท่อวอร์เท็กซ์ไปติดตั้งใช้งานจริงกับรถยนต์ส่วนบุคคล ทดสอบโดยใช้อากาศที่มีความดัน 2 bar อัดเข้าไปภายในท่อวอร์เท็กซ์และปล่อยอากาศเย็นให้กับห้องโดยสารรถยนต์ พบว่าท่อวอร์เท็กซ์สามารถลดอุณหภูมิที่ออกจากปลายท่อเย็นได้สูงสุด 7°C ที่ค่าสัดส่วนมวลอากาศเย็น 0.74 และท่อวอร์เท็กซ์มีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ 0.34

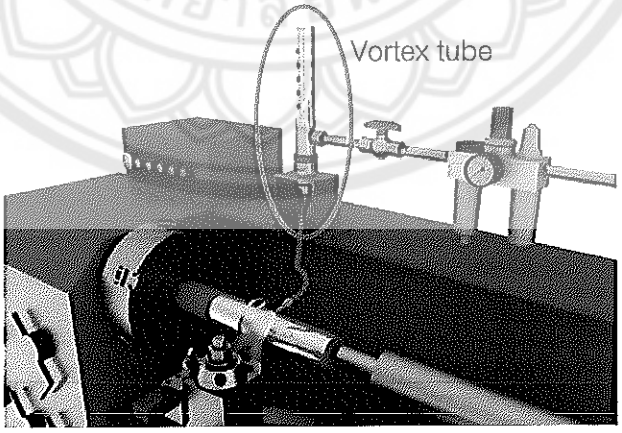
Duspara et al. (2013) ได้ศึกษาการนำท่อวอร์เท็กซ์ไปประยุกต์ให้ความเย็นกับเครื่องมือการกลึงพบว่าอุณหภูมิความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ช่วยยืดอายุการทำงานของเครื่องมือได้ยาวนานขึ้นและช่วยให้ชิ้นงานที่ได้จากการตัดกลึงเสียหายน้อยลงอีกด้วย

Xiaojie Zhai (2017) ได้ศึกษาถึงความเหมาะสมของการประยุกต์ใช้งานท่อวอร์เท็กซ์เข้ากับเสื้อระบายความร้อนสำหรับทำงานในเหมืองแร่ถ่านหิน โดยได้ทำการสร้างแบบจำลองทางตัวเลขเพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของร่างกายคนงานในเหมืองแร่ พบว่าท่อวอร์เท็กซ์มีโอกาสที่จะสามารถนำไปใช้งานได้ เพราะใช้หลักการทำงานที่ง่าย สะดวกในการพกพา อีกทั้งการทำงานยังมีความคงที่และคงทน

สินีพร จันทร์สว่าง, และวราภรณ์ รัตตนงพิสัตย์ (2560) ได้ศึกษาการนำอากาศเย็นจากท่อวอร์เท็กซ์ สำหรับลดอุณหภูมิภายในตู้ทดลองที่มีโหลดความร้อน พบว่าท่อวอร์เท็กซ์สามารถทำความเย็นได้สูงสุด 70 W และสามารถลดอุณหภูมิจากทางเข้าไปที่ปลายท่อได้สูงสุด 27°C เมื่อให้โหลดความร้อนทำงานพบว่าภายในตู้ทดลองมีอุณหภูมิสูงขึ้น 1.1°C /นาที ขณะที่ให้ความเย็นจากท่อวอร์เท็กซ์ทำงานพร้อมกับโหลดความร้อน พบว่าความเย็นจากท่อวอร์เท็กซ์ช่วยลดอุณหภูมิภายในตู้ให้เพิ่มขึ้นช้าลง โดยมีอัตราการเพิ่มขึ้นเหลือเพียง 0.6°C /นาที นั่นแสดงให้เห็นว่าความเย็นจากท่อวอร์เท็กซ์ช่วยในการลดความร้อนภายในตู้ทดลองได้

ภาพ 5 เสื้อทำความเย็นจากท่อวอร์เท็กซ์

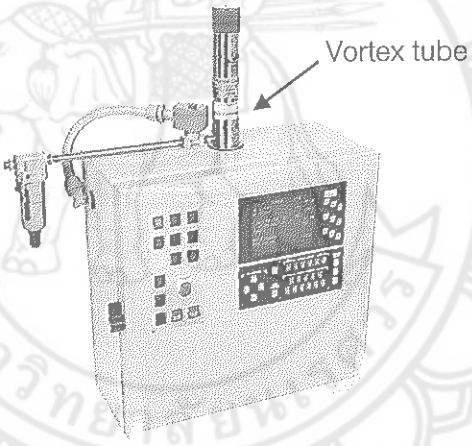
ที่มา: Xiaojie Zhai, 2017



ภาพ 6 การทำความเย็นสำหรับการกลึงชิ้นงาน

ที่มา: AIRMASTER, 2019

ท่อวอร์เท็กซ์มีลักษณะเด่นคือเป็นอุปกรณ์ที่ไม่มีชิ้นส่วนใดเคลื่อนที่ได้และง่ายต่อการนำไปใช้งาน ท่อวอร์เท็กซ์มีการนำไปใช้เป็นอุปกรณ์ทำความเย็นในเครื่องบิน ชุดอวกาศและในเหมืองแร่ ท่อวอร์เท็กซ์ผลิตในเชิงพาณิชย์สำหรับธุรกิจการทำความเย็น มีการนำท่อวอร์เท็กซ์ไปใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย เช่น การนำความเย็นจากท่อวอร์เท็กซ์ไปประกอบเป็นชุดทำความเย็นดังภาพ 5 สำหรับทำความเย็นให้กับบุคคลที่ต้องการทำงานในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง การนำความเย็นไปใช้สำหรับการตัดและกลึงชิ้นงานที่มีความร้อนสูงดังภาพ 6 เพื่อช่วยลดความเสียหายของชิ้นงานและยืดอายุการทำงานให้นานขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังมีการนำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ไปใช้งานในอุตสาหกรรม เพื่อช่วยลดอุณหภูมิให้กับตู้ควบคุมแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งมีอุณหภูมิที่สูง แสดงลักษณะการนำไปใช้งานตามภาพ 7 เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของตู้ควบคุมให้ทำงานได้ยาวนานและมีประสิทธิภาพมากขึ้น



ภาพ 7 การทำความเย็นสำหรับตู้ควบคุมไฟฟ้าที่มีแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

ที่มา: VorTech, 2019

ทฤษฎีอธิบายปรากฏการณ์ภายในท่อวอร์เท็กซ์

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมามีนักวิจัยหลายท่าน ได้อธิบายถึงหลักการที่เกิดขึ้นกับท่อวอร์เท็กซ์ มีหลายทฤษฎีที่อธิบายถึงกลไกที่ทำให้เกิดกระแสร้อนและกระแสเย็นขึ้นว่าเป็นการแยกชั้นทางความร้อน การแยกชั้นพลังงาน หรือการแยกชั้นของอุณหภูมิของท่อวอร์เท็กซ์ ซึ่งมีนักวิจัยหลายท่านได้ให้เหตุผลของการเกิดปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นหลากหลาย โดยจะนำเสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้องดังนี้

1. **ความเสียดทานและความปั่นป่วน** (Friction and turbulence)

Hilsch (1947) ได้อธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับท่อวอร์เท็กซ์ ที่เกิดจากการขยายตัวของการอัดแก๊สเข้าไปในท่อ ปรากฏการณ์ของความเสียดทานที่เกิดขึ้น เริ่มจากเมื่ออากาศผ่านเข้าไปยังท่อวอร์เท็กซ์ไหลผ่านหัวฉีด เกิดการหมุนลักษณะเป็นการเหวี่ยงหนีศูนย์กลางขึ้นจากบริเวณที่มีความดันสูงขอบท่อใกล้กับผนังด้านใน ไปยังบริเวณที่มีความดันต่ำกว่าใกล้กับแกนท่อ ในระหว่างนั้นเกิดการขยายตัวของอากาศขึ้น พลังงานจลน์ของอากาศเพิ่มขึ้น ซึ่งพลังงานงานจลน์ที่เกิดขึ้นมีการถ่ายเทไปยังรอบขอบผนังภายในท่อวอร์เท็กซ์ เมื่ออากาศภายในท่อมีความเร็วมาก ทำให้อากาศที่อยู่ภายในท่อเกิดแรงเสียดทานกับผนังท่อ ส่งผลให้กระแสอากาศที่อยู่ภายในบริเวณรอบขอบติดกับผนังท่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น ประสิทธิภาพการทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์สามารถคำนวณหาได้จากประสิทธิภาพการทำความเย็นการขยายตัวของแก๊สสมบูรณ์ของเอเดียเบติก (Adiabatic expansion of a perfect gas) ที่เกิดขึ้นจากภายในของท่อวอร์เท็กซ์ไปยังงานภายนอก

Devade, & Pise (2017) ได้กล่าวถึงทฤษฎีของฟลูทอน (Fulton's theory) โดยอธิบายถึงปรากฏการณ์ของท่อวอร์เท็กซ์ หลังจากที่อากาศเข้าไปในท่อแบบอิสระ พบว่าอากาศมีความเร็วเชิงมุมต่ำที่บริเวณภายในรอบท่อใกล้ผิว และมีความเร็วเชิงมุมสูงขึ้นที่แกนตรงกลางท่อ เกิดแรงเสียดทานขึ้นเนื่องจากการหมุนของอากาศภายในท่อระหว่างกระแสอากาศที่อยู่ชั้นนอกใกล้ผนังท่อและชั้นที่อยู่แกนตรงกลางท่อ อากาศที่อยู่รอบนอกจะได้รับพลังงานจลน์มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการปล่อยพลังงานภายในท่อ ทำให้อุณหภูมิของอากาศที่อยู่รอบขอบท่อสูงขึ้น ส่วนกระแสอากาศที่อยู่ตรงกลางหรือแกนกลางท่อได้มีการสูญเสียพลังงานจลน์เกิดขึ้นจึงทำให้อุณหภูมิต่ำลง ฟลูทอนยังได้กล่าวถึงการปั่นป่วนที่เกิดขึ้นว่า กระแสอากาศที่เกิดขึ้นในท่อเกิดขึ้นแบบอิสระ ของไหลมีความเร็วที่มีค่าต่ำกว่าความเร็วเสียง (Subsonic) แต่ยังไม่มีหลักการที่จะมาอธิบายทฤษฎีของฟลูทอนเกี่ยวกับการปั่นป่วนที่เกิดขึ้น ซึ่งยังต้องการผลการทดลองและการทดสอบเชิงตัวเลขมาเพื่อเป็นการสนับสนุนทฤษฎีนี้

2. **โมเมนตัมเชิงมุมและเอนโทรปี**

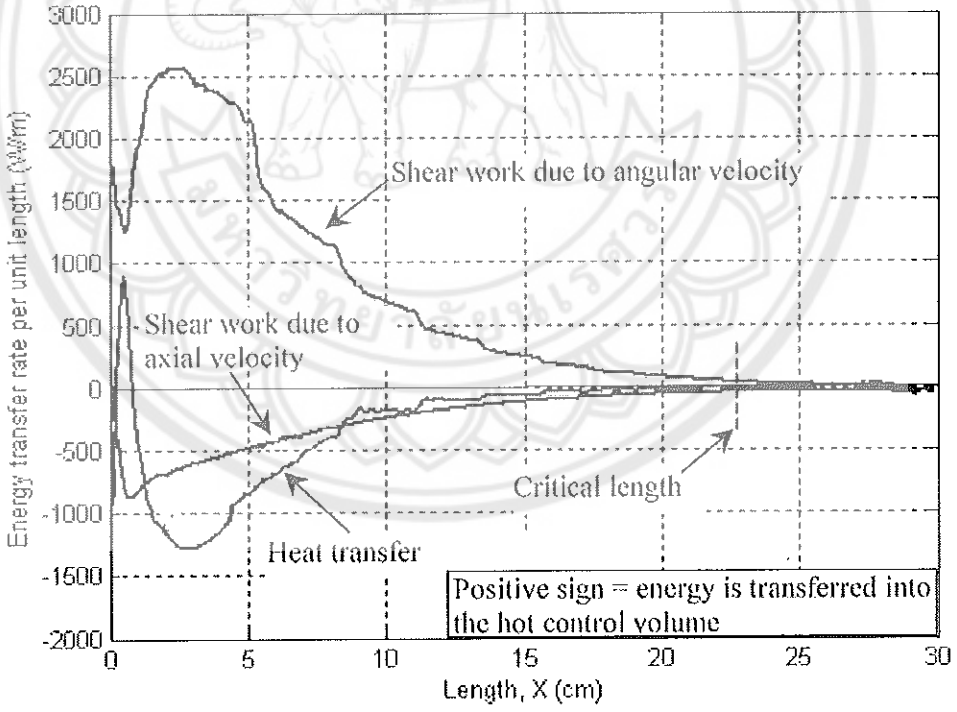
อากาศอัดที่มีความดันสูงถูกป้อนเข้าไปในท่อวอร์เท็กซ์ อากาศที่เข้าไปในท่อจะไหลผ่านหัวฉีดทันที การไหลของอากาศจะเป็นการหมุนวนแบบอิสระ แต่เนื่องจากอากาศเป็นของไหลที่มีความหนืด จึงทำให้เกิดแรงเสียดทานที่เกิดจากการหมุนวนของอากาศบริเวณลำท่อ จึงทำให้การไหลของอากาศในท่อเป็นการหมุนวนแบบบังคับ (Force vortex) ซึ่งหมายถึงความเร็วของการหมุนวนของอากาศบริเวณจุดกึ่งกลางของท่อจะค่อยๆลดลง และความเร็วของอากาศที่อยู่ใกล้กับผนังจะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีการเปลี่ยนแปลงของความเร็วอากาศในการหมุนวนภายในท่อเกิดขึ้น ก่อให้เกิดการเคลื่อนที่ของโมเมนตัมจากจุดศูนย์กลางท่อไปยังผนังท่อ เมื่อพิจารณาตามกฎ

การอนุรักษ์พลังงาน ท่อวอร์เท็กซ์ไม่มีการสูญเสียพลังงาน ซึ่งหมายถึงพลังงานจากโมเมนตัมจะถูกถ่ายเทเป็นพลังงานความร้อน ฉะนั้นจึงทำให้การเคลื่อนที่ของพลังงานความร้อนของอากาศจากจุดศูนย์กลางท่อเคลื่อนที่ออกไปยังผิวบริเวณใกล้กับผนังท่อ ทำให้เกิดอุณหภูมิของอากาศที่จุดศูนย์กลางท่อต่ำกว่าอุณหภูมิที่อยู่ใกล้กับผนังท่อ (Rafiee, & Sadeghiazad, 2014)

3. การถ่ายเทความร้อนภายในท่อวอร์เท็กซ์

Schepper (1951) ได้ศึกษาการจำลองการเกิดการแยกชั้นพลังงานของท่อวอร์เท็กซ์ พบว่าภายในท่อวอร์เท็กซ์เกิดการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนแบบบังคับ จากแกนไปยังชั้นนอกภายในท่อวอร์เท็กซ์

Lin et al. (1990) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการถ่ายเทความร้อนกับการไหลแบบหมุนวนภายในท่อวอร์เท็กซ์ พบว่าความดันอากาศทางเข้าท่อที่มีผลมาจาก Reynold number และสัดส่วนมวลอากาศเย็น เป็นตัวแปรที่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนและการหมุนภายในท่อ



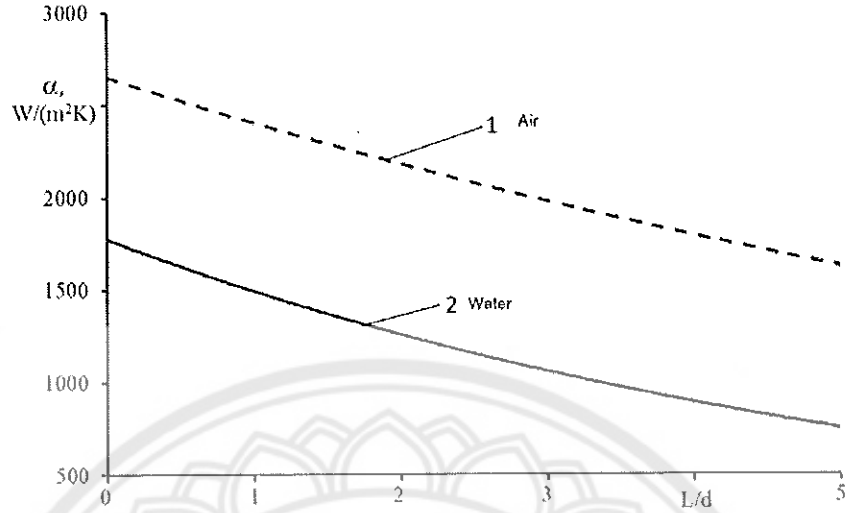
ภาพ 8 อัตราการถ่ายเทพลังงานต่อความยาวท่อ

ที่มา: Aljuwayhel et al., 2005

Aljuwayhel et al. (2005) ได้ศึกษาแบบจำลองเชิงตัวเลขเพื่อศึกษาพฤติกรรมการแยกชั้นอุณหภูมิภายในท่อวอร์เท็กซ์ พบว่าการแยกชั้นพลังงานของท่อวอร์เท็กซ์ สามารถอธิบายได้ด้วยการถ่ายเทพลังงานที่เกิดขึ้นจากทอร์กหรือแรงบิด เนื่องจากเกิดความหนืดเฉือน (Viscous shear)ในแนวสัมผัส ที่ถูกถ่ายเทไปยังปริมาตรควบคุมปลายท่อด้านร้อน (Hot control volume) ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับการแยกกระแสของไหลร้อนและกระแสของไหลเย็น นอกจากนี้ยังได้อธิบายผลของการเปลี่ยนแปลงความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางท่อต่อพฤติกรรมภายในของท่อวอร์เท็กซ์ พบว่าเกิดการแยกชั้นพลังงานมากขึ้นเมื่อความยาวของท่อเพิ่มขึ้นถึงความยาววิกฤติ โดยที่ความยาววิกฤติมีค่าเท่ากับ 22.5 cm ซึ่งจะแสดงอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยความยาวท่อดังภาพ 8 และในงานวิจัยนี้ยังพบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ขนาดของความเร็วเชิงมุมภายในท่อลดลง ดังนั้นจะทำให้เกิดการแยกชั้นของพลังงานลดลงด้วย

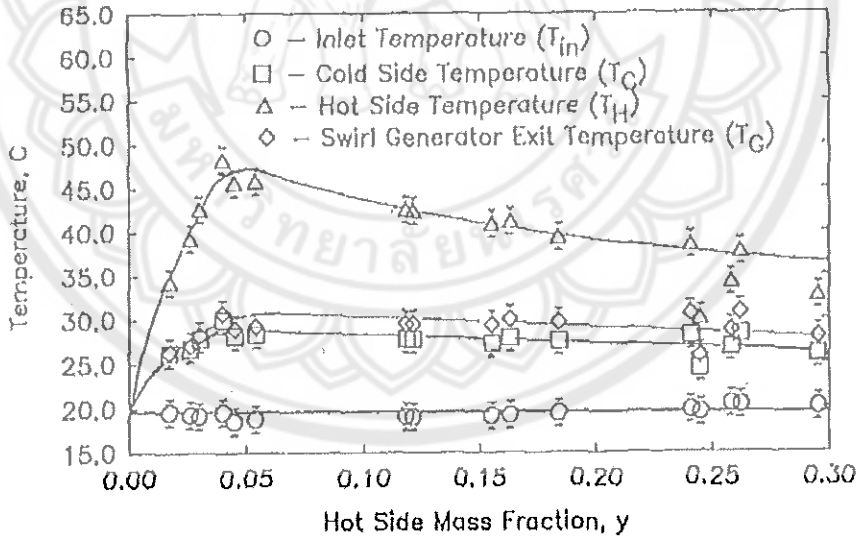
Xue et al. (2010) ได้อธิบายถึงการถ่ายเทพลังงานระหว่างชั้นที่เกิดขึ้นภายในท่อวอร์เท็กซ์ ซึ่งมีการถ่ายเทพลังงานจากชั้นในแกนกลางท่อไปยังบริเวณชั้นนอกใกล้ผิวท่อ อุณหภูมิอากาศเย็นบริเวณแกนกลางท่อลดลง เป็นเหตุที่ทำให้เกิดการขยายตัวของอากาศอย่างรวดเร็วที่บริเวณทางเข้าอากาศ และอุณหภูมิอากาศร้อนเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการเสียดทานของการไหลเวียนแบบผสม(Multi-circulation) ที่บริเวณปลายท่อด้านร้อน เมื่อมีการถ่ายเทพลังงานระหว่างชั้นจะเกิดการแยกชั้นของอุณหภูมิอากาศภายในท่อ โดยที่การไหลวนชั้นที่สอง(Secondary circulation) และโมเมนตัมเชิงมุม (Momentum angular) ทำให้เกิดการเสียดทานภายในท่ออาจจะเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดการขับเคลื่อน(Driving factor) ทำให้เกิดการแยกชั้นของอุณหภูมิอากาศร้อนและอากาศเย็นออกจากกัน

Veretennikov et al. (2018) ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนภายในท่อด้วยแบบจำลอง 3 มิติ (3D numerical simulation) พบว่ามีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นตั้งแต่บริเวณที่มีการป้อนอากาศเข้าไปในท่อ ของไหลมีการไหลไม่คงที่เกิดขึ้นภายในท่อวอร์เท็กซ์ขณะที่มีการแยกชั้นพลังงาน จะมีผลทำให้เกิดการพาความร้อนของกระแสหมุนวนไปยังบริเวณใกล้กับผิวท่อ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (α)เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการขยายตัวภายในท่อเพิ่มขึ้นด้วย และพบว่าค่าการพาความร้อนที่เกิดขึ้นในลำท่อมีค่าลดลงตามสัดส่วนขนาดท่อร้อนทั้งของไหลที่เป็นอากาศและน้ำแสดงดังภาพ 9 จะเห็นว่าสัดส่วนขนาดท่อร้อนเพิ่มขึ้นมีผลทำให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนลดลงเนื่องจากมีการสูญเสียความร้อนไปตามลำท่อ



ภาพ 9 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแปรผันตามสัดส่วนขนาดท่อร้อน

ที่มา: Veretennikov et al., 2018



ภาพ 10 อุณหภูมิทางเข้า อุณหภูมิปลายท่อเย็น และอุณหภูมิปลายท่อร้อนของท่อวอร์เท็กซ์ที่ใช้น้ำเป็นของไหลทำงาน

ที่มา: Balmer, 1988

Balmer (1988) ได้ศึกษาการแยกชั้นอุณหภูมิของท่อวอร์เท็กซ์โดยใช้น้ำเป็นสารทำงาน ตามภาพ 10 พบว่าน้ำบริเวณปลายท่อเย็นมีอุณหภูมิสูงกว่าน้ำบริเวณทางเข้าท่อ แสดงให้เห็นว่าท่อวอร์เท็กซ์ไม่เกิดความเย็นที่ปลายท่อที่แรงดันน้ำต่ำ ซึ่งการแยกชั้นอุณหภูมิของท่อวอร์เท็กซ์จะเกิดขึ้นจริงเมื่อใช้แรงดันน้ำที่สูงขึ้น

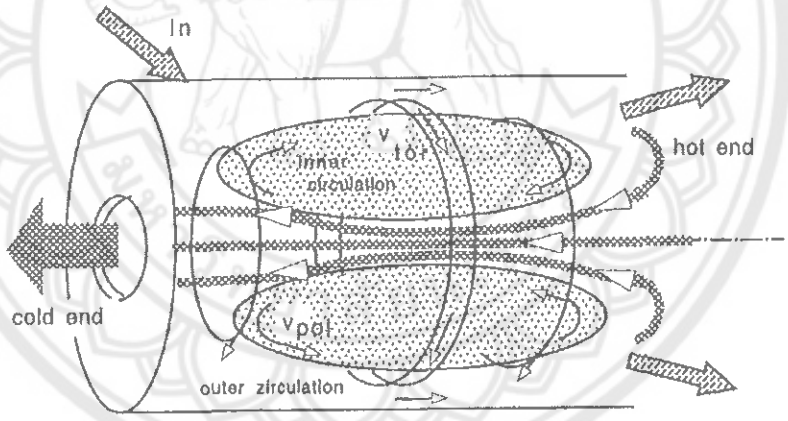
Rattanongphisat (2008) ได้ศึกษาลักษณะการแยกชั้นของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในท่อวอร์เท็กซ์โดยใช้การจำลองแบบโดยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics หรือ CFD) พบว่าเกิดการหมุนวนของของไหลขึ้นหลังจากที่มีการป้อนอากาศที่มีความดันสูงเข้าไปในท่อวอร์เท็กซ์ผ่านหัวฉีด บริเวณแกนกลางของท่อมีอุณหภูมิต่ำกว่าบริเวณที่อยู่รอบนอกแกนใกล้ผนังท่อ ของไหลที่อยู่ใกล้กับผนังท่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากเกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางภายในท่อวอร์เท็กซ์ และขณะที่ของไหลมีการเคลื่อนที่จะเกิดความหนืดขึ้น ของไหลที่สัมผัสกับผิวของท่อวอร์เท็กซ์ จะทำให้เกิดความเสียดทานขึ้นและทำให้อุณหภูมิของของไหลที่อยู่ใกล้กับผนังท่อสูงขึ้น

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น ศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นภายในท่อวอร์เท็กซ์โดยใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขในการอธิบาย พบว่าภายในท่อวอร์เท็กซ์เกิดการถ่ายเทความร้อนตั้งแต่บริเวณที่ของไหลสัมผัสกับผิวท่อที่ห้องสร้างกระแสหมุนวน โดยมีการพาความร้อนแบบบังคับทำให้อากาศไหลไปตามผิวของลำท่อภายใน เกิดการแยกชั้นระหว่างกระแสของไหลที่มีอุณหภูมิต่ำที่บริเวณใกล้กับทางเข้า และกระแสของไหลที่มีอุณหภูมิสูงที่บริเวณปลายท่อด้านร้อน โดยมีความดันอากาศทางเข้าและสัดส่วนมวลอากาศเย็น เป็นตัวแปรที่มีผลต่อพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนและการหมุนภายในท่อ อีกทั้งความยาวของท่อที่เพิ่มขึ้นยังมีผลต่อค่าการพาความร้อนที่ลดลงด้วย และเส้นผ่านศูนย์กลางท่อที่เพิ่มขึ้นยังทำให้ความเร็วเชิงมุมที่เกิดในท่อลดลงซึ่งจะมีผลทำให้เกิดการแยกชั้นของพลังงานลดลงด้วย

4. การไหลวนชั้นที่สอง

การไหลวนชั้นที่สอง (Secondary circulation) คือการหมุนวนของของไหลที่เกิดขึ้นบริเวณมุมของท่อในทิศตั้งฉากกับการไหลวนชั้นที่หนึ่งหรือการไหลวนปฐมภูมิ (Primary flow) การไหลวนชั้นที่สองเป็นการย้อนกลับของกระแสอากาศบางส่วน ซึ่งอาจจะเป็นการรวมตัวกันระหว่างการไหลของอากาศที่อยู่ภายในรอบท่อและแกนกลางท่อ เพื่อช่วยในการถ่ายเทความร้อนของอากาศที่อยู่ตรงกลางท่อไปยังรอบท่อ ซึ่งในขณะนั้นอากาศที่อยู่ภายในท่อระหว่างอากาศใกล้ขอบท่อและอากาศกลางท่ออาจจะกำลังผสมกันอยู่ เรียกว่าเป็นรูปแบบการไหลวนแบบชั้นที่สอง Ahlborn, & Groves (1997) ได้กล่าวโดยสรุปว่า เกิดการพาความร้อนแบบบังคับ (Forced convection) ของการไหลวนชั้นที่สองว่าเป็นพลังงานที่เกิดขึ้นจากบริเวณที่เย็นไปหาบริเวณที่ร้อน

ตามระยะทางที่เชื่อมต่อกันระหว่างชั้นของการไหลวนที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นชั้นที่พลังงานสามารถแลกเปลี่ยนกันได้ การไหลวนชั้นที่สองถูกอธิบายเป็นวงแหวนหมุนวน (vortex ring) ทั้งแบบเปิดและแบบปิด ซึ่งการไหลค่อนข้างแตกต่างกับวงแหวนของควัน (smoke ring vortex) ซึ่งจุดของเวกเตอร์ที่มีการหมุนวนตามแกนวงกลม (Torus axis) และของไหลไม่มีส่วนประกอบของความเร็วตามวงแหวน วงแหวนหมุนวนในท่อวอร์เท็กซ์เป็นส่วนหนึ่งของการเคลื่อนที่แบบเกลียว ได้นำไปสู่หัวฉีดที่มีการอัดอากาศต่อไป วงแหวนหมุนวนมีผลทำให้เกิดการไหลเชิงมุม นอกจากนี้การไหลเวียนโพลอยดัล (Poloidal circulation) ของวงแหวนควัน มีการเคลื่อนที่ตามแกนวงกลมของวงแหวนกระแสวน การเคลื่อนที่ของกระแสวนนี้ถูกกระตุ้นจนทำให้เกิดการเสียดทานจากชั้นรอบนอก หรือการไหลเวียนแบบปฐมภูมิ เส้นทางของการหมุนวนที่เป็นการไหลแบบขดมีการเคลื่อนที่ของการไหลแบบเกลียวเกิดขึ้นผ่านวงแหวนหมุนวน ซึ่งคล้ายกับริบบิ้นที่คล้องตามพวงมาลัย แสดงการไหลเวียนของอากาศภายในท่อวอร์เท็กซ์ดังภาพ 11 ซึ่งเป็นภาพสาธิตระบบการไหลเวียนของอากาศทั้งแบบชั้นที่หนึ่งและแบบชั้นที่สอง



ภาพ 11 การไหลวนของของไหลภายในท่อวอร์เท็กซ์

ที่มา: Ahlborn, & Groves, 1997

ประสิทธิภาพการทำงานของท่อวอร์เท็กซ์

1. กระบวนการไอเซนโทรปิกสำหรับแก๊สสมบูรณ์

กระบวนการไอเซนโทรปิก (Isentropic Process) คือกระบวนการย้อนกลับได้ที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อน ในกระบวนการไอเซนโทรปิกจะมีเอนโทรปีคงที่ เป็นกระบวนการมาตรฐานใช้สำหรับเปรียบเทียบกระบวนการทำงานต่างๆทางวิศวกรรม ความสัมพันธ์ในการคำนวณใน

กระบวนการไอเซนโทรปิกของแก๊สสมบูรณ์จะแยกออกเป็น 2 กรณี คือกรณีที่ค่าความร้อนจำเพาะมีค่าคงที่และกรณีที่ค่าความร้อนจำเพาะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ (พงษ์ธร จรัญญาภรณ์, 2537)

กรณี 1 c_p และ c_v คงที่ สำหรับกระบวนการไอเซนโทรปิก $dS = 0$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$c_v \times \frac{dT}{T} = -R \times \frac{dv}{v}$$

$$c_p \times \frac{dT}{T} = R \times \frac{dP}{P}$$

$$\frac{c_p}{c_v} = -\frac{dP}{P} \times \frac{v}{dv} \qquad (2.1)$$

ให้ $k = \frac{c_p}{c_v}$ จัดรูปได้เป็น

$$\frac{dP}{P} + k\frac{dv}{v} = 0 \qquad (2.2)$$

อัตราส่วนความร้อนจำเพาะ k มีค่าคงที่เมื่อ c_p และ c_v มีค่าคงที่ เมื่ออินทิเกรตเราจะได้ความสัมพันธ์ที่เป็นจริงสำหรับกระบวนการไอเซนโทรปิกของแก๊สสมบูรณ์คือ

$$Pv^k = \text{ค่าคงที่} \qquad (2.3)$$

โดยทั่วไปจะเขียนอยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะเริ่มต้นคือ 1 และสภาวะสุดท้ายคือ 2 ดังนี้

$$P_1v_1^k = P_2v_2^k \qquad (2.4)$$

เมื่อพิจารณาสมการประกอบกับสมการสภาวะของแก๊สสมบูรณ์ เราจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะเริ่มต้นกับสภาวะสุดท้ายของกระบวนการไอเซนโทรปิกดังนี้

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^k$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(k-1)/k}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1} \qquad (2.5)$$

กรณี 2 c_p และ c_v แปรตามอุณหภูมิ สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะเริ่มต้นกับสภาวะสุดท้ายของกระบวนการไอเซนโทรปิกของแก๊สสมบูรณ์ดังต่อไปนี้

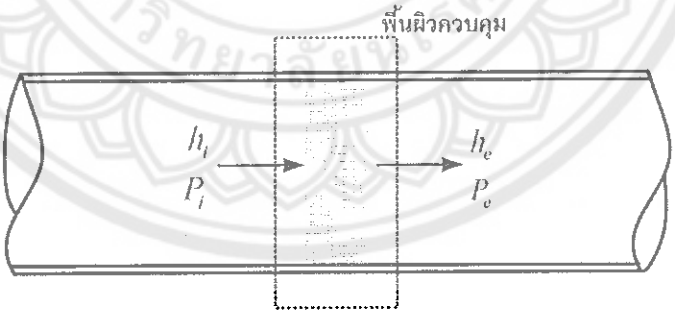
$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{P_{r1}}{P_{r2}}\right)_s$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{V_{r1}}{V_{r2}}\right)_s \qquad (2.6)$$

เมื่อ c_p คือค่าความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ c_v คือค่าความจุความร้อนจำเพาะที่ปริมาตรคงที่ S คือเอนโทรปี P คือความดัน T คืออุณหภูมิ P_r คือความดันสัมพัทธ์ ซึ่งเป็นฟังก์ชันเฉพาะอุณหภูมิ และ v_r คือปริมาตรสัมพัทธ์ เป็นฟังก์ชันเฉพาะอุณหภูมิเช่นเดียวกัน

2. **กระบวนการลดความดัน** (Throttling Process)

กระบวนการลดความดันหรือกระบวนการทรอตติง เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในของไหลที่ได้ไหลผ่านสิ่งกีดขวางหรือต้านทานการไหล เช่น การไหลผ่านวัตถุพรุน ตะแกรง หรือการไหลผ่านลิ้นที่มีช่องทางออกเปิดไว้เพียงเล็กน้อย เป็นต้น โดยจะมีผลทำให้ความดันของของไหลลดลง ดังภาพ 12



ภาพ 12 กระบวนการลดความดัน

ที่มา: พงษ์ธร จรัญญาภรณ์, 2537

ในสภาวะทำงานปกติ ปริมาตรควบคุมของกระบวนการลดความดันจะเป็นแบบสภาวะอยู่ตัว มีการไหลคงที่ กระบวนการเกิดขึ้นในบริเวณแคบๆ และในบางกรณีมีฉนวนหุ้มจึงมีการ

ถ่ายเทความร้อนน้อย และไม่มีงานผ่านพื้นผิวควบคุม ดังนั้นปริมาตรที่ควบคุมของกระบวนการลดความดัน จะได้ว่า

$$h_i + \frac{V_i^2}{2} = h_e + \frac{V_e^2}{2} \qquad (2.7)$$

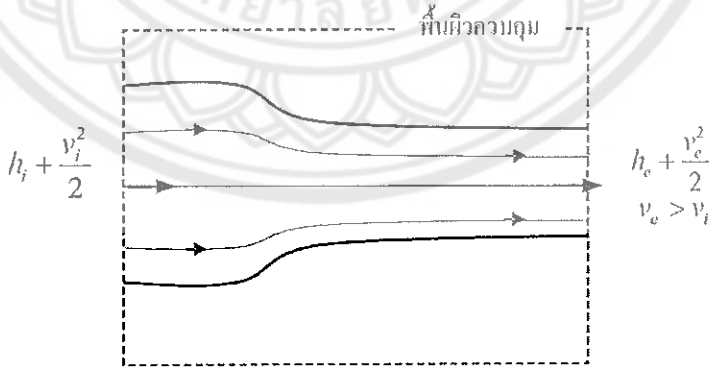
โดยทั่วไปการเปลี่ยนแปลงของพลังงานจลน์น้อย จึงได้ว่า

$$h_i = h_e \qquad (2.8)$$

นั่นคือ ในกระบวนการลดความดัน เอนทาลปีเริ่มต้น (h_i) เท่ากับเอนทาลปีสุดท้าย (h_e)

3. หัวฉีด (Nozzle)

หัวฉีดเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เพิ่มความเร็วของของไหลและลดความดันของของไหลที่ไหลผ่าน ทำให้พลังงานจลน์ของของไหลเพิ่มขึ้น มีลักษณะดังภาพ 13 หัวฉีดเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเป็นทางผ่านของของไหล ในการผลิตแก๊สที่พ่นออกมาอย่างรวดเร็ว (Jet) ซึ่งมีความเร็วสูง ไหลผ่านเข้าไปในกังหันของไหล หัวฉีดมีขนาดพื้นที่หน้าตัดให้ของไหลที่ไหลผ่านเปลี่ยนแปลง เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนภายในของไหลให้เป็นพลังงานจลน์ ถ้ามีการออกแบบหัวฉีดมาอย่างดี การเปลี่ยนแปลงดังกล่าว จะเกิดการสูญเสียขึ้นน้อยที่สุด ในช่วงต้นของหัวฉีด ของไหลจะมีความเร็วในการไหลเพิ่มขึ้น ในช่วงถัดมาของไหลจะมีความหนาแน่นลดลง โดยการไหลผ่านตลอดหัวฉีด จะทำให้มวลของของไหลคงที่ (สิทธิพงษ์ พึ่งใหญ่, 2542)



ภาพ 13 ลักษณะการไหลของของไหลผ่านหัวฉีด

ที่มา: มนตรี พิรุณเกษตร, 2548

พิจารณาหัวฉีดเป็นปริมาตรควบคุมที่มีการไหลคงตัวโดยไม่มีความร้อนถ่ายเทออกจากระบบและรวมถึงไม่มีงานเกิดขึ้น จะไม่คำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของพลังงานศักย์โน้มถ่วงระหว่างทางเข้าและทางออก ดังนั้นจากกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์จะได้ว่า

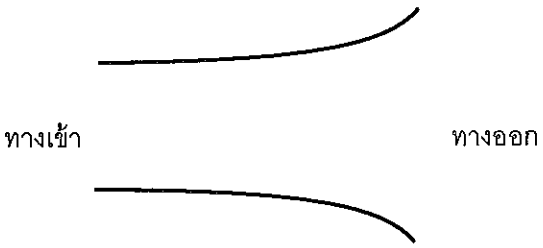
$$\frac{V_e^2}{2} - \frac{V_i^2}{2} = h_i - h_e \qquad (2.9)$$

เมื่อ v_i และ v_e คือความเร็วเริ่มต้นและความเร็วสุดท้ายของของไหล ตามลำดับ h_i และ h_e คือเอนทาลปีเริ่มต้นและเอนทาลปีสุดท้าย ตามลำดับ จากสมการจะกล่าวได้ว่า ปริมาณอัตราส่วนของพลังงานจลน์เพิ่มขึ้นขณะที่ของไหลไหลผ่านหัวฉีด ซึ่งเท่ากับปริมาณอัตราส่วนของเอนทาลปีของของไหลที่ลดลง ประเภทของหัวฉีดสามารถแบ่งตามลักษณะของไหลที่ไหลผ่าน แบ่งออกเป็น 3 แบบ ได้แก่

3.1 หัวฉีดแบบลู่เข้า (Convergent nozzle) คือหัวฉีดที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดในการไหลของของไหลลดลงอย่างต่อเนื่อง จากทางเข้าของหัวฉีดไปยังทางออกของหัวฉีด ดังภาพ 14

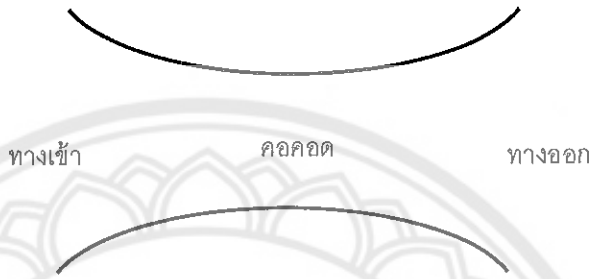
ภาพ 14 หัวฉีดแบบลู่เข้า

3.2 หัวฉีดแบบบานออก (Divergent nozzle) คือหัวฉีดที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดในการไหลของของไหลเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จากทางเข้าถึงทางออกของหัวฉีด ดังภาพ 15



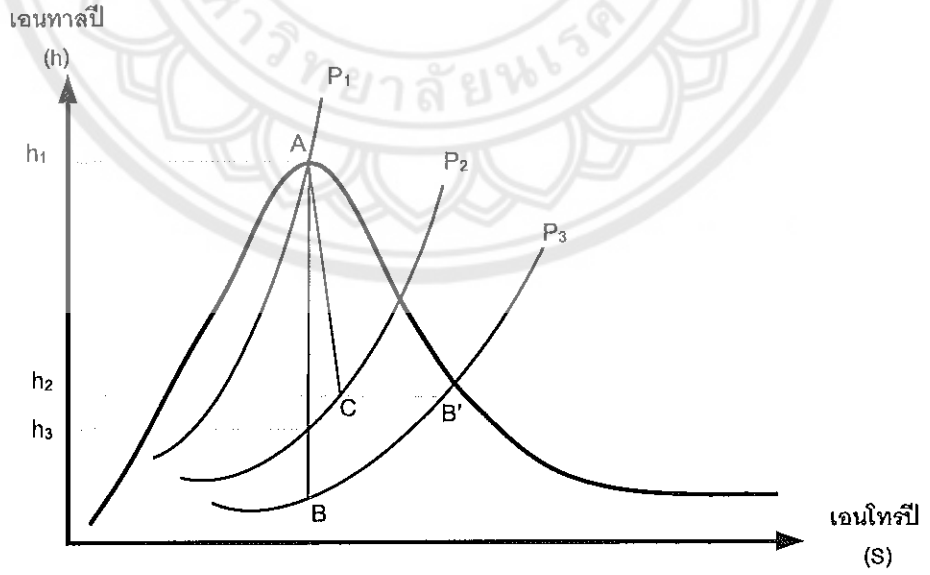
ภาพ 15 หัวฉีดแบบบานออก

3.3 หัวฉีดแบบ ลู่เข้า-บานออก (Convergent-divergent nozzle) คือหัวฉีดที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดในการไหลลดลงจากทางเข้า ไปยังส่วนที่แคบที่สุดเรียกว่า คอคอด (Throat) แล้วหลังจากนั้นของไหลจะไหลผ่านคอคอดไปยังขนาดพื้นที่หน้าตัดมีขนาดเพิ่มขึ้นไปยังทางออก ดังภาพ 16



ภาพ 16 หัวฉีดแบบลู่เข้า-บานออก

ความเสียดทานในหัวฉีดและประสิทธิภาพของหัวฉีด ในขณะที่ของไหลไหลผ่านหัวฉีดจะมีการสูญเสียพลังงานความร้อนเกิดขึ้นบ้าง เนื่องจากความเสียดทานระหว่างของไหลและผิวของหัวฉีด ซึ่งพิจารณาได้ตามแผนภาพ เอนทาลปี-เอนโทรปี (h-s diagram) หรือ Mollier chart สามารถอธิบายดังภาพ 17



ภาพ 17 แผนภาพเอนทาลปี-เอนโทรปีของกระบวนการที่เกิดขึ้นในหัวฉีด

ที่มา: ปรับปรุงจาก สิทธิพงษ์ พึ่งใหญ่, 2542

จากภาพ 17 จุด A เป็นสภาวะเริ่มต้นที่ของไหลเข้าไปในหัวฉีด โดยมีสถานะไออิ่มตัว (Saturated vapor) ที่ความดันของของไหลที่เข้าหัวฉีด เส้น AB แสดงถึงค่าเอนโทรปีที่คงที่ นั่นคือเป็นกระบวนการที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อน ที่ตำแหน่ง B จะมีความดันของของไหลที่ลดลงหลังจากไหลผ่านหัวฉีด ที่ h_1-h_2 คือค่าพลังงานความร้อนที่ลดลงของของไหล เมื่อมีความเสียดทานในหัวฉีด พลังงานความร้อนของของไหลที่ลดลงจะมีค่าน้อยกว่า h_1-h_2 เท่ากับ h_1-h_3 หรือเปลี่ยนแปลงตามกระบวนการ AC แทน AB เมื่อการขยายตัวของของไหลสิ้นสุดลงถึงความดัน P_2 สภาวะสุดท้ายของของไหลที่ได้จากการลากเส้นในแนวราบจากจุด C เป็นจุดสภาวะ B' การขยายตัวที่แท้จริงของของไหลในหัวฉีด จึงเป็นเส้นกระบวนการ AB' แทน AB ค่าพลังงานความร้อนของของไหลที่ลดลงจริงของของไหล h_1-h_3 คือพลังงานความร้อนที่ลดลงสำหรับใช้ประโยชน์ในการเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์ สามารถสังเกตได้ว่าที่จุดสภาวะ B' เป็นของไหลที่มีสัดส่วนความแห้งสูงกว่าสภาวะ B เนื่องจากพลังงานสูญเสียอันเนื่องมาจากความเสียดทานเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนทำให้ของไหลแห้ง

ประสิทธิภาพของหัวฉีด (Nozzle efficiency) คืออัตราส่วนของพลังงานความร้อนที่ลดลงที่นำไปใช้ประโยชน์ต่อพลังงานความร้อนที่ลดลงตามกระบวนการไอเซนโทรปิก

$$\eta_N = \frac{h_1 - h_3}{h_1 - h_2} \qquad (2.10)$$

ในการพิจารณาท่อวอร์เท็กซ์เพื่อให้มีประสิทธิภาพการทำงานที่ดี จะต้องคำนึงถึงหลายตัวแปรที่มีผลต่อการทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ เช่น ความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็น ความแตกต่างอุณหภูมิอากาศร้อน สัดส่วนมวลอากาศเย็น ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิก ความสามารถการทำความร้อน ความสามารถการทำความเย็น สมรรถนะการทำความร้อน สมรรถนะการทำความเย็น สามารถหาได้ดังนี้

1. ความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็น (Cold air temperature difference หรือ ΔT_c) คืออุณหภูมิที่ปลายท่อวอร์เท็กซ์ที่จะสามารถลดลงได้จากอุณหภูมิที่เข้าในท่อ ซึ่งหมายถึงความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศที่ป้อนเข้าไปในท่อกับอุณหภูมิอากาศเย็นที่ปล่อยออกท่อ แสดงดังสมการที่ 2.11 เมื่อ T_{in} คืออุณหภูมิอากาศที่ป้อนเข้าไปในท่อ และ T_c คืออุณหภูมิอากาศปลายท่อด้านเย็น

$$\Delta T_c = T_{in} - T_c \qquad (2.11)$$

2. ความแตกต่างอุณหภูมิอากาศร้อน (Hot air temperature difference หรือ ΔT_h) คือ อุณหภูมิที่ปลายท่อด้านร้อนที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่เข้าไปในท่อ ซึ่งก็หมายถึงความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิปลายท่อด้านร้อนกับอุณหภูมิอากาศที่ป้อนเข้าไปในท่อ แสดงดังสมการที่ 2.12 เมื่อ T_{in} คืออุณหภูมิอากาศที่ป้อนเข้าไปในท่อ และ T_h คืออุณหภูมิอากาศปลายท่อด้านร้อน

$$\Delta T_h = T_h - T_{in} \tag{2.12}$$

3. สัดส่วนมวลอากาศเย็น (Cold mass fraction) สามารถหาได้จากอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของมวลอากาศเย็นต่ออัตราการไหลมวลอากาศทางเข้า ค่าสัดส่วนมวลอากาศเย็นของท่อวอร์เท็กซ์มีค่าการเปลี่ยนแปลงในช่วงตั้งแต่ 0 ถึง 1

$$CF = \frac{\dot{m}_c}{\dot{m}_{in}}$$

$$CF = \frac{\dot{m}_c}{\dot{m}_c + \dot{m}_h} \tag{2.13}$$

เมื่อ CF คือสัดส่วนมวลอากาศเย็น

$\dot{m}_c$ คืออัตราการไหลของมวลอากาศเย็น (kg/s)

$\dot{m}_h$ คืออัตราการไหลของมวลอากาศร้อน (kg/s)

$\dot{m}_{in}$ คืออัตราการไหลของมวลอากาศทางเข้าท่อ (kg/s)

อัตราการไหลเชิงมวล (Mass flow rate) คือมวลของของไหลที่ไหลผ่านท่อ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของของไหลและอัตราการไหลของของไหล สามารถวัดอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศได้จากโรตามิเตอร์ ซึ่งเป็นเครื่องมือสำหรับวัดอัตราการไหลของของไหล อัตราการไหลเชิงมวลคำนวณได้จาก

$$\dot{m} = \rho Q \tag{2.14}$$

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

ρ คือความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)

Q คืออัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ (m^3/s)

4. ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของท่อวอร์เท็กซ์ (Isentropic efficiency) ในการหาประสิทธิภาพการทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ พิจารณาได้จากกระบวนการอะเดียแบติก (Adiabatic process) ของแก๊สในอุดมคติ ซึ่งการไหลของอากาศเข้าไปในท่อวอร์เท็กซ์ จะทำให้เกิดการขยายตัวในกระบวนการไอเซนโทรปิก จะได้ว่าเป็นกระบวนการของการขยายตัวไอเซนโทรปิก

$$\eta = \frac{T_{in} - T_c}{T_{in} - T_{is}}$$

$$\eta = \frac{T_{in} - T_c}{T_{in}\left[1 - \left(\frac{P_{atm}}{P_{in}}\right)^{(k-1)/k}\right]} \qquad (2.15)$$

เมื่อ η คือประสิทธิภาพไอเซนโทรปิก

T_{in} คืออุณหภูมิอากาศขาเข้าท่อวอร์เท็กซ์

T_{is} คืออุณหภูมิไอเซนโทรปิก

T_c คืออุณหภูมิอากาศเย็น

P_{atm} คือความดันบรรยากาศ เท่ากับ 1.013 bar

P_{in} คือความดันอากาศที่ทางเข้าท่อวอร์เท็กซ์

k คืออัตราส่วนความร้อนจำเพาะของอากาศ เท่ากับ 1.4

5. ความสามารถการทำความเย็น (Cooling capacity) ของท่อวอร์เท็กซ์ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.16

$$Q_c = \dot{m}_c c_p (T_{in} - T_c) \qquad (2.16)$$

เมื่อ Q_c คือความสามารถการทำความเย็น (W)

$\dot{m}_c$ คืออัตราการไหลเชิงมวลอากาศเย็น (kg/s)

c_p คือค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศที่ความดันคงที่เท่ากับ1.0057 kJ/kg.K

6. สมรรถนะการทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ (Coefficient of performance) คือ อัตราส่วนระหว่างอัตราการทำความเย็นที่สามารถทำได้ต่อพลังงานกลที่ใช้ในการผลิตทำความเย็น ใช้หลักการของการขยายตัวไอเซนโทรปิกของแก๊สในอุดม ซึ่งสามารถคำนวณหาสมรรถนะการทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์จากสมการที่ 2.17

$$COP = \frac{Q_c}{W}$$

$$COP = \frac{CF\ c_p\ \Delta T_c}{R\ T_{in}\ \ln(P_{in}/P_{atm})} \qquad (2.17)$$

เมื่อ COP คือสมรรถนะการทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์

Q_c คือความสามารถการทำความเย็น (W)

W คืองานที่ป้อนเข้าไปในท่อวอร์เท็กซ์

R คือค่าคงที่ของแก๊ส เท่ากับ 0.287 kJ/kg.K

P_{in} คือความดันอากาศทางเข้าท่อ

P_{atm} คือความดันบรรยากาศ เท่ากับ 1.013 bar

ชนิดและผลต่อสิ่งแวดล้อมของสารทำความเย็น

สารทำความเย็น เป็นส่วนประกอบหลักในระบบทำความเย็นแบบอัดไอ การเลือกสารทำความเย็นจะถูกกำหนดโดยความต้องการของอุณหภูมิของกระบวนการผลิตหรืออุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ ซึ่งมีผลกระทบอย่างมากต่อการออกแบบและการทำงานของระบบทำความเย็น และยังมีประเด็นที่เกี่ยวกับเรื่องสิ่งแวดล้อมที่จะต้องคำนึงถึงเช่นกัน สารทำความเย็นที่ใช้ในระบบเครื่องทำความเย็นและระบบเครื่องปั๊มความร้อน ซึ่งเป็นระบบที่ใช้พลังงานกลในการขับเคลื่อน เช่น ระบบทำความเย็นแบบอัดไอ หรือระบบที่ใช้ความร้อนในการขับเคลื่อน เช่น ระบบอีเจ็กเตอร์ และระบบเครื่องทำความเย็นแบบดูดซึม โดยที่สารทำความเย็นที่ความดันและอุณหภูมิต่ำ จะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอ เพื่อดูดซึมพลังงานความร้อนซึ่งมีอุณหภูมิต่ำหรือภาระการทำความเย็นของระบบ หลังจากนั้นไอของสารทำความเย็นจะถูกเพิ่มความดันให้สูงขึ้นและควบแน่นเป็นของเหลว โดยระบายความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อม การพัฒนาระบบเครื่องทำความเย็นแบบอัดไอ สารทำความเย็นที่ใช้เป็นของไหลที่มีจุดเดือดต่ำที่ความดันบรรยากาศปกติ และสามารถควบแน่นเป็นของเหลวที่อุณหภูมิแวดล้อมที่มีความดันไม่สูงมากเกินไป สารทำความ

เย็นในยุคแรกที่นิยมนำมาใช้ ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ แอมโมเนียม ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ โปรเพน เมทิลคลอไรด์ และเมทิลฟอร์เมต สารเหล่านี้ถูกวิจัยว่าบางชนิดเป็นสารที่มีพิษต่อร่างกาย ติดไฟง่าย ซึ่งเป็นอันตรายหากเกิดการรั่วไหล จนกระทั่ง ค.ศ. 1928 ได้มีการพัฒนาสารคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (Chlorofluorocarbon) หรือเรียกว่าสาร CFC เป็นสารทำความเย็นสำหรับทำให้ระบบเครื่องทำความเย็นแบบอัดไอทำงานอย่างเต็มระบบ แต่หลังจากนั้น 40 ปีต่อมา มีการค้นพบว่าสารทำความเย็น CFC เป็นสารอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม (ศรัทธา อาภรณ์รัตน์, 2557)

ประเภทของสารทำความเย็น ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาสารทำความเย็นชนิดใหม่ขึ้น เพื่อความปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม แม้กระทั่งการกลับมาใช้สารทำความเย็นที่มีอยู่ในธรรมชาติซึ่งจะเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สามารถแบ่งประเภทได้ทั้งหมด 4 ประเภท คือ

1. สารทำความเย็นชนิดที่เป็นสารประกอบฮาโลคาร์บอน
2. สารทำความเย็นชนิดที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน
3. สารทำความเย็นประเภทที่เป็นสารอนินทรีย์และสารอินทรีย์
4. สารทำความเย็นที่เป็นสารผสม

มีสารทำความเย็นอยู่หลายตัวที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง ในทุกวันนี้เป็นสารเคมีที่อยู่ในกลุ่มที่เรียกว่าสาร CFC หรือเรียกกันว่า ฟรีออน มีการนำสารทำความเย็นใช้งานในระบบทำความเย็นแบบอัดไอแพร่ขยายไปอย่างรวดเร็ว โดยฟรีออนเป็นสารทำความเย็นที่มนุษย์สร้างขึ้นมาไม่มีอยู่เองตามธรรมชาติ แต่หลังจาก ค.ศ.1970 ค้นพบว่า ฟรีออนมีผลทำให้เกิดการทำลายโอโซนในชั้นบรรยากาศ (Ozone depletion) ซึ่งอยู่ในชั้นบรรยากาศจะทำหน้าที่เป็นตัวกรองรังสีอัลตราไวโอเลตไม่ให้ตกลงมาบนผิวโลกมากจนเกินไป ถ้ารังสีอัลตราไวโอเลตมีความเข้มเพิ่มขึ้นมากจนเกินไป จะมีผลทำให้เกิดโรคมะเร็งต่อผิวหนังได้ นอกจากนี้สารทำความเย็นเหล่านี้ยังสะสมในชั้นบรรยากาศและมีลักษณะเป็นก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse gases) ซึ่งมีผลทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global warming) โดยจะมีผลนับร้อยปี เนื่องจากต้องใช้เวลาในการย่อยสลายที่ยาวนานมาก

1. ก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse gas) เป็นก๊าซที่มีคุณสมบัติในการดูดซับคลื่นรังสีความร้อน ซึ่งมีความจำเป็นต่อการรักษาอุณหภูมิในชั้นบรรยากาศของโลกให้มีค่าคงที่ ซึ่งในชั้นบรรยากาศของโลกจะประกอบไปด้วยก๊าซหลายชนิด ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกันมีทั้งเพิ่มขึ้นและลดลงตามคุณสมบัติของก๊าซแต่ละชนิด ถ้าหากในชั้นบรรยากาศของโลกไม่มีก๊าซเรือนกระจก จะทำให้อุณหภูมิในตอนกลางวันร้อนจัด และทำให้อุณหภูมิในตอนกลางคืนหนาวจัด เนื่องจากก๊าซเรือนกระจกทำหน้าที่ดูดคลื่นรังสีความร้อนไว้ในตอนกลางวัน พอถึงเวลากลางคืนจะ

ค่อยๆปล่อยรังสีความร้อนออกมา ซึ่งจะทำให้ชั้นบรรยากาศของโลกไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน ซึ่งก๊าซเรือนกระจกที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดภาวะโลกร้อนแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่

1.1 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) คือก๊าซที่เกิดขึ้นในชั้นบรรยากาศของโลกจากธรรมชาติและเกิดจากฝีมือมนุษย์ เช่น การเผาไหม้เชื้อเพลิง ทั้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและการใช้น้ำมันจากเชื้อเพลิงในรถยนต์ และรวมถึงการตัดไม้ทำลายป่า การเผาป่า เพื่อการทำพื้นที่อยู่อาศัย ซึ่งถือว่าเป็นตัวการสำคัญในการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศ หน่วยงานคณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ หรือ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) ยังระบุอย่างชัดเจนว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซเรือนกระจกที่ทำให้เกิดการสะสมพลังงานความร้อนในชั้นบรรยากาศของโลกมากที่สุดเมื่อเทียบกับก๊าซชนิดอื่น

1.2 ก๊าซมีเทน (CH_4) คือก๊าซที่เกิดจากการย่อยสลายของซากสิ่งมีชีวิต ทั้งซากพืชและซากสัตว์ เช่น จากการทำนา การเผาไหม้ของซากพืชซากสัตว์ และการเผาไหม้ของถ่านหินน้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ

1.3 ก๊าซไนตรัสออกไซด์ (N_2O) คือก๊าซที่เกิดจากอุตสาหกรรมที่ใช้กรดไนตริกในการผลิตเส้นใยไนลอน อุตสาหกรรมเคมี และอุตสาหกรรมพลาสติก

1.4 ก๊าซที่มีสารประกอบคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (CFC) คือก๊าซที่เกิดจากการใช้สารทำความสะอาดอุปกรณ์ไฟฟ้า แผงวงจรไฟฟ้า ชิ้นส่วนรถยนต์ รวมถึงเครื่องใช้ไฟฟ้าที่ใช้ในชีวิตประจำวัน เช่น สารทำความเย็นในตู้เย็น และเครื่องปรับอากาศ

การทำงานของระบบทำความเย็นในปัจจุบัน มีปัจจัยหลักอยู่สองส่วนที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม คือสารทำความเย็นที่ใช้เป็นสารทำงาน และพลังงานไฟฟ้าที่ใช้สำหรับระบบทำความเย็น ซึ่งสามารถพิจารณาผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อมของระบบทำความเย็นได้จากค่าดัชนีผลกระทบที่มีต่อการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนเทียบเท่าโดยรวม (Total equivalent warming impact หรือ TEWI) ซึ่งเกิดจากการนำเอาผลกระทบทางตรงที่มาจากสารทำความเย็น (Direct effect) รวมกับผลกระทบทางอ้อมจากการผลิตพลังงาน (Indirect effect) โดยที่ TEWI มีหน่วยเป็นมวลของคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (kg/CO_2 equivalent) สามารถเขียนสมการสำหรับการคำนวณ TEWI ได้ตามสมการ 2.18 (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2005)

TEWI = Direct effect + Indirect effect

$$TEWI = \left[(GWP \times m \times L \times N) + (GWP \times m\,(1 - \alpha)) \right] + (E \times \beta \times n) \qquad (2.18)$$

เมื่อ TEWI คือค่าดัชนีผลกระทบที่มีต่อการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนเทียบเท่าโดยรวม

GWP คือค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน

E คือผลกระทบทางอ้อมที่มีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการที่ใช้พลังงานในการดำเนินงานต่อปี (kWh)

L คือการรั่วไหลของสารทำความเย็นต่อปี (กิโลกรัม/ปี)

N คือระยะเวลาที่สารทำเย็นอยู่บนชั้นบรรยากาศ (ปี)

m คือการเติมสารทำความเย็น (กิโลกรัม)

α คือปัจจัยที่มีการนำสารทำความเย็นกลับมาใช้ใหม่

n คืออายุการใช้งานของระบบ (ปี)

β คือปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการผลิตไฟฟ้าสำหรับใช้ในการทำงานของท่อวอร์เท็กซ์

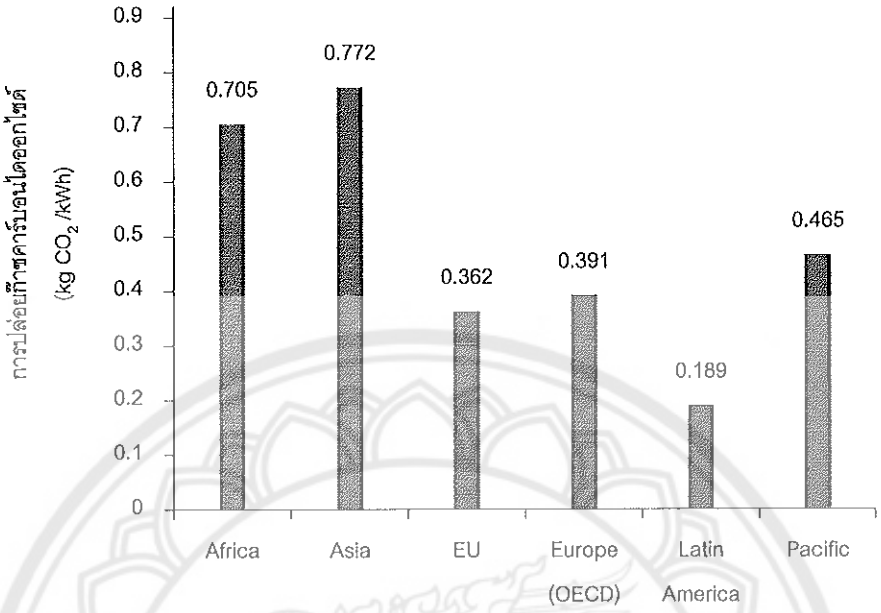
ตาราง 1 ก๊าซเรือนกระจกที่ถูกควบคุมภายใต้พิธีสารเกียวโตและค่า GWP100

ก๊าซเรือนกระจก	อักษรย่อ	อายุในชั้นบรรยากาศ (ปี)	ศักยภาพที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (GWP 100 year)
1. ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	CO_2		1
2. ก๊าซมีเทน	CH_4	12	23
3. Hydrofluorocarbons	HFC	1.4-270	122-14,310
4. Perfluorinated compounds	PEC	740-50,000	5,820-12,010
5. Hydrochlorofluorocarbons	HCFC	1.3-17.9	76-2,270
6. Sulphur hexafluoride	SF_3	3200	22,450
7. Nitrogen trifluoride	NF_3	740	10,970

ที่มา: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2005

เมื่อก๊าซเรือนกระจกมีการขยายเพิ่มขึ้น จะทำให้ความสามารถในการกักเก็บความร้อนในชั้นบรรยากาศมากขึ้น ผลคือจะทำให้อุณหภูมิที่ชั้นบรรยากาศของโลกเพิ่มสูงขึ้นด้วย อีกทั้งก๊าซเรือนกระจกแต่ละชนิดยังมีค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global Warming Potential; GWP) ที่แตกต่างกัน ค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าค่าความสามารถในการกักเก็บความร้อน ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากก๊าซเรือนกระจกแต่ละชนิดมีความสามารถทำให้เกิดผลกระทบต่อสภาพภูมิอากาศต่างกัน จึงต้องมีหน่วยวัดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจาก GWP ซึ่งจะวัดทั้งผลที่ทำให้เกิดภาวะเรือนกระจกและระยะเวลาในการคงอยู่ในชั้นบรรยากาศ โดยจะเปรียบเทียบกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากรายงานของคณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยเรื่องการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Intergovernmental Panel on Climate Change) หรือ IPCC ได้วิเคราะห์ค่า GWP จากการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของสารทำความเย็นแต่ละชนิดภายใต้พิธีสารเกียวโต (Kyoto Protocol) และอนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (UNFCCC) เพื่อนำมาวิเคราะห์ผลกระทบที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อนทั้งทางตรงและทางอ้อม TEWI และสามารถพิจารณาค่า GWP ในช่วงระยะเวลา 100 ปี ได้จากตาราง 1

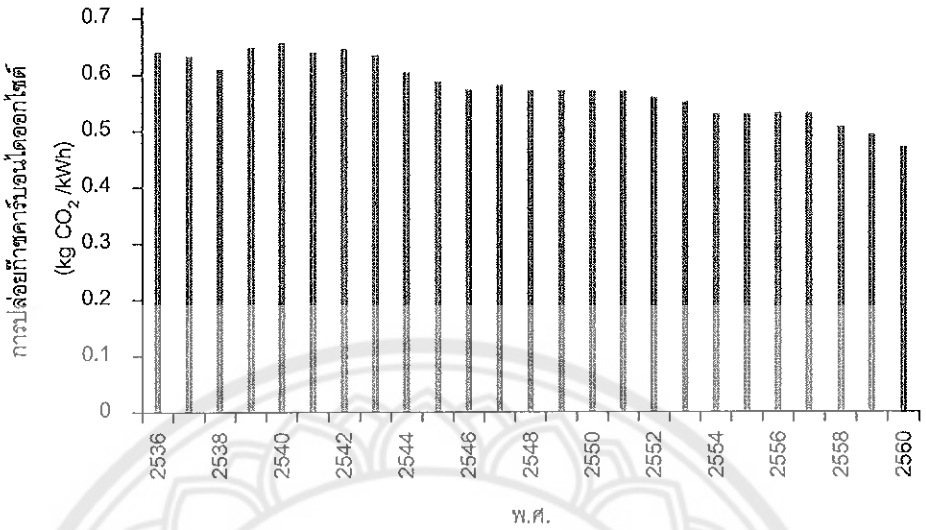
การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตไฟฟ้าในแต่ละประเทศมีความแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีและเชื้อเพลิงที่ถูกนำมาใช้ในการผลิตไฟฟ้า เช่น ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ ระบบวงจรรวม พลังน้ำ และอื่นๆ ซึ่งมีการคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ การปล่อยก๊าซเรือนกระจก ซึ่งมีผลเกี่ยวข้องกับการใช้พลังงาน แต่ถึงอย่างไรการปล่อยก๊าซที่เป็นปัญหาหลักของภาวะเรือนกระจกหรือภาวะโลกร้อนก็คือการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยมีสำนักงานพลังงานสากล (International energy agency) เป็นผู้ประเมินการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของการใช้พลังงานระดับประเทศและระดับภูมิภาค โดยมีการคำนวณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการผลิตต่อปริมาณการใช้ไฟฟ้าระดับประเทศแสดงข้อมูลตามภาพ 18 จากภาพภูมิภาคเอเชียมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดเนื่องจากมีการใช้เชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์เป็นหลัก 79% แต่ในทางกลับกันลาตินอเมริกามีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำสุดเนื่องจากใช้พลังงานหมุนเวียนเป็นหลัก 72%



ภาพ 18 การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของการใช้ไฟฟ้าในแต่ละภูมิภาค

ที่มา: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2005

จากข้อมูลสถิติการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)จากการผลิตไฟฟ้า ของสำนักงานนโยบายและแผนพลังงานกระทรวงพลังงาน พบว่าประเทศไทยมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อหน่วยการผลิตไฟฟ้าเฉลี่ย 0.465 kgCO_2/kWh เนื่องจากใช้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ 60% รองลงมาคือถ่านหิน/ลิกไนต์ 18% ไฟฟ้านำเข้า 12% พลังงานหมุนเวียน 8% พลังงานน้ำ 2% และน้ำมัน 0.2% ซึ่งจะเห็นว่าการปล่อย CO_2 มีค่าต่ำกว่าค่าเฉลี่ยของทวีปเอเชีย แต่ยังมีค่าสูงกว่าสหภาพยุโรปและประเทศที่พัฒนาแล้วในทวีปอเมริกา การผลิตไฟฟ้าของประเทศไทยในที่นี้หมายถึงการผลิตไฟฟ้ารวมของระบบการไฟฟ้าฝ่ายผลิต (กฟผ.) และการผลิตไฟฟ้าสุทธิ (Net energy gerneration) ของผู้ผลิตไฟฟ้าเอกชนรายใหญ่ ผู้ผลิตไฟฟ้าเอกชนรายเล็ก และผู้ผลิตไฟฟ้าเอกชนรายเล็กมาก ในแต่ละปีประเทศไทยมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยจะแสดงข้อมูลสถิติการปล่อยก๊าซ CO_2 ของประเทศไทยในช่วงเดือนมกราคมถึงเดือนกันยายนตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ซึ่งในปี 2560 พบว่ามีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 0.471 kgCO_2/kWh แสดงข้อมูลสถิติการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทยที่เกิดขึ้นต่อหน่วยการผลิตไฟฟ้าตามภาพ 19 (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2561)



ภาพ 19 การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อหน่วยการผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย

ที่มา: สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2561

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ท่อวอร์เท็กซ์เป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่ง ซึ่งเป็นที่รู้จักมานานในงานด้านวิศวกรรม จึงมีนักวิจัยหลายท่านให้ความสนใจศึกษาเพื่อพัฒนาท่อวอร์เท็กซ์มาอย่างต่อเนื่อง โดยจะมีหลายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ทั้งในส่วนของการออกแบบท่อวอร์เท็กซ์ ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับ ขนาด รูปทรง รูปร่างชิ้นส่วนที่สำคัญของท่อวอร์เท็กซ์ โดยมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องตั้งแต่ในอดีตถึงปัจจุบัน ดังข้อมูลข้างล่าง

Saidi, & Valipour (2003) ได้ศึกษาการทดลองและการสังเกตพฤติกรรมการทำงานของท่อวอร์เท็กซ์ จากการศึกษาพบว่าตัวแปรที่มีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิอากาศเย็นและประสิทธิภาพการทำงานของท่อวอร์เท็กซ์แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ ตัวแปรทางรูปทรงเรขาคณิต ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของท่อ เส้นผ่านศูนย์กลางปลายท่อเย็น ลักษณะของหัวฉีด และตัวแปรทางกายภาพ ได้แก่ ความดันแก๊ส ชนิดของแก๊ส ความชื้น และค่าสัดส่วนมวลอากาศเย็น ในการทดลองได้ศึกษาค่าที่มีความเหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้ทดสอบโดยใช้ท่อวอร์เท็กซ์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อร้อน 18 mm ความยาวท่อ 1000 mm ติดตั้งหัวฉีดทางเข้าท่อ 3 หัวฉีด ทดสอบที่ความดันอากาศ 3 bar และค่าสัดส่วนมวลอากาศเย็น 0.6 พบว่าท่อวอร์เท็กซ์สามารถลดอุณหภูมิบริเวณปลายท่อเย็นได้สูงถึง 43°C และมีประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกสูงสุด 45% และพบว่าสัดส่วนขนาดท่อร้อน(L/D) เป็นตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพของท่อวอร์เท็กซ์ ค่าที่เหมาะสมในการทดลองควรอยู่ในช่วงตั้งแต่ 20 ถึง 55.5 สำหรับความดันอากาศ 5 bar

Promvonge, & Eiamsa-ard (2005) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการแยกชั้นอุณหภูมิของท่อวอร์เท็กซ์ โดยใช้ท่อวอร์เท็กซ์ที่มีขนาดความยาวท่อ 720 mm เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ 16 mm และติดตั้งหัวฉีดทางเข้าท่อเท่ากับ 4 โดยทดสอบที่ความดัน 3.5 bar ค่าสัดส่วนมวลอากาศเย็น 0.38 พบว่าท่อวอร์เท็กซ์มีค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศทางเข้าและอากาศปลายท่อเย็นสูงสุดถึง 30°C และมีประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกสูงสุด 33% และเมื่อนำฉนวนกันความร้อนหุ้มบริเวณผิวของท่อวอร์เท็กซ์ พบว่าบริเวณปลายท่อเย็นของท่อวอร์เท็กซ์มีอุณหภูมิลดลงเมื่อเทียบกับไม่หุ้มฉนวนกันความร้อน 2-3°C

Aydin, & Baki (2006) ได้ศึกษาทดลองการออกแบบตัวแปรและสังเกตพฤติกรรมการไหลของอากาศของท่อวอร์เท็กซ์ พบว่าความดันอากาศทางเข้าท่อวอร์เท็กซ์และค่าสัดส่วนมวลอากาศเย็นของท่อวอร์เท็กซ์เป็นตัวแปรสำคัญที่บอกถึงประสิทธิภาพการทำงานของท่อวอร์เท็กซ์ ในการทดลองได้ศึกษากับท่อวอร์เท็กซ์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ18mm และมีการแปรค่าขนาดมุมวาล์วบริเวณปลายท่อร้อนตั้งแต่ 45°ถึง 60° ขนาดความยาวของท่อตั้งแต่ 250 ถึง 750 mm และแปรค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางปลายท่อทางเข้าที่ 5 6 และ 7 mm ผลการทดลองเมื่อให้ความดันอากาศอัดเข้าไปในท่อ 5 bar และปรับค่าสัดส่วนมวลอากาศเย็น 0.2 พบว่าขนาดของท่อวอร์เท็กซ์ที่มีความเหมาะสมที่สุดเมื่อความยาวของท่อ 350 mm หรืออัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 19.4 มุมวาล์วปลายท่อร้อน 50° และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้าท่อ 6 mm สามารถลดอุณหภูมิบริเวณปลายท่อเย็นลงได้สูงสุด 51°C ในขณะเดียวกันเมื่อทดสอบที่ความดัน 3 bar ท่อวอร์เท็กซ์สามารถลดอุณหภูมิบริเวณปลายท่อเย็นได้ 31°C

Agrawal, & Gawale (2014) ได้เขียนงานวิจัยทดลองตัวแปรที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของท่อวอร์เท็กซ์ ได้แก่ สัดส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง สัดส่วนมวลอากาศเย็น และความดันอากาศ ในงานวิจัย ทดสอบโดยใช้อากาศที่มีความดัน 4 bar อัดเข้าไปในท่อวอร์เท็กซ์ และปรับค่าสัดส่วนมวลอากาศเย็น 0.6 พบว่า เมื่อควบคุมให้ค่าสัดส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ 17.5 จะมีค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศทางเข้าท่อและอุณหภูมิปลายท่อเย็นสูงสุด 29°C มีประสิทธิภาพไอเซนโทรปิก 29.2% และมีค่าความสามารถการทำความเย็น 0.118 และยังพบว่าเมื่ออุณหภูมิทางเข้าท่อออกบริเวณปลายท่ออากาศเย็นลดลงสูงสุดเมื่อค่าสัดส่วนมวลอากาศเย็น 0.6

Eiamsa-ard (2543) ได้ศึกษาการลดอุณหภูมิอากาศด้วยท่อวอร์เท็กซ์ ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ ที่ความดันอากาศ 2 3 และ 3.5 bar และศึกษาจำนวนหัวฉีดทางเข้าท่อที่ 1 2 และ 4 หัวฉีด พบว่าเมื่อความดันอากาศเพิ่มขึ้นจะทำให้อุณหภูมิลดต่ำลง

ด้วย จากการศึกษาพบว่าเมื่อใช้หัวฉีดเท่ากับ 4 และความดันอากาศ 3.5 bar และปรับค่าสัดส่วนมวลอากาศที่ 0.328 จะทำให้มีประสิทธิภาพการทำความเย็นของท่อดีที่สุดและลดอุณหภูมิที่ปล่อยออกจากท่อเย็นถึง 30˚C

Aydin et al. (2010)ได้ศึกษาขนาดรูปทรงทางเรขาคณิตที่มีผลต่อการไหลของอากาศสำหรับท่อวอร์เท็กซ์ โดยได้ศึกษาการออกแบบปลายท่อเย็นและเกลียวหมุนบริเวณปลายท่อร้อนของท่อวอร์เท็กซ์ คณะผู้วิจัยได้ออกแบบและสร้างท่อวอร์เท็กซ์ ให้ท่อมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 10 mm ทำจาก Plexiglass ซึ่งเป็นแผ่นกระจกทนความร้อนทำด้วยโพลิเมอร์ทนทานกว่ากระจกธรรมดา หัวฉีดและเกลียวหมุนปลายท่อร้อนทำจากทองเหลือง และบริเวณปลายท่อทั้ง3ด้าน ทำจาก Delrin หรือเรียกอีกชื่อว่า Polyoxy methylene plastic ซึ่งเป็นพลาสติกชนิดหนึ่งที่มีความทึบแสง ผลการทดลองเมื่อป้อนอากาศที่มีความดัน 3 bar เข้าไปในท่อ ค่าสัดส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเท่ากับ 30 ความยาวของเกลียวหมุน 10 mm และปรับค่าสัดส่วนมวลอากาศเย็น 0.88 พบว่า ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิทางเข้าท่อและอุณหภูมิบริเวณปลายท่อเย็นมีค่าสูงสุด 46 ˚C มีประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกสูงสุด 25% และค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ 0.2

Im, & Yu (2012) ได้ศึกษาผลของตัวแปรทางเรขาคณิตที่มีผลต่อการแยกชั้นอุณหภูมิการไหลอากาศของท่อวอร์เท็กซ์สำหรับการออกแบบที่เหมาะสมที่สุด ได้ศึกษาสัดส่วนของพื้นที่หัวฉีดได้แก่ 0.130 0.142 0.153 0.164 และ 0.176 และศึกษาความดันที่ป้อนเข้าไปในท่อตั้งแต่ 0.39 ถึง 1.57 bar โดยท่อวอร์เท็กซ์มีสัดส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเท่ากับ 14 ผลการทดลองพบว่าท่อวอร์เท็กซ์ที่มีสัดส่วนพื้นที่หัวฉีด 0.142 จะมีค่าอุณหภูมิอากาศปลายท่อร้อนสูงที่สุดขณะที่สัดส่วนเท่ากับ 0.164 จะมีค่าอุณหภูมิอากาศปลายท่อเย็นต่ำที่สุด และยังพบว่าประสิทธิภาพในการแยกชั้นพลังงานที่มีผลเกิดจากความดันอากาศที่ป้อนเข้าไป จะทำให้เกิดความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็นสูงสุดที่สัดส่วนมวลอากาศเย็น 0.6

Darokar et al. (2012) ได้ศึกษาการทดลองของท่อวอร์เท็กซ์โดยศึกษาหัวฉีดที่บริเวณทางเข้าท่อ งานวิจัยนี้ได้ออกแบบท่อวอร์เท็กซ์ที่ทำจากทองเหลือง ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 12.5 mm ความยาวท่อ 225 mm และติดตั้งหัวฉีดทางเข้าท่อเท่ากับ 6 ในการทดลองมีการแปรค่าเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดตั้งแต่ 3-8 mm และมุมวาล์วหมุนบริเวณปลายท่อร้อนที่ 30˚ 45˚ 60˚ และ 90˚ พบว่าเมื่อทดสอบที่ความดันอากาศ 3 bar และที่มุมวาล์วหมุน 60˚ ท่อวอร์เท็กซ์มีค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิทางเข้าท่อและอุณหภูมิบริเวณปลายท่อเย็น 19 ˚C มีประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกสูงสุด 19% และค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ 0.150 ยังพบว่า

ท่อวอร์เท็กซ์จะให้ค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิทางเข้าท่อและอุณหภูมิปลายท่อเย็นสูงขึ้น เมื่อเพิ่มความดันอากาศเข้าไปในท่อวอร์เท็กซ์ให้สูงขึ้นด้วย

Devade, & Pise (2014) ได้ศึกษาผลของเส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณปลายท่อเย็นและรูปร่างวาล์วหมุนบริเวณปลายท่อร้อน เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพการทำงานของท่อวอร์เท็กซ์โดยออกแบบท่อวอร์เท็กซ์ที่ทำจากทองเหลืองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 36 mm ความยาว 225 mm ขนาดมุมวาล์ว 6˚ และติดตั้งหัวฉีดทางเข้าท่อเท่ากับ 2 ผลการทดลองที่ความดันอากาศ 3 bar และปรับค่าสัดส่วนอากาศเย็น 0.8-1 มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างทางเข้าและทางออกท่อเย็นสูงสุด 23˚C และค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ 0.095

ศีขรินทร์ โกมลหิรัญ (2555) ได้สร้างท่อวอร์เท็กซ์สำหรับระบบปรับอากาศในพื้นที่จำกัด จะต้องคำนึงถึงปัจจัยในการออกแบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับท่อวอร์เท็กซ์ พบว่าจำนวนหัวฉีดทางเข้า ควรมี 6 7 และ 8 หัวฉีด จากงานวิจัยของเขาพบว่าท่อวอร์เท็กซ์ที่ทำจากท่อพีวีซีมีความสามารถทำความเย็นได้จริง และมีประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับการออกแบบลักษณะทางเรขาคณิตของท่อ ในงานวิจัยนี้มีประสิทธิภาพการทำงานได้ดีเมื่อ สัดส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ เท่ากับ 30 สัดส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดด้านเย็นต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ 0.6 สัดส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดด้านร้อนต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ 0.4 จะต้องสอดคล้องกับค่าสัดส่วนมวลอากาศเย็นเท่ากับ 0.6 จะให้ค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิทางเข้าและทางออกปลายท่อเย็นสูงสุด 19˚C

Farzaneh-Gord, & Sadi (2014) ได้ศึกษาการพัฒนาประสิทธิภาพของท่อวอร์เท็กซ์โดยการออกแบบต้นกำเนิดกระแสหมุนวน ได้ศึกษาการทำงานของท่อวอร์เท็กซ์ที่มีความดันอากาศ 4 bar โดยสนใจศึกษา 3 ตัวแปร ได้แก่ แปรค่ามุมของช่องอากาศเย็นตั้งแต่ 0.7 ถึง 5.1 แปรค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องอากาศปลายท่อเย็นตั้งแต่ 5.6 ถึง 8.2 และแปรค่าสัดส่วนพื้นที่ของหัวฉีดตั้งแต่ 0.14 ถึง 0.17 พบว่าที่ค่าสัดส่วนมวลอากาศเย็นที่เหมาะสมที่สุด ท่อวอร์เท็กซ์มีประสิทธิภาพการทำความเย็นดีที่สุด เมื่อมีขนาดมุมของช่องอากาศเย็น 4.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องอากาศปลายท่อเย็น 6.4 และสัดส่วนพื้นที่ของหัวฉีด 0.14 สามารถให้ค่าความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็นสูงสุด 15˚C 21˚C และ 20˚C ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องอากาศเย็นและสัดส่วนพื้นที่ของหัวฉีดมีผลต่อการพัฒนาประสิทธิภาพการทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์สูงที่สุด

Pourmahmoud et al. (2015) ได้ศึกษาการทดลองเกี่ยวกับผลของเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องอากาศเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ โดยที่ท่อวอร์เท็กซ์ทำจากสแตนเลสและบางส่วนทำจาก

อะลูมิเนียม ใช้อากาศที่ความดันอากาศ 5 bar เขาได้ศึกษาขนาดช่องอากาศเย็น ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์ 2 mm 3 mm และ 4 mm โดยที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อวอร์เท็กซ์ 8.5 mm ผลการทดลองที่บอกถึงขนาดช่องอากาศเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ที่เหมาะสม สามารถหาได้จากสัดส่วนช่องอากาศเย็นระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางช่องอากาศเย็นต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อวอร์เท็กซ์ ผลการทดลองพบว่าท่อวอร์เท็กซ์ที่มีสัดส่วนช่องอากาศเย็นที่ 0.47 0.24 และ 0.35 มีค่าความแตกต่างระหว่างอากาศทางเข้าและอากาศปลางท่อเย็นเท่ากับ 46°C 43°C และ 42°C ตามลำดับ นั่นแสดงว่าท่อวอร์เท็กซ์ที่มีขนาดสัดส่วนช่องอากาศเย็น 0.47 มีความสามารถการทำความเย็นสูงสุด

Kumar et al. (2017) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการทำความเย็นและการลดความชื้นโดยใช้ท่อวอร์เท็กซ์ โดยศึกษาสองกรณีคือกรณีไม่หุ้มฉนวนและกรณีหุ้มฉนวนให้กับท่อวอร์เท็กซ์ พบว่าความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็นเพิ่มขึ้น ที่สัดส่วนมวลอากาศเย็นตั้งแต่ 0 จนถึงจุดที่สูงสุด ประมาณ 0.3-0.5 หลังจากนั้นความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็นมีค่าลดลงตามค่าสัดส่วนมวลอากาศเย็น ซึ่งแสดงผลเหมือนกันทั้งในกรณีไม่หุ้มฉนวนและหุ้มฉนวน เช่นเดียวกับความชื้นสัมพัทธ์มีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงจุดหนึ่งหลังจากนั้นมีค่าลดลงตามสัดส่วนมวลอากาศเย็น ซึ่งแสดงผลเหมือนกันทั้งแบบหุ้มฉนวนและไม่หุ้มฉนวน ที่ความดันอากาศทางเข้าท่อ 4 bar พบว่าท่อวอร์เท็กซ์มีความชื้นสัมพัทธ์สูงสุดเท่ากับ 65% และ 67% ที่มีการหุ้มและไม่หุ้มฉนวน ตามลำดับ และยังพบว่าการหุ้มฉนวนที่ท่อวอร์เท็กซ์ทำให้ค่าความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็นและอากาศร้อนสูงกว่าการหุ้มฉนวน

สินีพร จันทร์สว่าง (2558) ได้ศึกษาถึงประสิทธิภาพการทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ที่ติดตั้งกับตู้ทดลอง โดยทดสอบที่ความดันอากาศ 3 bar และมีการแปรค่าสัดส่วนมวลอากาศเย็นตั้งแต่ 0.28-1 พบว่าที่ค่าสัดส่วนมวลอากาศเย็น 0.55 มีค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศทางเข้าท่อและอุณหภูมิอากาศปลายท่อเย็น ค่าประสิทธิภาพไอเซนโทรปิก และค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะการทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์สูงที่สุด คือ 27°C 0.3 และ 0.13 ตามลำดับ และพบว่าอากาศเย็นจากท่อวอร์เท็กซ์สามารถช่วยการชะลออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของอุปกรณ์ให้ความร้อนให้เกิดช้าลงได้จริง

นอกจากนี้ผู้วิจัยได้รวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบท่อวอร์เท็กซ์ ที่ได้จากการศึกษาด้วยการทดลองอีกหลายงานวิจัย โดยรวบรวมและสรุปดังตาราง 2

ตาราง 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบท่อวอร์เท็กซ์

ผู้วิจัย	รูปแบบการศึกษา	เงื่อนไขการศึกษา						ผลการศึกษา			
		ของไหล	P_{in}	L_h (mm)	D_h (mm)	D_c (mm)	จำนวนหัวฉีด	ΔT_c	ΔT_h	COP	η (%)
Saidi, & Valipour (2003)	การทดลอง	อากาศ	3 bar	-	-	$0.17D_h$*	-	5.5*	-	-	5.8*
						$0.28D_h$*		15.6*			16.2*
						$0.38D_h$*		27.8*			28.2*
						$0.5D_h$*		37.8*			38.2*
						$0.6D_h$*		35.8*			37.0*
Promvonge, & Eiamsa-ard (2005)	การทดลอง	อากาศ	3.5 bar	720	16	8	1	19*	-	-	21.5*
							2	29*			31*
							4	30*			33*
Aydin, & Baki (2006)	การทดลอง	อากาศ	5 bar	250	18	6	-	27*	65*	-	-
				350				51*	75*		
				550				46*	62*		
				750				43*	62*		

ตาราง 2 (ต่อ)

ผู้วิจัย	รูปแบบการศึกษา	เงื่อนไขการศึกษา						ผลการศึกษา			
		ของไหล	P_{in}	L_h (mm)	D_h (mm)	D_c (mm)	จำนวนหัวฉีด	ΔT_c	ΔT_h	COP	η (%)
Im, & Yu (2012)	การทดลอง	อากาศ	0.39 bar	$14D_h$	20	-	6	8.5*	8*	-	-
			0.69 bar					12.5*	14*		
			0.98 bar					14*	13*		
			1.27 bar					18*	17.5*		
			1.57 bar					19*	21*		
Dincer et al. (2013)	การทดลอง	อากาศ	460 kPa	150	10	5	5	23*	33*	-	-
				160				28*	33.5*		
				170				25*	39.5		
				180				28.6	36.5*		
Agrawal et al. (2014)	การทดลอง	อากาศ	4 bar	125	10	4	-	27	-	0.11	27.2
				175				29		0.118	29.2
				225				24		0.098	24.3

ตาราง 2 (ต่อ)

ผู้วิจัย	รูปแบบการศึกษา	เงื่อนไขการศึกษา						ผลการศึกษา			
		ของไหล	P_{in}	L_h (mm)	D_h (mm)	D_c (mm)	จำนวนหัวฉีด	ΔT_c	ΔT_h	COP	η (%)
Fazaneh-Gord, & Sadi (2014)	การทดลอง	อากาศ	4 bar	95.2	10	5.6	6	17.5*	40*	-	19.0*
						6		19*	35*		21.5*
						6.4		21*	47*		22.5*
						7.7		12.5*	38*		13.5*
						8.2		11*	38*		11.0*
Attalla et al. (2017)	การทดลอง	อากาศ	6 bar	112.5	7.5	5	2	23*	-	0.19*	-
							3	25		0.21	
							6	21*		0.175*	

หมายเหตุ: * คือค่าประมาณจากกราฟ

P_{in} คือความดันอากาศทางเข้า L_h คือความยาวของท่อร้อน D_h คือเส้นผ่านศูนย์กลางท่อร้อน

D_c คือเส้นผ่านศูนย์กลางช่องอากาศเย็น ΔT_c คือความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็น ΔT_h คือความแตกต่างอุณหภูมิอากาศร้อน

COP คือสมรรถนะของท่อวอร์เท็กซ์ η คือประสิทธิภาพไอเซนโทรปิก

จากงานวิจัยที่ได้ศึกษามาข้างต้น และจากตาราง 2 จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ขึ้นอยู่กับสองปัจจัยหลัก คือปัจจัยทางกายภาพ ได้แก่ ความดันอากาศที่ป้อนเข้าไปในท่อ และสัดส่วนมวลอากาศเย็น อีกปัจจัยหนึ่งคือปัจจัยทางเรขาคณิต ได้แก่ ขนาดความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางปลายท่อ จำนวนและลักษณะของหัวฉีด และอื่นๆ โดยจะสรุปได้ว่า

1. ความดันอากาศที่ป้อนให้กับท่อวอร์เท็กซ์มีผลต่อประสิทธิภาพของท่อวอร์เท็กซ์ เมื่อเพิ่มความดันให้สูงขึ้น จะทำให้ค่าความแตกต่างอุณหภูมิอากาศร้อนและค่าความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็นเพิ่มสูงขึ้น จะส่งผลให้ความสามารถในการทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์จะเพิ่มสูงขึ้นมากด้วย

2. จำนวนหัวฉีดที่มีการนำมาใช้ในการทดลองติดตั้งกับท่อวอร์เท็กซ์ มีตั้งแต่ 1 ถึง 6 หัวฉีด ประสิทธิภาพของท่อวอร์เท็กซ์จะดีขึ้นเมื่อจำนวนหัวฉีดที่นำมาติดตั้งมากขึ้น เพราะทำให้การแยกชั้นของอุณหภูมิสูงขึ้นและทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิที่ป้อนเข้าไปในท่อและปล่อยออกจากท่อมีค่าสูงขึ้นด้วย

3. ในการออกแบบสร้างท่อวอร์เท็กซ์มีการคำนึงถึงสัดส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (L/D) พบว่าถ้าสัดส่วนมีค่าที่เหมาะสมจะทำให้ได้ประสิทธิภาพของท่อดีขึ้นด้วย

4. มุมของหัวฉีดที่ทำให้เกิดการหมุนของอากาศที่มีขนาดเล็กมีประสิทธิภาพในการทำความร้อนของท่อวอร์เท็กซ์ดีขึ้นด้วย

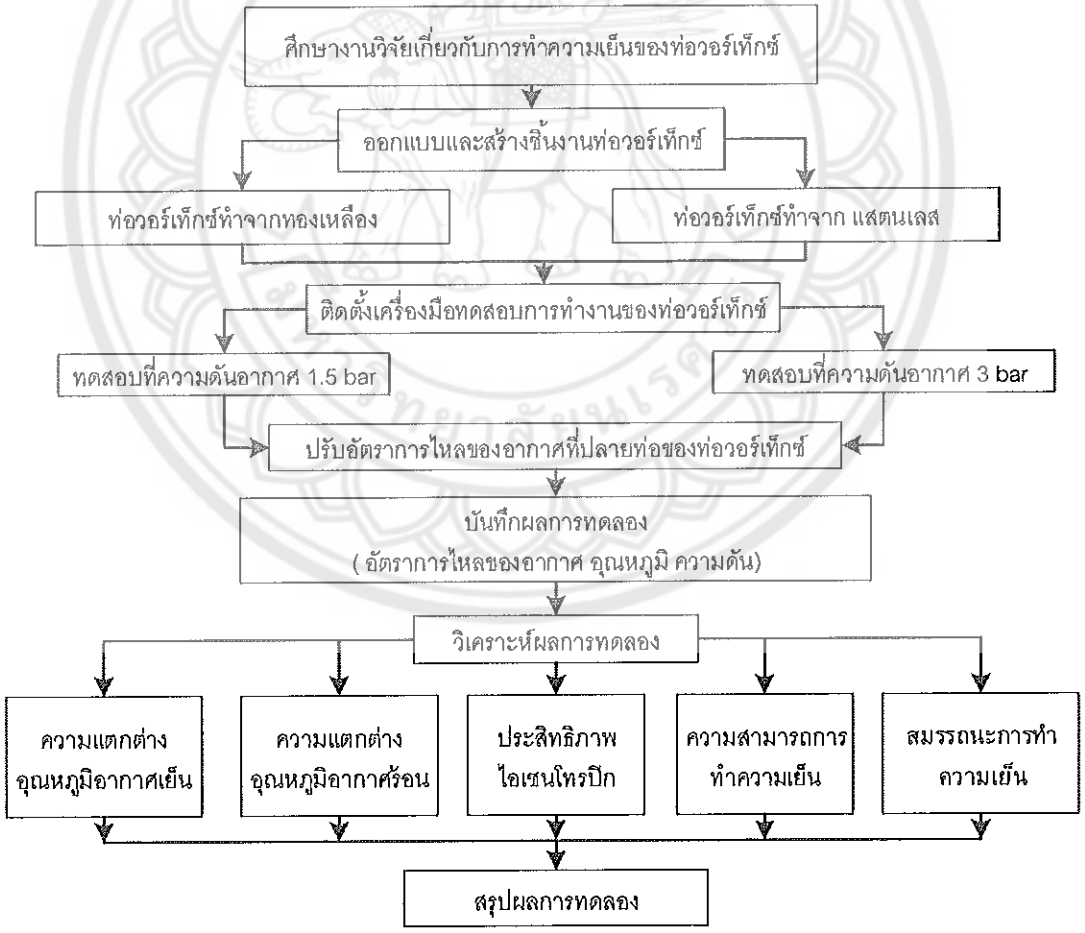
5. ชิ้นส่วนประกอบของท่อวอร์เท็กซ์ทำจากวัสดุหลายชนิด ได้แก่ ทองเหลือง สแตนเลส พลาสติก อะลูมิเนียม พีวีซี

ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้เห็นถึงประโยชน์และความสามารถการทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ซึ่งใช้เพียงอากาศในการทำความเย็น ไม่ใช้สารทำงานที่มีผลกระทบต่อภาวะก๊าซเรือนกระจก งานวิจัยชิ้นนี้จึงได้ออกแบบและสร้างอุปกรณ์ทำความเย็นท่อวอร์เท็กซ์เพื่อให้มีประสิทธิภาพการทำงาน และมีความสามารถการทำความเย็นที่ดี โดยศึกษาถึงโครงสร้างที่ได้ออกแบบและอ้างอิงจากงานวิจัย เพื่อเป็นการพัฒนาท่อวอร์เท็กซ์ให้มีประสิทธิภาพการทำความเย็นดีมากขึ้น

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้กล่าวถึงวิธีดำเนินการวิจัยเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของท่อวอร์เท็กซ์ โดยเริ่มจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบท่อวอร์เท็กซ์ โดยการรวบรวมข้อมูลจากงานวิจัยที่ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพของท่อวอร์เท็กซ์จากนักวิจัยที่ศึกษามาก่อนหน้า เพื่อทำการออกแบบท่อวอร์เท็กซ์ จากนั้นทำการสร้างท่อวอร์เท็กซ์ขึ้นมา 2 ชุด ได้แก่ท่อวอร์เท็กซ์ที่ทำจากทองเหลือง 1 ชุด และทำจากสแตนเลส 1 ชุด ทำการทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพการทำความเย็น โดยได้สรุปลำดับขั้นตอนการดำเนินงานดังภาพ 20



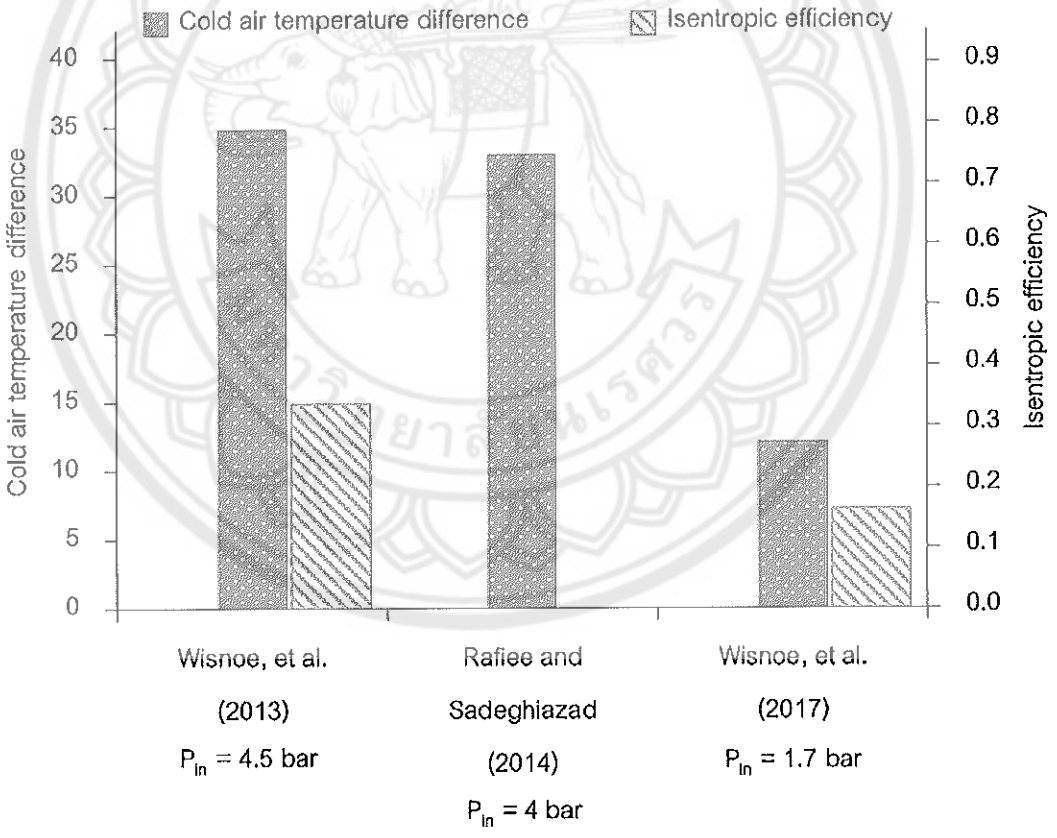
ภาพ 20 แผนผังขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

ขนาดชิ้นส่วนประกอบของท่อวอร์เท็กซ์

การออกแบบส่วนประกอบของท่อวอร์เท็กซ์ ทำการกำหนดขนาดของชิ้นส่วนที่สำคัญโดยการอ้างอิงจากงานวิจัยของนักวิจัยหลายท่านและจากลักษณะรูปร่างของชิ้นส่วนประกอบต่าง ๆ ที่ได้ทำการศึกษามาก่อนหน้านี้ ซึ่งจะมีรายละเอียดการศึกษาขนาดส่วนประกอบเฉพาะที่สำคัญดังนี้

1. **ต้นกำเนิดกระแสหมุนวน** (Vortex generator)

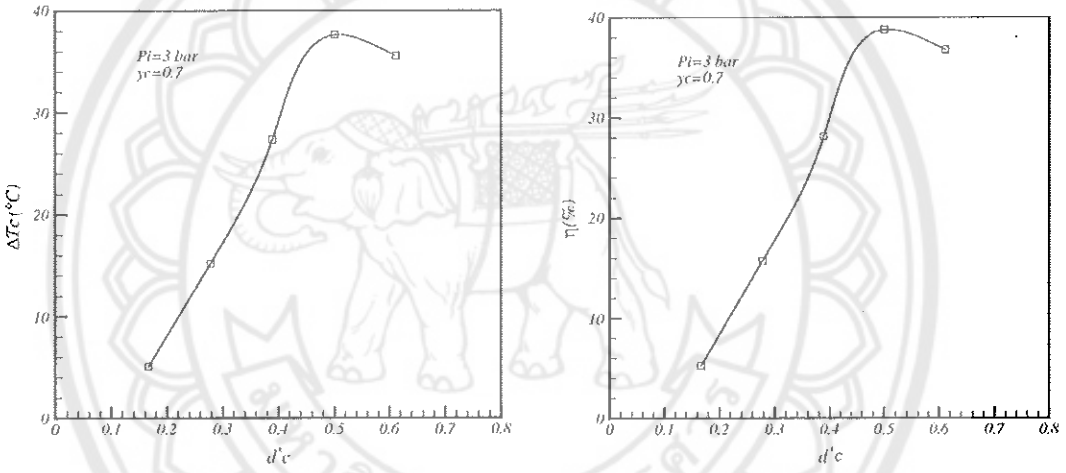
ต้นกำเนิดกระแสหมุนวนเป็นชิ้นส่วนหนึ่งภายในท่อวอร์เท็กซ์ ประกอบไปด้วยหัวฉีดทำหน้าที่เป็นจุดกำเนิดทำให้เกิดกระแสหมุนวนและทำให้เกิดการแยกชั้นระหว่างกระแสอากาศและกระแสอากาศเย็นออกจากกัน อีกทั้งยังประกอบด้วยช่องกลมทรงกระบอกหรือเรียกว่าช่องอากาศเย็นสำหรับเป็นทางออกของอากาศเย็นมีรายละเอียดดังนี้



ภาพ 21 ความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็นและประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของท่อวอร์เท็กซ์มีหัวฉีดเท่ากับ 6

1.1 **หัวฉีด** (Nozzle)

จากงานวิจัยที่ศึกษามาก่อนหน้า จำนวนหัวฉีดที่นิยมนำมาศึกษามีตั้งแต่ 1 ถึง 6 ดังนั้นผู้วิจัยจึงศึกษาต้นกำเนิดกระแสหมุนวนที่มีจำนวนหัวฉีดเท่ากับ 6 เพื่อนำมาศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของท่อวอร์เท็กซ์ นอกจากนี้ยังได้รวบรวมผลการศึกษาของท่อวอร์เท็กซ์ที่มีจำนวนหัวฉีดเท่ากับ 6 แสดงในภาพ 21 จากภาพทั้ง 3 งานวิจัยจะเห็นว่าจำนวนหัวฉีดที่เท่ากัน ไม่สามารถทำให้ประสิทธิภาพของท่อวอร์เท็กซ์เท่ากันได้ แต่ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นด้วย เช่น ความดันอากาศที่ป้อนเข้าไปในท่อ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ประสิทธิภาพของท่อวอร์เท็กซ์ของภาพได้จากความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็นและประสิทธิภาพไอเซนโทรปิก



ภาพ 22 (ซ้าย) ความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็น (ขวา) ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกต่อสัดส่วนของช่องอากาศเย็น

ที่มา: Saidi, & Valipour, 2003

1.2 **สัดส่วนช่องอากาศเย็น** (Cold orifice)

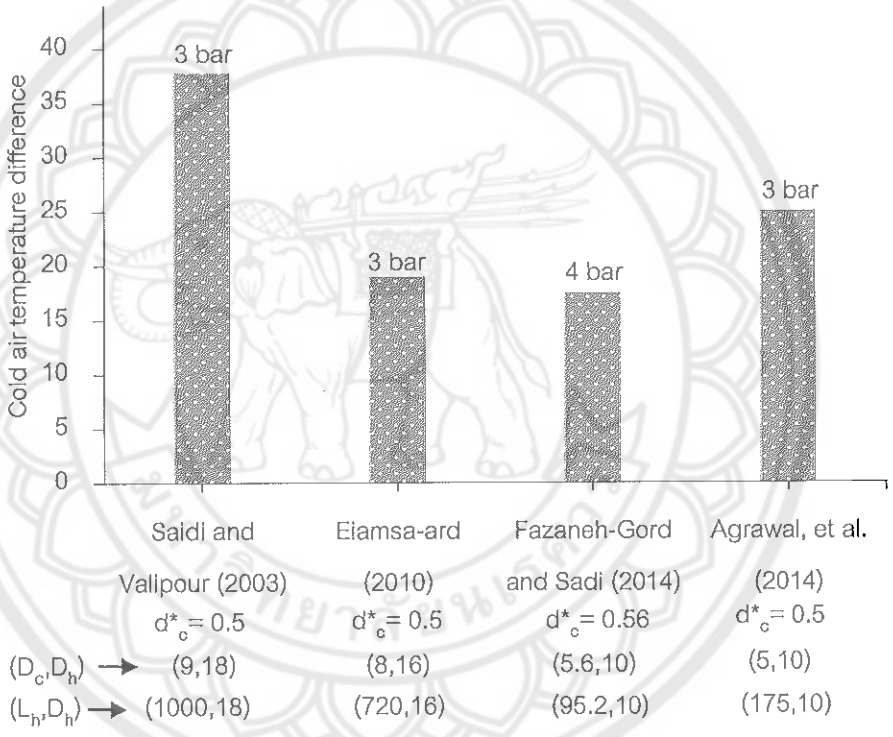
ช่องอากาศเย็น มีลักษณะเป็นช่องกลม ถูกติดตั้งที่ปลายท่อทางออกด้านเย็น ทำหน้าที่เป็นช่องสำหรับปล่อยกระแสอากาศเย็นไหลออกนอกท่อวอร์เท็กซ์ จากงานวิจัยของ Saidi, & Valipour 2003 ได้ศึกษาขนาดของช่องอากาศเย็นต่อประสิทธิภาพการทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ จากการศึกษาขนาดของช่องอากาศเย็นจะมีความสัมพันธ์กับขนาดของท่อร้อน โดยพิจารณาตามสัดส่วนของช่องอากาศเย็นต่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อร้อน ตามความสัมพันธ์

$$d_c^* = \frac{D_c}{D_h} \tag{3.1}$$

เมื่อ d_c^* คือสัดส่วนช่องอากาศเย็น

D_c คือเส้นผ่านศูนย์กลางช่องอากาศเย็น(mm)

D_h คือเส้นผ่านศูนย์กลางท่อร้อน(mm)



ภาพ 23 ความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ที่มีขนาดช่องอากาศเย็นใกล้เคียงกันเท่ากับ 0.5 ถึง 0.56

จากผลการศึกษาสัดส่วนของช่องอากาศเย็นตั้งแต่ 0.17 ถึง 0.6 พบว่าท่อวอร์เท็กซ์มีประสิทธิภาพการทำความเย็นสูงสุดที่สัดส่วนช่องอากาศเย็น 0.5 ซึ่งได้นำผลการศึกษามาอ้างอิงในภาพ 22 ต่อมามีนักวิจัยอีกหลายท่านที่สนใจศึกษาการออกแบบตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับท่อวอร์เท็กซ์ ซึ่งได้รวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องตามภาพ 23 ซึ่งกล่าวถึงขนาดของช่องอากาศเย็น โดยศึกษาสัดส่วนของช่องอากาศเย็นที่มีความเหมาะสมภายใต้เงื่อนไขในการศึกษาใกล้เคียงกัน พบว่าท่อวอร์เท็กซ์ที่นิยมนำมาศึกษามีสัดส่วนของช่องอากาศเย็นที่เหมาะสมที่สุดมีค่าประมาณ 0.5-0.6

เนื่องจากท่อวอร์เท็กซ์มีค่าความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็นสูงสุด ดังนั้นในงานวิจัยชิ้นนี้ผู้วิจัยได้ออกแบบสัดส่วนช่องอากาศเย็นเท่ากับ 0.5 เพื่อสอดคล้องกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และจากภาพ 23 พบว่าขนาดสัดส่วนของช่องอากาศเย็นเท่ากับ 0.5 สามารถลดอุณหภูมิที่ปลายท่อเย็นได้สูงสุดถึง 37.8°C (Saidi, & Valipour, 2003) ซึ่งสูงกว่างานวิจัยที่มีสัดส่วนช่องอากาศเย็นที่เท่ากันและใกล้เคียงกัน

2. **สัดส่วนขนาดของท่อร้อน**

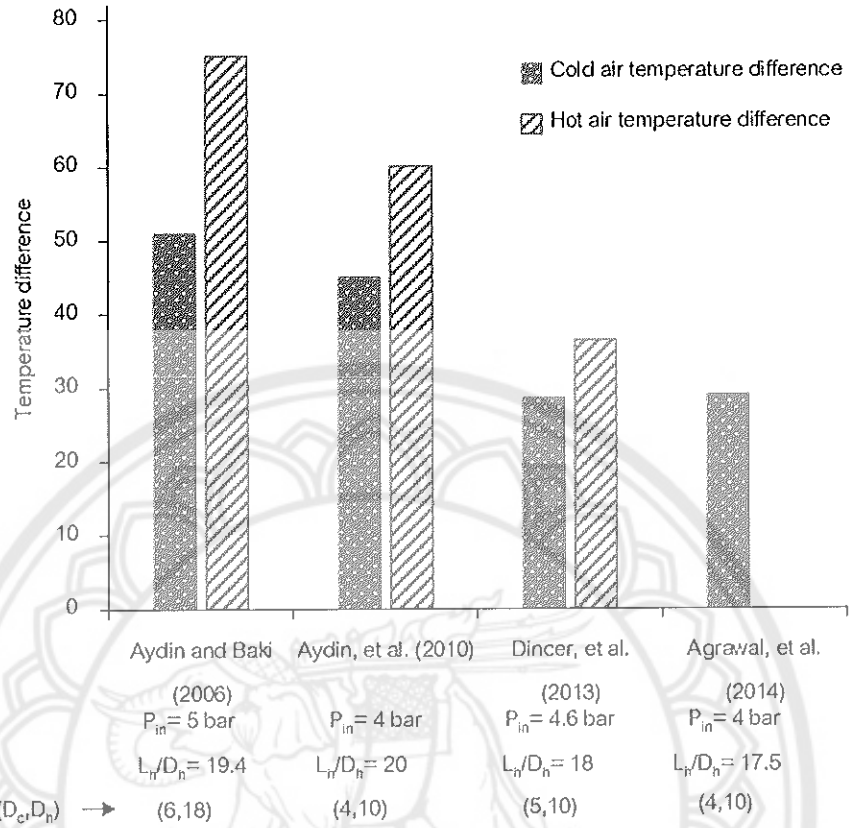
ในส่วนของท่อร้อนนั้น เป็นบริเวณที่มีการเกิดการแยกชั้นระหว่างอุณหภูมิของอากาศร้อนและอุณหภูมิของอากาศเย็นออกจากกัน ซึ่งถือได้ว่าท่อร้อนเป็นส่วนประกอบสำคัญของท่อวอร์เท็กซ์ มีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอก พื้นผิวภายในเรียบ ไม่ขรุขระ ในส่วนของการออกแบบขนาดของท่อร้อนต้องคำนึงถึงความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อที่เหมาะสม มีนักวิจัยหลายท่านศึกษาผลของความยาวท่อต่อประสิทธิภาพการทำงานของท่อวอร์เท็กซ์ พบว่าประสิทธิภาพของท่อวอร์เท็กซ์ในส่วนของท่อร้อนนั้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับความยาวเพียงอย่างเดียวแต่ต้องมีความสัมพันธ์กับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อร้อนด้วย จะเรียกว่าสัดส่วนขนาดท่อร้อน เขียนความสัมพันธ์ได้ว่า

$$\text{สัดส่วนขนาดท่อร้อน} = \frac{L_h}{D_h} \tag{3.2}$$

เมื่อ L_h คือความยาวของท่อร้อน (mm)

D_h คือเส้นผ่านศูนย์กลางท่อร้อน (mm)

จากงานวิจัยของ Aydin, & Baki (2006) ได้ศึกษาการออกแบบขนาดของท่อวอร์เท็กซ์ รวมถึงศึกษาขนาดความยาวของท่อร้อน พบว่าขนาดความยาวของท่อร้อนที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบมีค่าสัดส่วนขนาดท่อร้อนเท่ากับ 20 นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้รวบรวมงานวิจัยที่กล่าวถึงสัดส่วนขนาดท่อร้อน ตามภาพ 24 จะเห็นได้ว่าสัดส่วนขนาดท่อร้อนที่ถูกนำมาศึกษามีค่าประมาณ 20 โดยผลจากงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการทำงานดีที่สุด ในงานวิจัยนี้จึงเลือกพิจารณาสัดส่วนขนาดของท่อร้อนของท่อวอร์เท็กซ์เท่ากับ 20 ในงานวิจัยนี้ต้องการพื้นผิวภายในของท่อร้อนที่มีความเรียบ ไม่ขรุขระ จึงใช้ท่อที่มีกระบวนการผลิตตามมาตรฐานและมีวางจำหน่าย ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเท่ากับ 10 mm ดังนั้นเพื่อให้ได้สัดส่วนขนาดท่อร้อนเท่ากับ 20 ความยาวของท่อร้อนจะเท่ากับ 200 mm



ภาพ 24 ความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็นและอากาศร้อนของท่อวอร์เท็กซ์ที่มีสัดส่วน
ขนาดท่อร้อนเท่ากับ 17.5 ถึง 20

3. **ชนิดวัสดุของท่อวอร์เท็กซ์**

จากงานวิจัยที่ศึกษามาก่อนหน้า พบว่าวัสดุที่นำมาสร้างท่อวอร์เท็กซ์มาจากวัสดุหลายชนิด เช่น สแตนเลส อะลูมิเนียม ทองเหลือง ทองแดง PVC พลาสติก พิสิทธิ์ อะมุตะคุ และไพรสัณฑ์ ศักดิ์ชัชวาลย์ (2545) ได้ศึกษาสมรรถนะของท่อวอร์เท็กซ์ที่ทำจากทองแดง ท่อวอร์เท็กซ์มีอัตราการทำความเย็นและความร้อน 0.3681 W และ 58.942 W ตามลำดับ จากงานวิจัยของ Gao et al. (2005) ศึกษาท่อวอร์เท็กซ์ที่ทำจากทองเหลืองทั้งชุดยกเว้นต้นกำเนิดกระแสหมุนวนที่ทำจากพลาสติกมีชื่อว่า Phenol fabric เพื่อเป็นการลดการนำความร้อน ต่อมา Dincer et al. (2013) ได้ศึกษาท่อวอร์เท็กซ์ที่ทำจากทองเหลืองทั้งชุดต่อการเปลี่ยนแปลงความยาวท่อที่ความดัน 4.6 bar พบว่ามีประสิทธิภาพการทำความร้อนสูงสุด ที่ 39.5°C ที่ 17D_h และมีประสิทธิภาพการทำความเย็นสูงสุด -28.6°C ที่ 18D_h นอกจากนี้งานวิจัยของ Mohammadi, & Farhadi (2013) ก็ได้ศึกษาท่อวอร์เท็กซ์ที่ทำงานทองเหลืองเช่นกัน จากงานวิจัยของ Kaya et al. (2018) ได้ศึกษาประสิทธิภาพของท่อวอร์เท็กซ์ ในส่วนของชนิดวัสดุของต้นกำเนิดกระแสหมุนวนที่ทำจากวัสดุ 3

ชนิด ได้แก่ พลาสติก อะลูมิเนียม และทองเหลือง พบว่าชนิดของวัสดุมีผลต่อประสิทธิภาพของท่อวอร์เท็กซ์ ซึ่งอะลูมิเนียมสามารถให้ความแตกต่างอุณหภูมิสูงที่สุด จะเห็นได้ว่าแต่ละงานวิจัยมีการเลือกใช้ชนิดวัสดุที่แตกต่างกัน และมีความนิยมเลือกใช้ทองเหลืองในการทำท่อวอร์เท็กซ์เป็นส่วนใหญ่ ไม่เพียงแต่ที่กล่าวมาข้างต้นเท่านั้น วัสดุอีกหนึ่งชนิดที่นิยมนำมาใช้งานด้านการค้าอย่างแพร่หลายคือวัสดุที่ทำจากสแตนเลส เนื่องจากเป็นวัสดุประเภทโลหะที่มีความแข็งแรง ทนทาน และไม่เกิดสนิมด้วย เมื่อพิจารณาชนิดของวัสดุสำหรับการสร้างท่อวอร์เท็กซ์แล้ว มีหลากหลายงานวิจัยที่ใช้หลากหลายชนิดวัสดุสำหรับการศึกษา ทั้งในเรื่องของขนาดและลักษณะส่วนประกอบที่แตกต่างกัน ซึ่งยากต่อการนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของท่อ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ออกแบบและสร้างท่อวอร์เท็กซ์ที่ทำจากวัสดุต่างกัน ภายใต้เงื่อนไขขนาดและลักษณะของท่อแบบเดียวกัน โดยเปรียบเทียบระหว่างท่อวอร์เท็กซ์ที่ทำจากสแตนเลส เนื่องจากเป็นวัสดุที่นำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมสำหรับการทำความเย็นในที่มีอุณหภูมิสูง กับท่อวอร์เท็กซ์ที่ทำจากทองเหลือง ซึ่งก็เป็นโลหะชนิดหนึ่งที่ถูกนำมาใช้หลายงานวิจัย เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงทนทาน อีกทั้งยังเป็นวัสดุที่มีค่าการนำความร้อนสูง สามารถดูค่าการนำความร้อนของวัสดุที่นำมาใช้งานได้จากตาราง 3 ซึ่งค่าการนำความร้อนของวัสดุที่นิยมนำมาใช้กับท่อวอร์เท็กซ์ บอกถึงความสามารถของวัสดุที่มีการให้ความร้อนผ่านได้ หากมีค่ามากแสดงว่ามีค่าการนำความร้อนที่ดี และหากมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำแสดงว่าความสามารถในการถ่ายเทความร้อนผ่านวัสดุจะมีค่าต่ำ วัสดุแต่ละชนิดมีค่าการนำความร้อนที่แตกต่างกัน โลหะจะมีค่าการนำความร้อนที่สูงกว่าวัสดุที่ทำจากพลาสติก

ตาราง 3 ค่าการนำความร้อนของวัสดุ

วัสดุ	ค่าการนำความร้อน (W/(m K)
ทองเหลือง (Brass)	150
สแตนเลส (Stainless steel)	15
พลาสติก (Polyvinyl chloride)	9

ที่มา: Holman, 2002

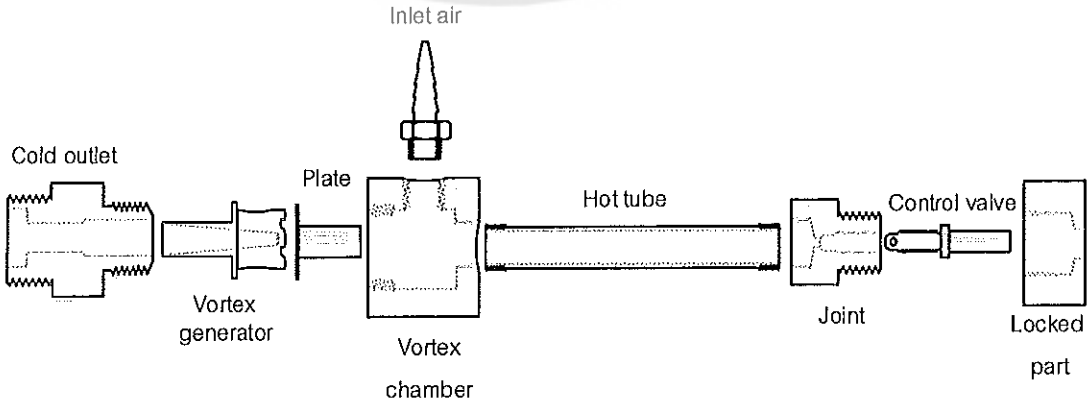
ในส่วนของการออกแบบชิ้นส่วนประกอบของท่อวอร์เท็กซ์ที่กล่าวมาข้างต้น สามารถสรุปผลการศึกษาจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อเป็นแนวทางในการอ้างอิงเกี่ยวกับการออกแบบ และยังได้สรุปส่วนที่สำคัญที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพของท่อวอร์เท็กซ์นี้ตามตาราง 4

ตาราง 4 ข้อมูลและขนาดตัวแปรที่ศึกษาในงานวิจัยนี้

รายละเอียด	ขนาด
วัสดุที่ทำท่อวอร์เท็กซ์	สแตนเลสและทองเหลือง
ความยาวท่อร้อน (L_h)	200 mm
เส้นผ่านศูนย์กลางท่อร้อน (D_h)	10 mm
จำนวนหัวฉีดที่ติดตั้ง (N)	6
สัดส่วนช่องอากาศเย็น (D_c/D_h)	0.5

โครงสร้างและส่วนประกอบของท่อวอร์เท็กซ์

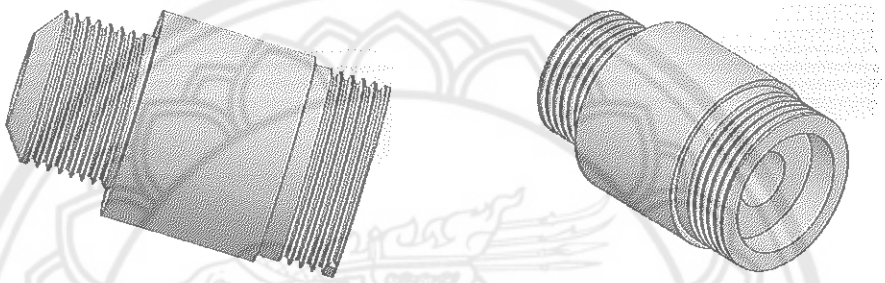
ในส่วนของการสร้างท่อวอร์เท็กซ์ ผู้วิจัยได้คำนึงถึงความสะดวก ไม่ซับซ้อน และพบง่ายในท้องตลาดกลุ่มท่อโลหะ ส่วนประกอบหลักของท่อวอร์เท็กซ์แบ่งออกเป็น 9 ส่วน ซึ่งส่วนประกอบแต่ละส่วนสามารถถอดแยกประกอบกันได้ โดยจะแสดงโครงสร้างและลักษณะชิ้นส่วนประกอบแต่ละส่วนดังภาพ 25 โดยที่ชิ้นส่วนประกอบทั้งหมดมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกวางในแนวนอนและจัดวางในตำแหน่งที่สามารถประกอบกันได้ โดยจะแสดงข้อมูล ลักษณะ รูปร่าง และภาพ 3 มิติของชิ้นส่วนท่อวอร์เท็กซ์ทั้ง 9 ส่วนในรายละเอียดด้านล่าง



ภาพ 25 โครงสร้างและส่วนประกอบของท่อวอร์เท็กซ์

1. **ปลายท่อเย็น** (Cold outlet)

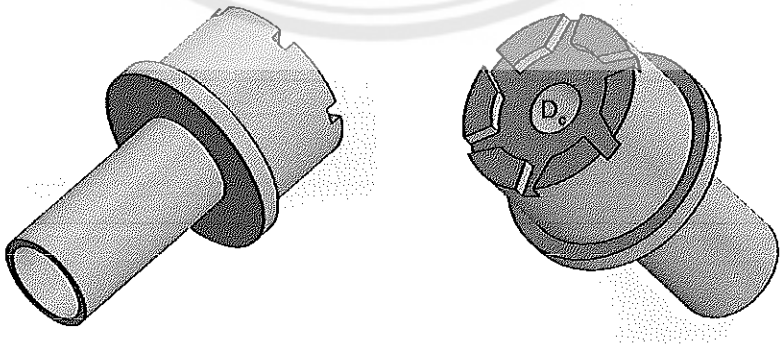
ปลายท่อเย็นจะมีปลายอยู่ 2 ด้าน ด้านหนึ่งจะเป็นเกลียวนอกใช้สำหรับยึดติดกับส่วนของห้องสร้างกระแสหมุนวน และปลายอีกด้านหนึ่งเป็นเกลียวนอกที่ใช้สำหรับเชื่อมต่อให้อากาศออกไปใช้งาน แนวแกนกลางของปลายท่อเย็นจะมีช่องสำหรับให้อากาศไหลผ่านได้ ดังนั้นปลายท่อเย็นจะทำหน้าที่เป็นทั้งตัวยึดและปล่อยให้กระแสอากาศเย็นไหลออกนอกท่อวอร์เท็กซ์ และนำไปใช้งานต่อไป แสดงลักษณะปลายท่อเย็นดังภาพ 26



ภาพ 26 ปลายท่อเย็น

2. **ต้นกำเนิดกระแสหมุนวน** (Vortex generator)

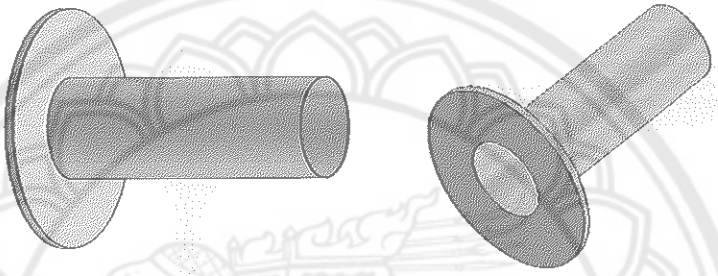
ต้นกำเนิดกระแสหมุนวนถูกติดตั้งไว้ภายในห้องสร้างกระแสหมุนวน ซึ่งมีหัวฉีดอยู่ที่ปลายด้านหนึ่ง 6 หัวฉีด แกนกลางมีช่องสำหรับปล่อยอากาศเย็นหรือที่เราเรียกว่าช่องอากาศเย็น โดยมีลักษณะเป็นช่องทรงกรวย ด้านหนึ่งเล็กและอีกด้านหนึ่งใหญ่ ลักษณะต้นกำเนิดกระแสหมุนวนที่ศึกษาแสดงดังภาพ 27



ภาพ 27 ต้นกำเนิดกระแสหมุนวน

3. **จานรอง** (Plate)

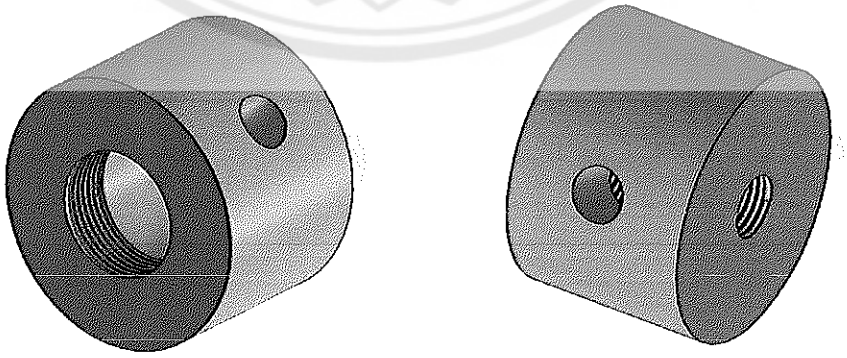
จานรองเป็นส่วนหนึ่งของท่อวอร์เท็กซ์ ถูกวางในแนวนอนภายในห้องสร้างกระแสหมุนวน ทำหน้าที่เป็นจุดเชื่อมต่อระหว่างห้องสร้างกระแสหมุนวนและท่อร้อน เพื่อให้รอยต่อมีพื้นผิวที่ราบเรียบ เนื่องจากระหว่างช่วงของเกลียวในของห้องสร้างกระแสหมุนวนและเกลียวนอกของท่อร้อนประสานกัน จะมีรอยต่อที่ไม่เรียบ ดังนั้นจึงต้องใช้จานรองมารองรับ แสดงลักษณะของจานรองดังภาพ 28



ภาพ 28 จานรอง

4. **ห้องสร้างกระแสหมุนวน** (Vortex chamber)

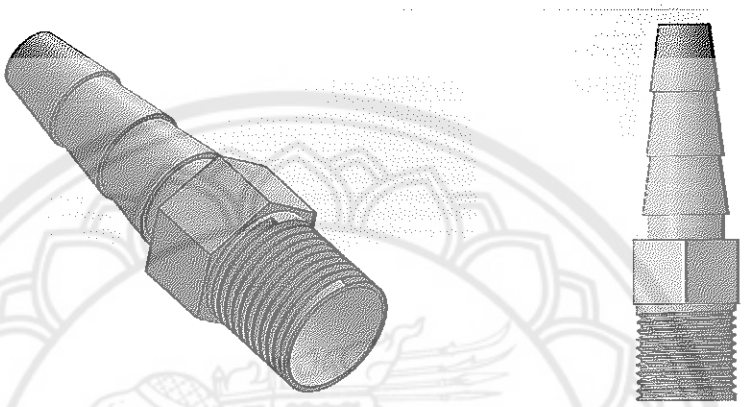
ห้องสร้างกระแสหมุนวนมีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกกลวง ด้านปลายทั้งสองมีลักษณะเป็นเกลียวในสำหรับต่อเข้ากับชิ้นส่วนอื่น ด้านที่มีช่องใหญ่สำหรับต่อกับส่วนปลายท่อเย็น และด้านช่องเล็กสำหรับต่อกับท่อร้อน และผิวด้านข้างมีช่องเกลียวในสำหรับต่อเข้ากับทางเข้าของอากาศ ภายในช่องกลวงมีพื้นผิวเรียบ แสดงลักษณะห้องสร้างกระแสหมุนวนดังภาพ 29



ภาพ 29 ห้องสร้างกระแสหมุนวน

5. **ทางเข้าของอากาศ** (Inlet air)

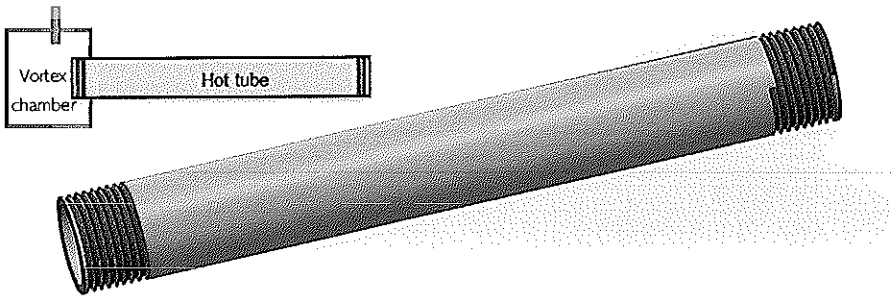
ทางเข้าของอากาศ มีลักษณะคล้ายกับข้อต่อหางปลา ปลายด้านหนึ่งมีไว้สำหรับเชื่อมต่อกับสายยาง และปลายอีกด้านหนึ่งเป็นเกลียวนอกใช้สำหรับต่อเข้ากับเกลียวในของห้องสร้างกระแสหมุนวน โดยจะแสดงลักษณะทางเข้าของอากาศตามภาพ 30



ภาพ 30 ทางเข้าของอากาศ

6. **ท่อร้อน** (Hot tube)

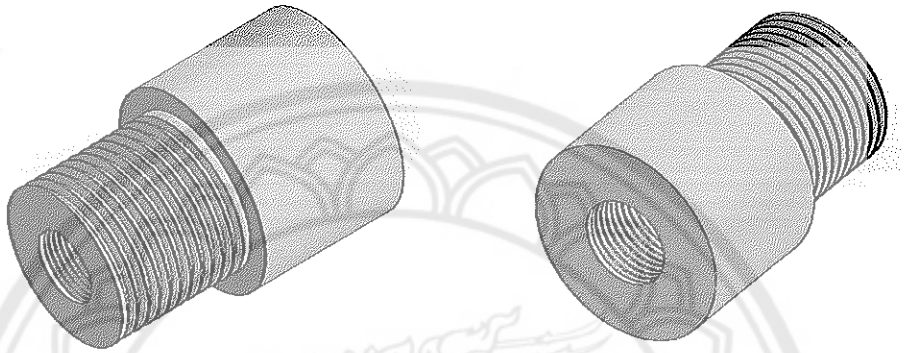
ท่อร้อนมีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกพื้นผิวภายในกลวง เรียบ ไม่ขรุขระ ปลายท่อทั้งสองด้านถูกทำให้เป็นเกลียวนอก ด้านหนึ่งสำหรับต่อกับห้องสร้างกระแสหมุนวนและอีกด้านหนึ่งต่อเข้ากับข้อต่อปรับขนาด แสดงลักษณะท่อร้อนตามภาพ 31 ในส่วนของท่อร้อนได้ใช้ท่อสำเร็จรูปที่มีขายตามท้องตลาด นำมาตัดและกลึงเกลียวตามขนาดที่ต้องการ เนื่องจากจะได้พื้นผิวภายในที่เรียบกว่าท่อที่ใช้วิธีการเจาะรู



ภาพ 31 ท่อร้อน

7. ข้อต่อปรับขนาด (Joint)

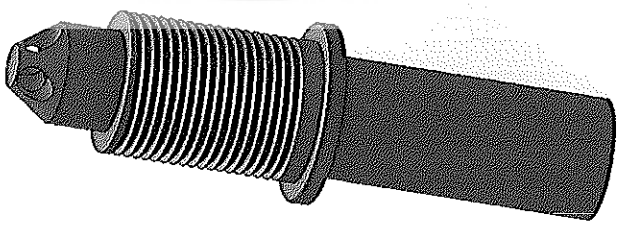
ข้อต่อปรับขนาดเป็นตัวกลาง สำหรับเชื่อมต่อระหว่างท่อร้อนและวาล์วควบคุม ชิ้นส่วนนี้เป็นตัวช่วยทำให้ท่อร้อนและวาล์วควบคุมประกอบกันได้สมบูรณ์ แสดงลักษณะดังภาพ 32



ภาพ 32 ข้อต่อปรับขนาด

8. วาล์วควบคุม (Control valve)

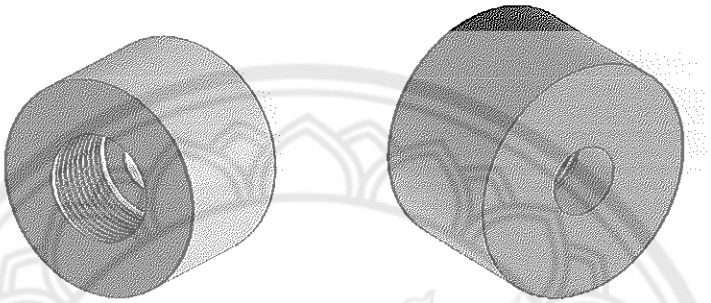
วาล์วควบคุมเป็นชิ้นส่วนสำหรับควบคุมปริมาณการไหลของอากาศที่ปล่อยออกจากท่อวอร์เท็กซ์ ปลายด้านซ้ายเป็นเกลียวสำหรับต่อเข้ากับข้อต่อปรับขนาด ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดเป็นวงกลม เป็นส่วนที่ทำให้กระแสอากาศที่แกนกลางท่อไหลย้อนกลับไปยังหัวฉีด และบริเวณที่ถัดจากพื้นที่หน้าตัด มีช่องวงกลมซึ่งเป็นช่องของอากาศร้อนไหลออกไปยังปลายด้านขวาได้ แสดงลักษณะวาล์วควบคุมในภาพ 33



ภาพ 33 วาล์วควบคุม

9. **ตัวล็อค** (Locked part)

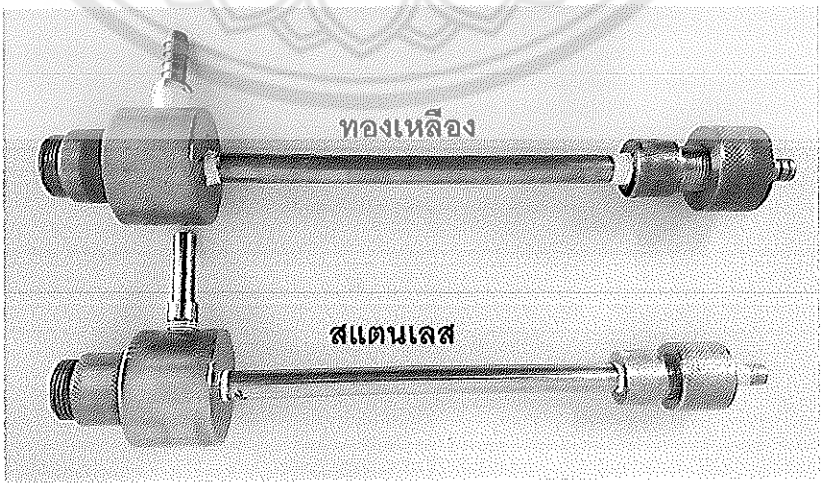
ตัวล็อคเป็นชิ้นส่วนสุดท้ายสำหรับป้องกันไม่ให้วาล์วควบคุมหลุดขณะทำการทดลอง เนื่องจากขณะทำการทดสอบมีปริมาณอากาศที่ไหลออกจากท่อร้อนค่อนข้างสูง ส่วนของตัวล็อคจะช่วยเพิ่มความแน่นหนาสำหรับยึดชิ้นส่วนประกอบให้ดียิ่งขึ้น เพื่อหลีกเลี่ยงความไม่ปลอดภัยที่อาจเกิดขึ้นได้ แสดงลักษณะของตัวล็อคในภาพ 34



ภาพ 34 ตัวล็อค

10.**ท่อวอร์เท็กซ์ที่สร้างจริง**

หลังจากได้ออกแบบและแสดงลักษณะของชิ้นส่วนทั้งหมดของท่อวอร์เท็กซ์ไปแล้วนั้น ได้นำวัสดุทั้งสองชนิดที่ทำการศึกษามาทำการ ตัด กลึง และเจาะตามรูปแบบที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งชิ้นส่วนทั้ง 9 ส่วนถูกนำมาประกอบกันจนเป็นท่อวอร์เท็กซ์ และได้แสดงท่อวอร์เท็กซ์จริงที่ถูกนำมาทดสอบ ดังภาพ 35 ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงลักษณะรูปร่างจริงของท่อวอร์เท็กซ์ที่ทำจากทองเหลืองและสแตนเลส



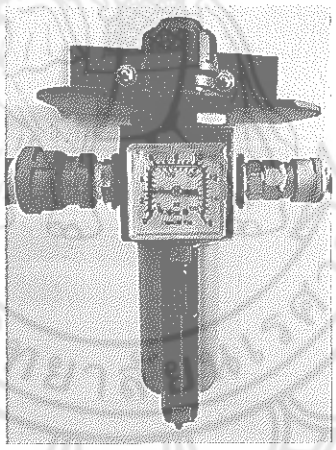
ภาพ 35 ท่อวอร์เท็กซ์จริงที่ใช้ทดสอบ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดสอบการทำงานของท่อวอร์เท็กซ์ อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับทดสอบจะเกี่ยวข้องกับเครื่องมือวัดอัตราการไหลของอากาศ อุปกรณ์ควบคุมความดันและเครื่องมือวัดอุณหภูมิ โดยจะแสดงรายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ที่ใช้ดังต่อไปนี้

1. **ชุดปรับความดันและกรองอากาศ** (Pressure regulating filter)

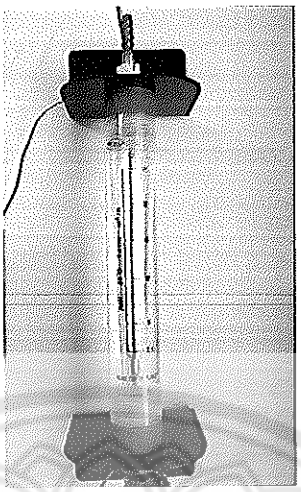
ชุดปรับความดันและกรองอากาศเป็นอุปกรณ์สำหรับกรองอากาศ ปรับปรุงคุณภาพของอากาศให้มีคุณภาพดีขึ้น สามารถกรองฝุ่นและกรองไอน้ำที่มาจากปั๊มลม ในชุดเครื่องมือมีการติดตั้งเกจวัดความดันใช้สำหรับวัดความดันอากาศและควบคุมการไหลของอากาศเพื่อปรับให้แรงดันอากาศก่อนที่จะเข้าไปในท่อวอร์เท็กซ์ให้มีค่าคงที่ตามที่ต้องการ แสดงลักษณะเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยนี้ตามภาพ 36 ซึ่งเป็นเครื่องมือจากบริษัท ANI รุ่น E24-P ผลิตจากประเทศอิตาลี ทำงานได้ตั้งแต่ความดัน 0 ถึง 14 bar และสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิตั้งแต่ -25 ถึง 65 °C



ภาพ 36 ชุดปรับอากาศและกรองอากาศ

2. **โรตามิเตอร์** (Rotameter)

โรตามิเตอร์เป็นเครื่องมือวัดการไหลของของไหล ซึ่งสามารถวัดได้ทั้งของเหลวและแก๊ส มีลักษณะเป็นท่อแก้วใสรูปทรงกรวย วางตัวในแนวตั้ง ภายในจะมีลูกลอย สามารถเคลื่อนที่ขึ้นและลงได้อย่างอิสระตามอัตราการไหลของอากาศที่ไหลผ่าน แสดงลักษณะของโรตามิเตอร์ดังภาพ 37 ซึ่งเป็นโรตามิเตอร์จาก WELL flow instrument รุ่น LZG 15 วัดอัตราการไหลได้ตั้งแต่ 2.5 ถึง 25 m^3/h สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิสูงสุดถึง 65 °C และมีค่าความคลาดเคลื่อน ±4%

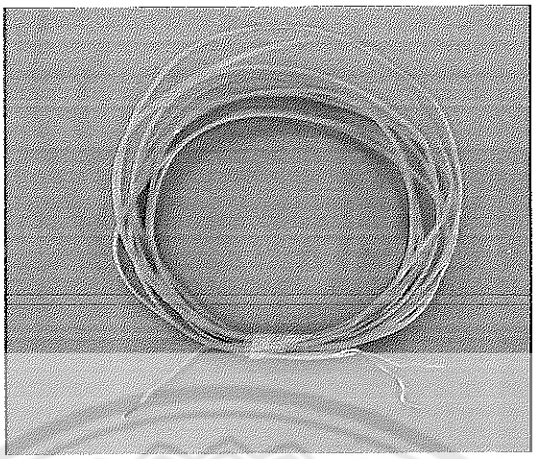


ภาพ 37 โรตามิเตอร์

3. **เครื่องบันทึกข้อมูลอุณหภูมิ** (Data logger)

เครื่องบันทึกข้อมูลคืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ใช้สำหรับบันทึกอุณหภูมิ สามารถบันทึกอุณหภูมิได้สูงสุดถึง 20 ตำแหน่ง โดยจะต่อเข้ากับสายเทอร์โมคัปเปิลซึ่งเป็นหัววัดอุณหภูมิ เมื่อวัดอุณหภูมิเสร็จ ข้อมูลจะถูกส่งไปเก็บที่เครื่องบันทึกข้อมูล โดยที่ข้อมูลจะถูกแสดงผลบนหน้าจอทันที และสามารถบันทึกข้อมูลไว้ใน SD card ได้ด้วยเช่นกัน แสดงเครื่องบันทึกข้อมูลตามภาพ 38 ซึ่งเป็นเครื่องมือจากบริษัท YOKOGAWA รุ่น DX220-3-2 และลักษณะของเทอร์โมคัปเปิลชนิดเคแสดงตามภาพ 39

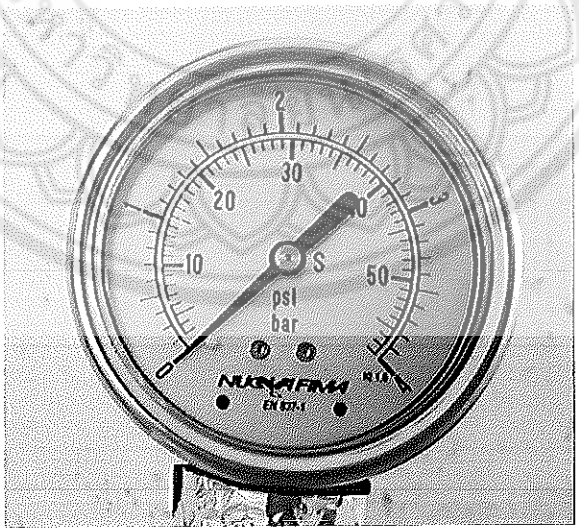
ภาพ 38 เครื่องบันทึกข้อมูล



ภาพ 39 เทอร์โมคัปเปิล ชนิดเค

4. **เกจวัดความดัน** (Pressure gauge)

เกจวัดความดันคืออุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดความดันที่เกิดขึ้นของระบบ โดยให้ความดันบรรยากาศเป็นความดันในการอ้างอิง ค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือจึงไม่ได้รวมกับค่าความดันบรรยากาศด้วย ซึ่งเกจวัดความดันมีค่าเป็น 0 ในสภาวะปกติหรือที่ความดันบรรยากาศ เกจวัดความดันที่นำมาใช้งานแสดงดังภาพ 40



ภาพ 40 เกจวัดความดัน

5. **ปั๊มลม** (Air compressor)

ปั๊มลมทำหน้าที่ในการอัดลมให้มีแรงดันสูงตามความต้องการของผู้ใช้งาน และจัดเก็บลมที่อัดไว้ในถังเก็บลมเพื่อรอการใช้งาน ปั๊มลมที่ใช้ในการทดลองจะเป็นประเภทลูกสูบ ซึ่งเป็นปั๊มลมที่ได้รับความนิยมใช้งานมากที่สุดตามการใช้งาน ปั๊มลมที่นำมาใช้งานมีมอเตอร์แบบ 3 เฟส และมีขนาด 5 แรงม้า หรือ 3.7 กิโลวัตต์ จากบริษัท TATUNG CO. รุ่น FBFC ประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่ใช้งาน 85.7% โดยมีความเร็วรอบของมอเตอร์เท่ากับ 1420 รอบต่อนาทีแสดงเครื่องปั๊มลมที่นำมาใช้งานตามภาพ 41

ภาพ 41 ปั๊มลม

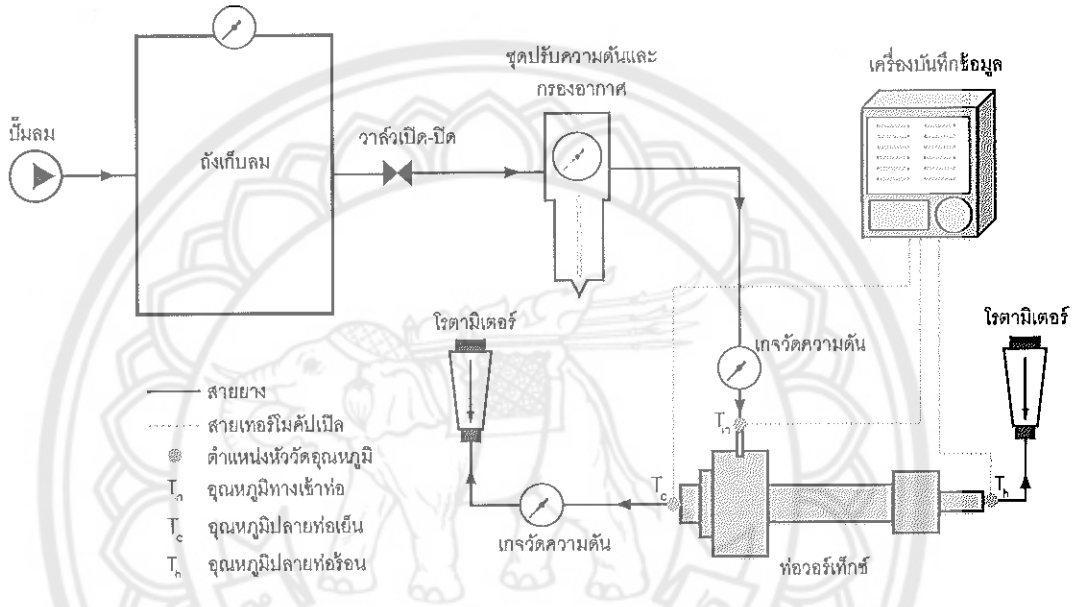
6. **สายยาง** (Rubber tube)

สายยางเป็นอุปกรณ์สำหรับส่งผ่านของไหลจากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่ง เพื่อช่วยในการถ่ายโอนมวลอากาศร้อนและอากาศเย็นไปยังตำแหน่งที่ต้องการ สายยางที่นำมาทดสอบต้องมีคุณสมบัติกันความร้อนสูงและสามารถทนความเย็นได้ด้วย

วิธีการทดลอง

1. การติดตั้งเครื่องมือ

ในการออกแบบระบบการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับศึกษาการพัฒนาประสิทธิภาพการทำงานของท่อวอร์เท็กซ์ ทำการทดลองโดยใช้อากาศซึ่งเป็นสารทำความเย็นจากธรรมชาติสำหรับทำงาน โดยมีแผนผังการติดตั้งเครื่องมือทดสอบตามภาพ 42



ภาพ 42 แผนผังระบบทดสอบการทำงานของท่อวอร์เท็กซ์

ตามภาพ 42 แสดงขั้นตอนการทำงานของระบบทดสอบท่อวอร์เท็กซ์ การทำงานเริ่มจากปั๊มลมทำหน้าที่ผลิตอากาศอัดและจัดเก็บไว้ในถังเก็บลม เมื่อต้องการทดลองจะเปิดวาล์วเพื่อให้อากาศถูกลำเลียงด้วยท่อส่งเข้าที่ชุดปรับอากาศและกรองอากาศ ซึ่งทำหน้าที่กรองอากาศและปรับความดันอากาศก่อนที่จะเข้าท่อวอร์เท็กซ์ เมื่อท่อวอร์เท็กซ์ได้รับอากาศที่มีแรงดันสูง ท่อวอร์เท็กซ์จะทำงานเกิดการแยกชั้นของอุณหภูมิอากาศร้อนและอากาศเย็นออกจากกัน อากาศร้อนจะปล่อยออกปลายท่อด้านยาวและอากาศเย็นจะปล่อยออกปลายท่อด้านสั้น ปลายท่อทั้งสองด้านถูกติดตั้งเข้ากับโรตามิเตอร์ซึ่งมีหน้าที่วัดอัตราการไหลของอากาศที่ปล่อยออกมา อุณหภูมิของอากาศที่ป้อนเข้าไปในท่อและอุณหภูมิอากาศที่ปล่อยออกจากท่อวอร์เท็กซ์ ถูกวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิลซึ่งต่อเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูล สามารถปรับอัตราการไหลของกระแสอากาศร้อนและอากาศเย็นได้จากวาล์วควบคุมบริเวณปลายท่อด้านร้อน

2. ขั้นตอนการทดสอบ

2.1 ติดตั้งเครื่องมือตาม ภาพ 42

2.2 นำฉนวนกันความร้อนหุ้มที่ผิวท่อร้อนของท่อวอร์เท็กซ์ที่ทำจากสแตนเลสเพื่อป้องกันการถ่ายเทความร้อนจากอากาศในห้องไปยังผิวท่อร้อน

2.3 ปิดวาล์วควบคุมอากาศที่ปลายท่อด้านร้อนให้สนิท

2.4 เปิดปั๊มลมและควบคุมความดันอากาศขาเข้าท่อวอร์เท็กซ์ให้มีค่าคงที่ ที่ 1.5 bar โดยใช้เกจวัดความดันจากชุดปรับความดันและกรองอากาศสำหรับเป็นอุปกรณ์ควบคุมให้อากาศไหลผ่าน

2.5 บันทึกผลอัตราการไหลของอากาศปลายท่อร้อนและปลายท่อเย็น

2.6 บันทึกผลความดันอากาศด้วยเกจวัดความดันที่ทางเข้าท่อและปลายท่อเย็น

2.7 บันทึกผลอุณหภูมิอากาศด้วยเครื่องบันทึกข้อมูลทุก 1 นาที เป็นเวลา 10 นาที

2.8 เมื่อครบ 10 นาที ให้หยุดการทำงานและรอจนกว่าอุณหภูมิของท่อวอร์เท็กซ์เข้าสู่สภาวะปกติ

2.9 ทำการทดลองซ้ำในข้อที่ 2.3-2.8 โดยการปรับหมุนวาล์วควบคุมเพื่อปรับอัตราการไหลของอากาศที่ปล่อยออกปลายท่อให้ได้ค่าสัดส่วนมวลอากาศเย็นที่แตกต่างกัน

2.10 ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 2.3-2.9 โดยปรับความดันอากาศขาเข้าท่อวอร์เท็กซ์ให้มีค่าคงที่เท่ากับ 3 bar

2.11 นำท่อวอร์เท็กซ์ที่ทำจากทองเหลืองมาติดตั้งในระบบทดสอบ และดำเนินขั้นตอนซ้ำในข้อ 2.2-2.10

2.12 นำข้อมูลมาวิเคราะห์ผลความแตกต่างอุณหภูมิอากาศร้อนและความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็น เปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างท่อวอร์เท็กซ์ที่ทำจากสแตนเลสและทองเหลืองให้เป็นไปตามสมมติฐาน

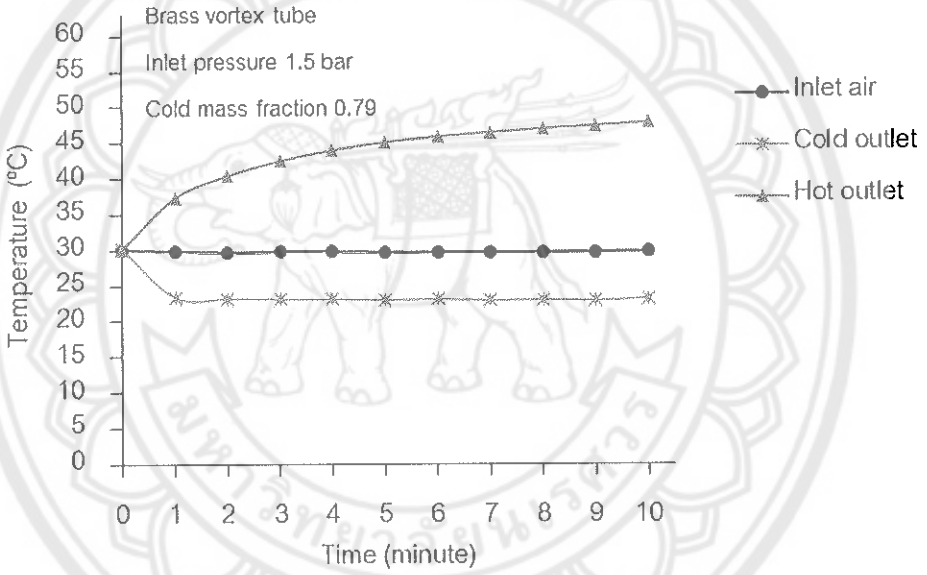
2.13 พิจารณาปัจจัยที่มีผลทำให้ผลการทดลองไม่เป็นไปตามสมมติฐาน โดยทำการทดลองเบื้องต้นเกี่ยวกับชนิดวัสดุของต้นกำเนิดกระแสหมุนวนระหว่างพลาสติกและทองเหลือง โดยนำต้นกำเนิดกระแสหมุนวนติดตั้งภายในท่อวอร์เท็กซ์ และทำการทดสอบซ้ำในข้อ 2.3 - 2.9

2.14 นำต้นกำเนิดกระแสหมุนวนพลาสติกติดตั้งในท่อวอร์เท็กซ์และทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 2.2 - 2.12 หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ผลประสิทธิภาพการทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์เปรียบเทียบระหว่างท่อวอร์เท็กซ์สแตนเลสและท่อวอร์เท็กซ์ทองเหลือง

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

ในบทนี้จะนำเสนอผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล การศึกษาประสิทธิภาพการทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ที่ทำจากวัสดุต่างกันสองชนิด ระหว่างท่อวอร์เท็กซ์ที่ทำจากสแตนเลสและท่อวอร์เท็กซ์ที่ทำจากทองเหลือง พิจารณาศึกษาที่ความดันอากาศเข้าไปในท่อ 1.5 bar และ 3 bar และมีการปรับค่าสัดส่วนมวลอากาศเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ แสดงผลตามรายละเอียดด้านล่าง



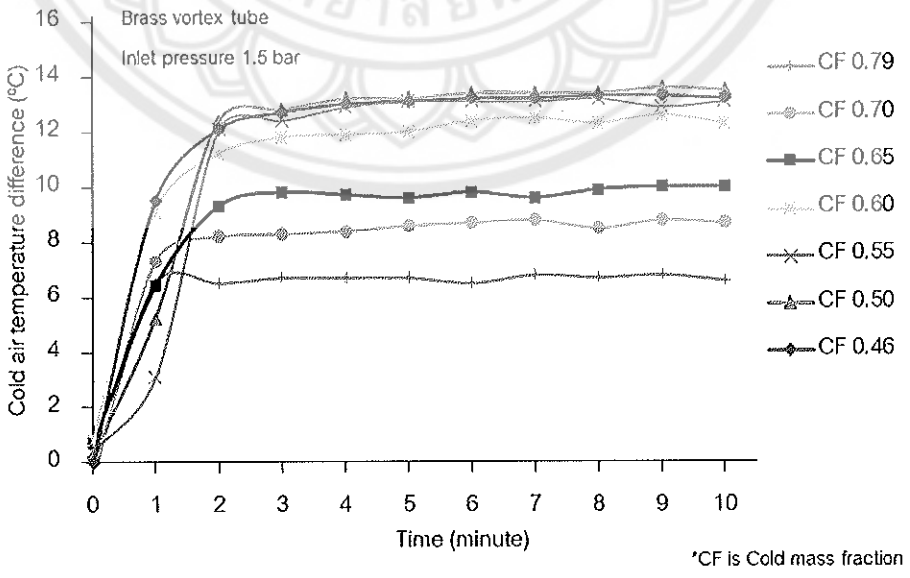
ภาพ 43 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศทางเข้าและทางออกท่อวอร์เท็กซ์กับเวลา

คุณลักษณะทางอุณหภูมิของท่อวอร์เท็กซ์

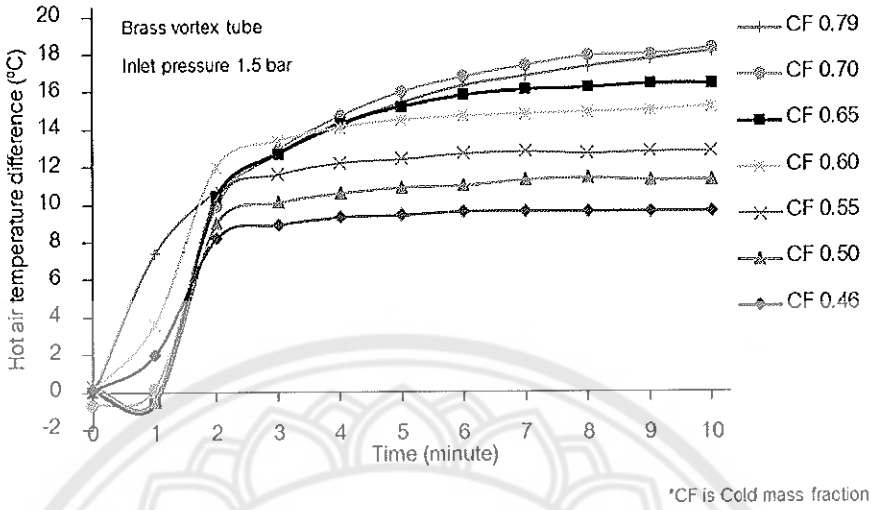
ลักษณะอุณหภูมิอากาศที่ทางเข้าและปลายท่อออกด้านร้อนและด้านเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ จากผลการทดลองเบื้องต้น แสดงดังภาพ 43 แสดงถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศเทียบกับเวลา ซึ่งเป็นผลการทดลองตัวอย่างของท่อวอร์เท็กซ์ที่มีชิ้นส่วนประกอบทำจากทองเหลือง ทดสอบที่ความดันอากาศขาเข้า 1.5 bar และสัดส่วนมวลอากาศเย็น 0.79 ซึ่งคำนวณจากอัตราการไหลของมวลอากาศเย็นต่ออัตราการไหลมวลอากาศที่เข้าไปในท่อวอร์เท็กซ์ จากภาพ 43 ณ เวลา 10 นาที อากาศทางเข้าท่อวอร์เท็กซ์มีอุณหภูมิเฉลี่ยคงที่ 30°C อุณหภูมิอากาศปลายท่อด้านร้อนมีแนวโน้มสูงขึ้น ในเวลาเดียวกันอุณหภูมิอากาศปลายท่อเย็นมีแนวโน้มลดลง เห็นได้

ชัดว่าท่อวอร์เท็กซ์สามารถลดและเพิ่มอุณหภูมิที่ปลายท่อได้อย่างรวดเร็วในช่วงเวลาเริ่มต้น และหลังจากนั้นอุณหภูมิอากาศเริ่มคงที่ ณ เวลา 10 นาที อุณหภูมิที่ปลายท่อด้านเย็นลดลงเหลือ 23.2°C ขณะที่อุณหภูมิปลายท่อด้านร้อนเพิ่มสูงขึ้นเป็น 47.9°C จากภาพแสดงให้เห็นว่าท่อวอร์เท็กซ์ที่สร้างขึ้นสามารถผลิตอากาศเย็นและอากาศร้อนได้จริง

ต่อมานำข้อมูลมาวิเคราะห์หาค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศทางเข้าและอุณหภูมิปลายท่อทางออก โดยที่ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศขาเข้าและอุณหภูมิปลายท่อเย็น คือความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็น ขณะที่ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศปลายท่อร้อนและอุณหภูมิอากาศขาเข้า เรียกว่าความแตกต่างอุณหภูมิอากาศร้อน ในภาพ 44 และ 45 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของค่าความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็นและค่าความแตกต่างอุณหภูมิอากาศร้อนเทียบกับเวลา ตามลำดับ โดยมีเงื่อนไขการทดลองของท่อวอร์เท็กซ์ทำจากทองเหลืองทั้งชุด ทดสอบที่ความดันอากาศ 1.5 bar เช่นเดียวกับภาพ 43 และมีการเปลี่ยนแปลงค่าสัดส่วนมวลอากาศเย็นในช่วงตั้งแต่ 0.46 ถึง 0.79 โดยค่าสัดส่วนมวลอากาศเย็นจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการปล่อยปริมาณอากาศเย็นต่อปริมาณอากาศที่เข้าไปในท่อ ถ้าสัดส่วนมวลอากาศเย็นเป็น 1 แสดงว่ามีการปิดปลายท่อร้อนสนิท อากาศที่เข้าไปในท่อทั้งหมดจะปล่อยออกที่ปลายท่อเย็น ตามทฤษฎีอธิบายปรากฏการณ์ภายในท่อวอร์เท็กซ์ การไหลวนชั้นที่สอง(secondary circulation) เมื่อสัดส่วนมวลอากาศเย็นเป็น 1 จะไม่ทำให้เกิดการแยกชั้นของพลังงานขึ้น อุณหภูมิอากาศปลายท่อเย็นจึงมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิอากาศทางเข้าท่อ (Gao, 2005)

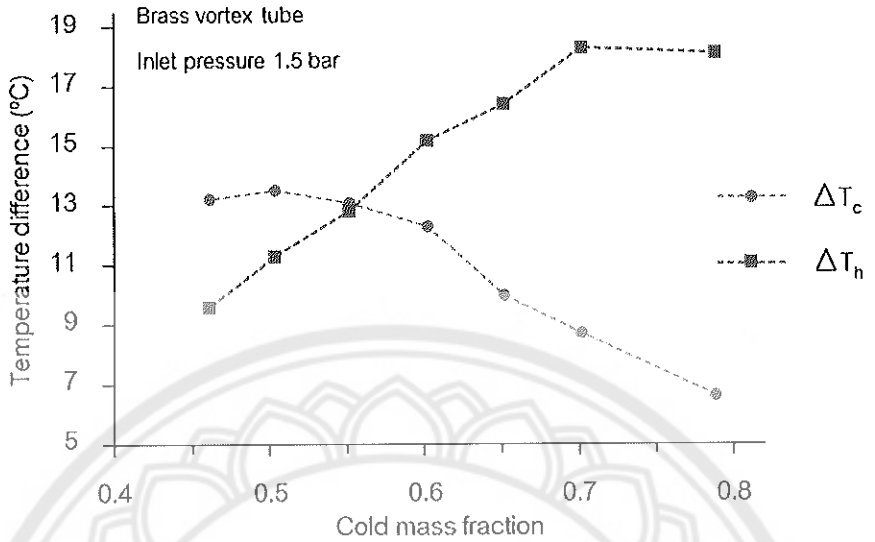


ภาพ 44 การเปลี่ยนแปลงค่าความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็นเทียบกับเวลา



ภาพ 45 การเปลี่ยนแปลงค่าความแตกต่างอุณหภูมิอากาศร้อนเทียบกับเวลา

จากภาพ 44 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงค่าความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็นเทียบกับเวลา พบว่าค่าความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาเริ่มต้น และมีแนวโน้มที่จะคงที่ในเวลาถัดมา แสดงให้เห็นว่าเวลามีผลต่อการแยกชั้นอุณหภูมิอากาศเฉพาะช่วงเวลาเริ่มต้น นอกจากนั้นจากภาพยังมีการแปรค่าสัดส่วนมวลอากาศเย็น พบว่าค่าสัดส่วนมวลอากาศเย็นมีผลต่อค่าความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็น โดยนาทีที่ 10 ค่าสัดส่วนมวลอากาศเย็น 0.50 สามารถให้ค่าความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็นหรือเรียกได้ว่าท่อวอร์เท็กซ์สามารถลดอุณหภูมิอากาศปลายท่อเย็นได้สูงสุด 13.5°C และจากภาพ 45 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของค่าความแตกต่างอุณหภูมิอากาศร้อนเทียบกับเวลา พบว่าในช่วง 1 นาทีเริ่มต้นค่าสัดส่วนมวลอากาศเย็นบางค่ามีการแกว่งของข้อมูลทำให้ข้อมูลติดลบ แต่ถึงอย่างไรก็ตามค่าความแตกต่างอุณหภูมิอากาศร้อนมีค่าสูงขึ้นในเวลาต่อมา นั่นหมายความว่าที่ปลายท่อวอร์เท็กซ์ด้านร้อนมีอุณหภูมิที่ปล่อยออกจากปลายท่อสูงขึ้นเมื่อเทียบกับอุณหภูมิอากาศที่ป้อนเข้าไปในท่อ และหลังจากนั้นเวลาผ่านไป 10 นาที สัดส่วนมวลอากาศเย็น 0.46 0.50 0.55 0.60 และ 0.65 มีผลค่าความแตกต่างอุณหภูมิอากาศร้อนคงที่ สังเกตจากค่าความแตกต่างอุณหภูมิอากาศร้อนที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ขณะที่สัดส่วนมวลอากาศเย็น 0.70 และ 0.79 ให้ค่าความแตกต่างอุณหภูมิอากาศร้อนที่เพิ่มขึ้น แต่มีการเพิ่มขึ้นน้อยมากสามารถคำนวณเป็นร้อยละที่เพิ่มขึ้นเพียง 1.7% และ 2.3% ตามลำดับ จึงถือได้ว่าที่สัดส่วนมวลอากาศเย็น 0.70 ท่อวอร์เท็กซ์สามารถเพิ่มอุณหภูมิอากาศปลายท่อร้อนได้สูงสุดถึง 18.3°C

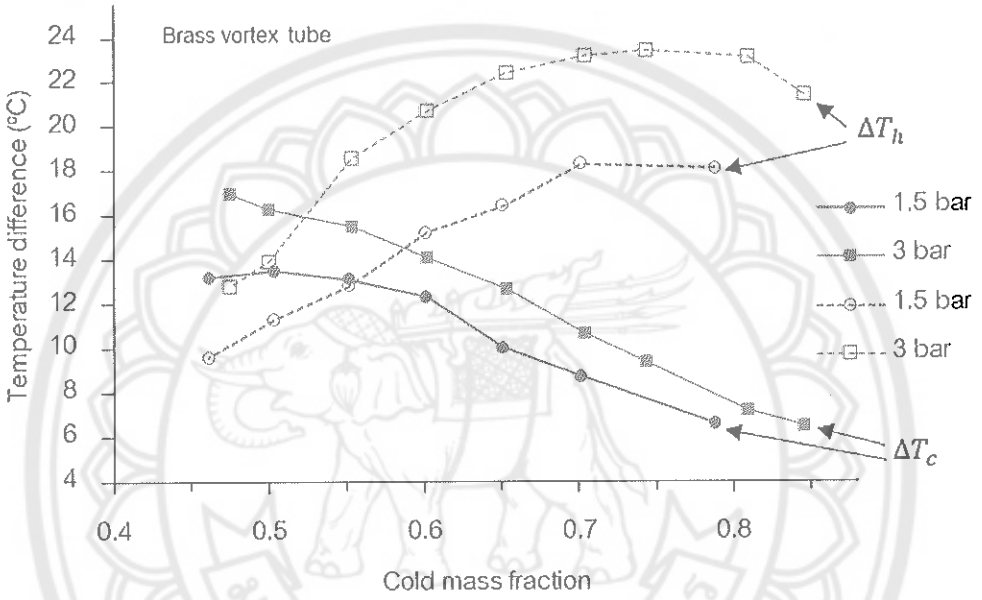


ภาพ 46 ค่าความแตกต่างอุณหภูมิอากาศตามสัดส่วนมวลอากาศเย็น

จากภาพ 44 และภาพ 45 สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างอุณหภูมิอากาศร้อนและอากาศเย็นแปรผันกับค่าสัดส่วนมวลอากาศเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ได้ในภาพ 46 ซึ่งค่าสัดส่วนมวลอากาศเย็นขึ้นอยู่กับปริมาณอากาศเย็นที่ปล่อยออกจากท่อต่อปริมาณอากาศทั้งหมดที่เข้าไปในท่อ จากภาพ 46 ท่อวอร์เท็กซ์มีค่าสัดส่วนมวลอากาศเย็นตั้งแต่ 0.46-0.79 ซึ่งให้ค่าความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็น(ΔT_c)สูงสุดที่สัดส่วนมวลอากาศเย็น 0.50 และหลังจากนั้นค่าความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็นมีค่าลดลงเมื่อสัดส่วนมวลอากาศเย็นเพิ่มขึ้น ในเวลาเดียวกันค่าความแตกต่างอุณหภูมิอากาศร้อน (ΔT_h) สูงขึ้น เมื่อสัดส่วนมวลอากาศเย็นเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดที่ 0.70 จากภาพแสดงให้เห็นว่าหากต้องการลดอุณหภูมิปลายท่อเย็นให้ต่ำที่สุด ต้องปรับค่าสัดส่วนมวลอากาศเย็นเท่ากับ 0.50 และหากต้องการเพิ่มอุณหภูมิอากาศปลายท่อร้อนให้สูงสุดจะต้องเพิ่มสัดส่วนมวลอากาศเย็นให้เท่ากับ 0.70 จากงานวิจัยของ Stephan et al. (1983) กล่าวถึงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในท่อวอร์เท็กซ์เมื่อมีของไหลไหลไปตามช่องว่างพื้นผิวของผนังท่อ จะมีแรงขับเคลื่อน Görtler vortex ทำให้เกิดการแยกชั้นพลังงานหรือการแยกชั้นอุณหภูมิภายในท่อวอร์เท็กซ์ขึ้น เมื่อ Görtler vortex ที่เกิดขึ้นบนผนังท่อมีค่าลดลง จะทำให้ค่าความแตกต่างอุณหภูมิอากาศร้อนลดลง เนื่องจากการสูญเสียความร้อนจากผนังท่อ ซึ่งมีผลต่อแรงขับเคลื่อนของ Görtler vortex ทำให้เกิดการแยกชั้นพลังงานลดลง และส่งผลให้ค่าความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็นมีค่าสูงขึ้น

1. **ผลของความดันอากาศทางเข้าท่อ**

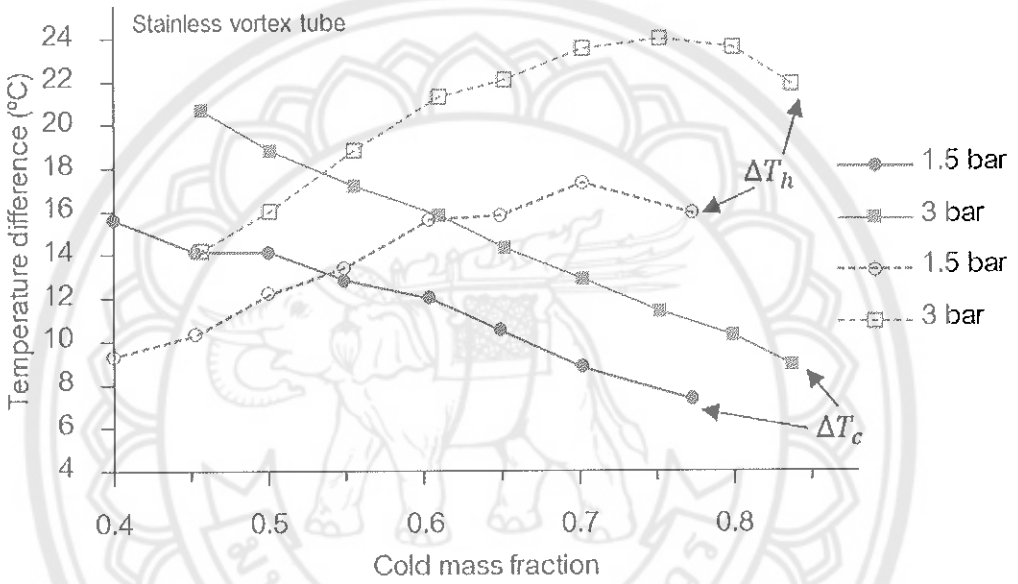
ต่อมาผู้วิจัยได้พิจารณาผลของความดันอากาศขาเข้าหรือความดันอากาศที่ป้อนเข้าไปในท่อวอร์เท็กซ์ระหว่าง 1.5 bar และ 3 bar ทำการทดลองโดยการแปรค่าตามสัดส่วนมวลอากาศเย็น ซึ่งจะแสดงผลการแยกชั้นอุณหภูมิอากาศเย็นและอากาศร้อนของท่อวอร์เท็กซ์ที่ทำจากทองเหลืองทั้งชุดในภาพ 47 และท่อที่ทำจากสแตนเลสทั้งชุดแสดงในภาพ 48



ภาพ 47 **ความดันอากาศขาเข้าต่อการแยกชั้นอุณหภูมิอากาศของท่อวอร์เท็กซ์ท**องเหลือง

จากภาพ 47 แสดงผลความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็นและอากาศร้อนของท่อวอร์เท็กซ์ที่มีส่วนประกอบทั้งหมดทำจากทองเหลือง พบว่าที่ความดันอากาศ 3 bar มีความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็นสูงสุด 17°C ขณะที่ความดันอากาศ 1.5 bar มีค่าสูงสุดเพียง 13.5°C ในทำนองเดียวกันที่ความดันอากาศ 3 bar มีความแตกต่างอุณหภูมิอากาศร้อนสูงกว่าที่ความดันอากาศ 1.5 bar จากภาพ 48 เป็นผลการทดสอบของท่อวอร์เท็กซ์ที่ทำจากสแตนเลสทั้งชุด พบว่าที่ความดันอากาศ 3 bar มีความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็นสูงสุด 20.7°C ขณะที่ความดันอากาศ 1.5 bar มีความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็นสูงสุด 15.6°C เช่นเดียวกับที่ความดันอากาศ 3 bar ให้ค่าความแตกต่างอุณหภูมิอากาศร้อนสูงกว่าที่ความดันอากาศ 1.5 bar จากภาพ 47 และ 48 แสดงให้เห็นว่าความดันอากาศมีผลต่อการแยกชั้นอุณหภูมิอากาศของท่อวอร์เท็กซ์ เมื่อเพิ่มความดันอากาศขาเข้าท่อมากขึ้น จะทำให้เกิดการแยกชั้นของอุณหภูมิเพิ่มขึ้นด้วย สามารถพิจารณาได้จาก

ค่าความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็นและค่าความแตกต่างอุณหภูมิอากาศร้อนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากความดันอากาศที่เพิ่มขึ้น ทำให้ความเร็วของการหมุนของของไหลผ่านหัวฉีดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการแยกชั้นของอุณหภูมิอากาศภายในท่อวอร์เท็กซ์เพิ่มขึ้นด้วย (Eiamsa-ard, & Promvonge, 2008)นอกจากนั้นของไหลที่ใส่เข้าไปในท่อวอร์เท็กซ์ในแนวสัมผัสกับหัวฉีด จะทำให้มีความเร็วสูงขึ้น มีผลทำให้เกิดการถ่ายเทโมเมนตัมหรือการเคลื่อนที่ของของไหลสูงขึ้น ซึ่งเกิดขึ้นจากบริเวณแกนกลางท่อไปยังบริเวณที่ใกล้กับผนังท่อที่มีความดันสูง (Attalla et al., 2017)



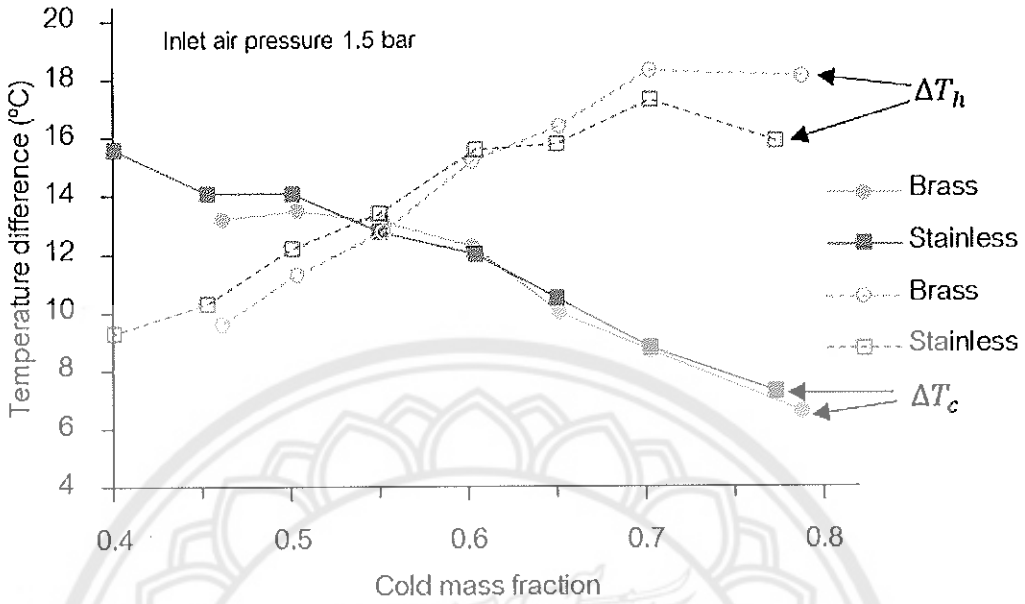
ภาพ 48 ความดันอากาศขาเข้าต่อการแยกชั้นอุณหภูมิอากาศของท่อวอร์เท็กซ์สแตนเลส

ประสิทธิภาพของท่อวอร์เท็กซ์

ในส่วนของการศึกษาประสิทธิภาพของท่อวอร์เท็กซ์ จะพิจารณาผลของความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็นเป็นส่วนสำคัญ หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพไอเซนโทรปิก ค่าความสามารถการทำความเย็น และค่าสมรรถนะการทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ โดยทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของท่อวอร์เท็กซ์ออกเป็น 2 ส่วน ตามรายละเอียดด้านล่าง

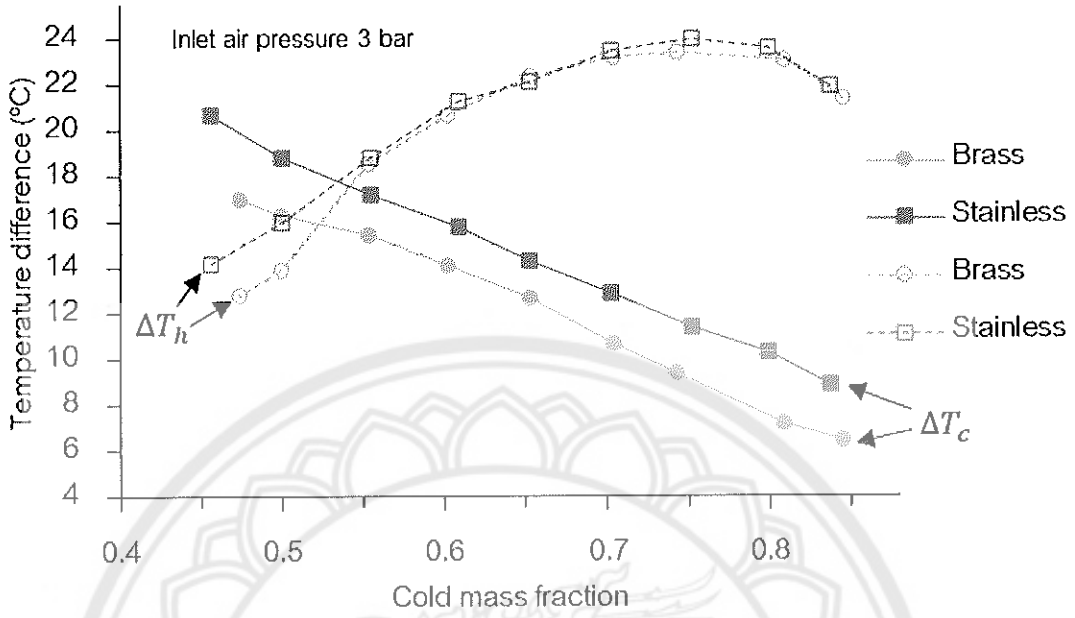
1. **ท่อทองเหลืองทั้งชุดและท่อสแตนเลสทั้งชุด**

ผลการทดสอบประสิทธิภาพของท่อวอร์เท็กซ์ที่ทำจากวัสดุสองชนิด ระหว่างท่อวอร์เท็กซ์ที่ทำจากทองเหลืองและสแตนเลส ซึ่งมีขนาด ลักษณะรูปร่าง และส่วนประกอบเดียวกันทั้งชุด โดยได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของท่อวอร์เท็กซ์ทั้งสองวัสดุ แสดงผลตามภาพ 49 และภาพ 50



ภาพ 49 ความแตกต่างอุณหภูมิอากาศของท่อวอร์เท็กซ์ทองเหลืองและสแตนเลสทั้งชุด ที่ความดันอากาศ 1.5 bar

จากภาพ 49 แสดงผลความแตกต่างอุณหภูมิอากาศของท่อวอร์เท็กซ์ ที่ความดันอากาศ 1.5 bar เห็นการเปรียบเทียบระหว่างท่อวอร์เท็กซ์ที่ทำจากทองเหลืองทั้งชุดและทำจากสแตนเลสทั้งชุด พบว่าท่อวอร์เท็กซ์ทั้งสองชนิดมีแนวโน้มของความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็นและอากาศร้อนไปในทิศทางเดียวกันและมีผลการทดลองใกล้เคียงกัน ที่สัดส่วนมวลอากาศเย็นใกล้ 0.45 ท่อวอร์เท็กซ์สแตนเลสมีค่าความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็นสูงสุด 14.1°C สูงกว่าท่อวอร์เท็กซ์ทองเหลือง 6.4% และจากภาพ 50 แสดงผลความแตกต่างอุณหภูมิอากาศของท่อวอร์เท็กซ์ ที่ความดันอากาศ 3 bar แสดงผลความแตกต่างระหว่างท่อวอร์เท็กซ์สองชนิดวัสดุมากขึ้น พบว่าที่สัดส่วนมวลอากาศเย็นใกล้ 0.45 ท่อวอร์เท็กซ์สแตนเลสมีค่าความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็นสูงสุด 20.7°C ขณะที่สัดส่วนมวลอากาศเย็น 0.47 ท่อวอร์เท็กซ์ทองเหลืองมีค่าความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็นสูงสุด 17.0°C ซึ่งท่อสแตนเลสมีค่าสูงกว่าท่อวอร์เท็กซ์ทองเหลือง 17.9% และยังพบว่าค่าความแตกต่างอุณหภูมิอากาศร้อนของท่อวอร์เท็กซ์สองชนิดวัสดุมีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่ท่อสแตนเลสมีค่าความแตกต่างอุณหภูมิอากาศร้อนสูงสุด 24°C ซึ่งสูงกว่าท่อทองเหลืองเพียง 2.5% ที่สัดส่วนมวลอากาศเย็น 0.75



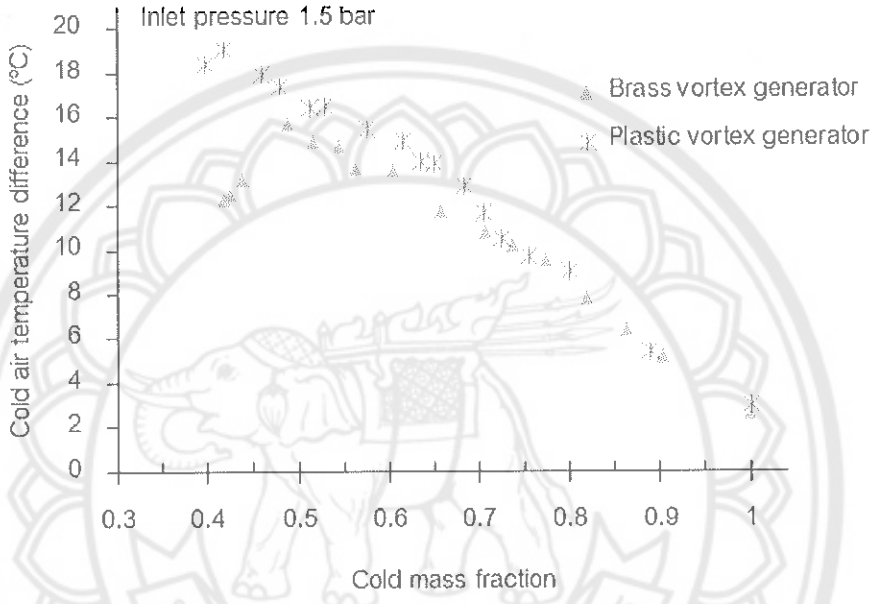
ภาพ 50 ความแตกต่างอุณหภูมิอากาศของท่อวอร์เท็กซ์ทองเหลืองและสแตนเลสทั้งชุดที่ความดันอากาศ 3 bar

ผลการทดลองของท่อวอร์เท็กซ์ที่ทำจากทองเหลืองและสแตนเลส แสดงให้เห็นว่าวัสดุทั้งสองชนิดสามารถนำมาสร้างท่อวอร์เท็กซ์สำหรับผลิตอากาศเย็นและอากาศร้อนได้จริง และพบว่าชนิดของวัสดุทำท่อวอร์เท็กซ์ส่งผลต่อการแยกชั้นอุณหภูมิอากาศภายในท่อวอร์เท็กซ์ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็นและค่าความแตกต่างอุณหภูมิอากาศร้อนของท่อวอร์เท็กซ์ทั้งสองชนิดวัสดุใกล้เคียงกัน มีเพียงผลการทดลองที่ความดันอากาศ 3 bar ที่ท่อวอร์เท็กซ์สแตนเลสมีค่าความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็นสูงกว่าท่อวอร์เท็กซ์ทองเหลือง ซึ่งผลการทดลองไม่สอดคล้องกับสมมติฐานที่กล่าวในบทที่ 1 ดังนั้นเพื่อเป็นการยืนยันผลการทดลอง จึงได้ทำการทดลองดังรายละเอียดในส่วนที่ 2

2. **ท่อทองเหลืองและท่อสแตนเลส ที่มีต้นกำเนิดกระแสหมุนวนทำจากพลาสติก**

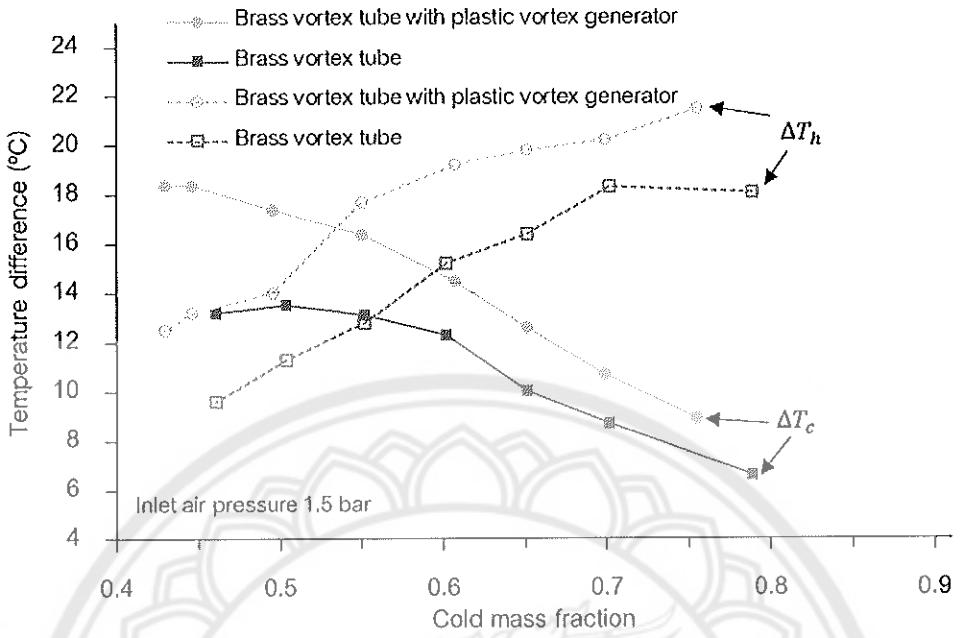
ผู้วิจัยได้ศึกษาผลของชนิดวัสดุทำต้นกำเนิดกระแสหมุนวนที่มีต่อประสิทธิภาพการทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ พิจารณาต้นกำเนิดกระแสหมุนวนเนื่องจากเป็นชิ้นส่วนประกอบสำคัญของท่อวอร์เท็กซ์ที่ทำให้เกิดกระแสหมุนวนและเกิดการแยกชั้นอุณหภูมิภายในท่อ ได้ทำการทดลองเบื้องต้นโดยการติดตั้งต้นกำเนิดกระแสหมุนวนที่มีวัสดุต่างกันสองชนิด ระหว่างต้นกำเนิดกระแสหมุนวนทองเหลืองและต้นกำเนิดกระแสหมุนวนพลาสติก ผลการทดลองแสดงในภาพ 51 ซึ่ง

แสดงผลค่าความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ พบว่าชนิดวัสดุของต้นกำเนิดกระแสหมุนวนมีผลต่อความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ โดยที่ท่อวอร์เท็กซ์ที่มีต้นกำเนิดกระแสหมุนวนพลาสติกสามารถลดอุณหภูมิอากาศปลายท่อเย็นได้ดีกว่าท่อวอร์เท็กซ์ที่มีต้นกำเนิดกระแสหมุนวนทำจากทองเหลือง 17.8% โดยที่ท่อวอร์เท็กซ์ที่มีต้นกำเนิดกระแสหมุนวนพลาสติกมีค่าความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็นสูงสุดเท่ากับ 19.1˚C

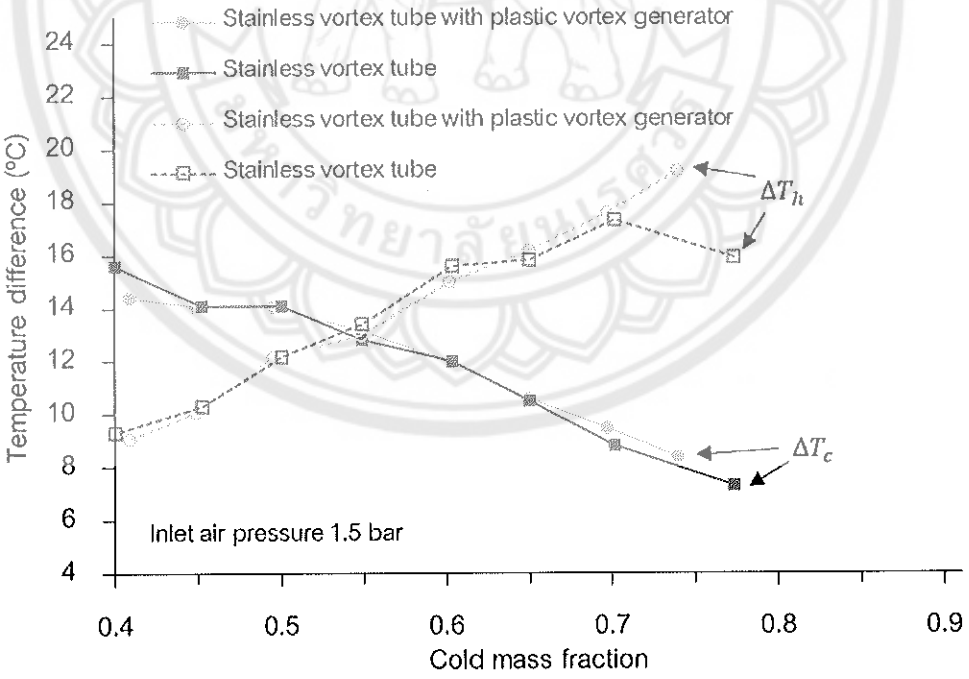


ภาพ 51 ความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ที่มีต้นกำเนิดกระแสหมุนวนทองเหลืองและพลาสติก

ดังนั้นจึงนำต้นกำเนิดกระแสหมุนวนพลาสติก มาทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของท่อวอร์เท็กซ์ที่ทำจากทองเหลืองและสแตนเลส ทดลองที่ความดันอากาศ 1.5 แสดงผลการทดลองในภาพ 52 จากภาพเห็นว่าท่อวอร์เท็กซ์ทองเหลืองที่ติดตั้งต้นกำเนิดกระแสหมุนวนพลาสติกมีค่าความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็นและร้อนสูงท่อวอร์เท็กซ์ทองเหลืองที่ติดตั้งต้นกำเนิดกระแสหมุนวนทองเหลือง และภาพ 53 ท่อวอร์เท็กซ์สแตนเลสที่ติดตั้งต้นกำเนิดกระแสหมุนวนพลาสติกและสแตนเลสมีผลความแตกต่างอุณหภูมิอากาศใกล้เคียงกัน ถึงอย่างไรก็ตามที่สัดส่วนมวลอากาศเย็นตั้งแต่ 0.65 ท่อวอร์เท็กซ์ที่มีต้นกำเนิดกระแสหมุนวนพลาสติกมีแนวโน้มค่าความแตกต่างอุณหภูมิอากาศร้อนสูงกว่าต้นกำเนิดกระแสหมุนวนสแตนเลส



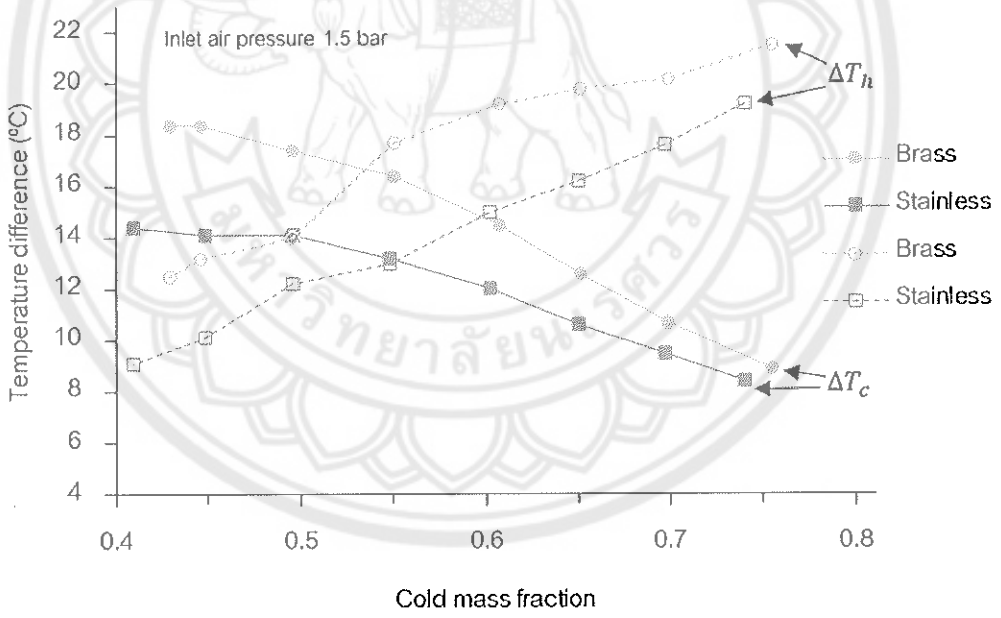
ภาพ 52 ความแตกต่างอุณหภูมิอากาศของท่อวอร์เท็กซ์ที่ทำจากทองเหลือง



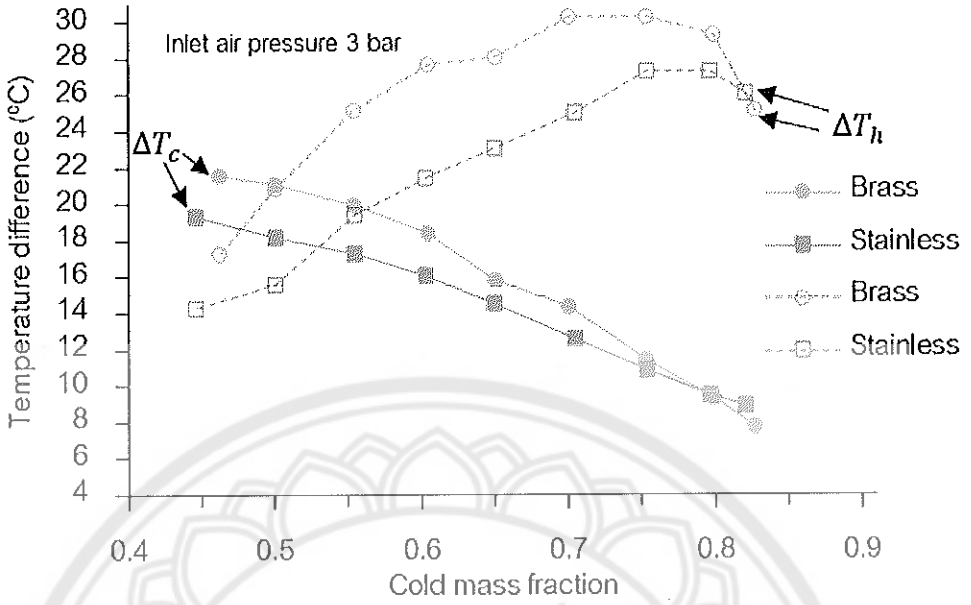
ภาพ 53 ความแตกต่างอุณหภูมิอากาศของท่อวอร์เท็กซ์ที่ทำจากสแตนเลส

จากภาพ 52 และ 53 แสดงให้เห็นว่าชนิดวัสดุของต้นกำเนิดกระแสหมุนวนมีผลต่อการแยกชั้นอุณหภูมิอากาศของท่อวอร์เท็กซ์ เนื่องจากมีการถ่ายเทพลังงานผ่านหัวฉีด ซึ่งชนิดวัสดุของหัวฉีดมีสมบัติในการถ่ายเทความร้อนที่ต่างกัน และวัสดุทำหัวฉีดจะต้องเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงทนต่อแรงดันที่ถูกอัดด้วย (Kirmaci et al., 2018) นอกจากนี้มีการศึกษาหัวฉีดที่ทำจากพลาสติก เนื่องจากเป็นชนิดวัสดุที่มีเสถียรภาพทางความร้อนสูง (Thermal stability) และมีความทนทานต่อสารเคมีสูง (Chemical resistance) ซึ่งเป็นคุณสมบัติหนึ่งของวัสดุเกี่ยวกับการทนทานต่อการกัดกร่อนจากสารเคมีที่อยู่รอบๆ และวัสดุยังมีความทนทานต่อความชื้น โดยที่ไม่เกิดความเสียหายต่อวัสดุ (Kirmaci et al., 2018)

ดังนั้นวัสดุของต้นกำเนิดกระแสหมุนวนที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ทำจากพลาสติก สำหรับติดตั้งภายในท่อวอร์เท็กซ์ทองเหลืองและท่อวอร์เท็กซ์สแตนเลส โดยแสดงผลการทดลองที่ความดันอากาศ 1.5 bar ในภาพ 54 และแสดงผลที่ความดันอากาศ 3 bar ในภาพ 55



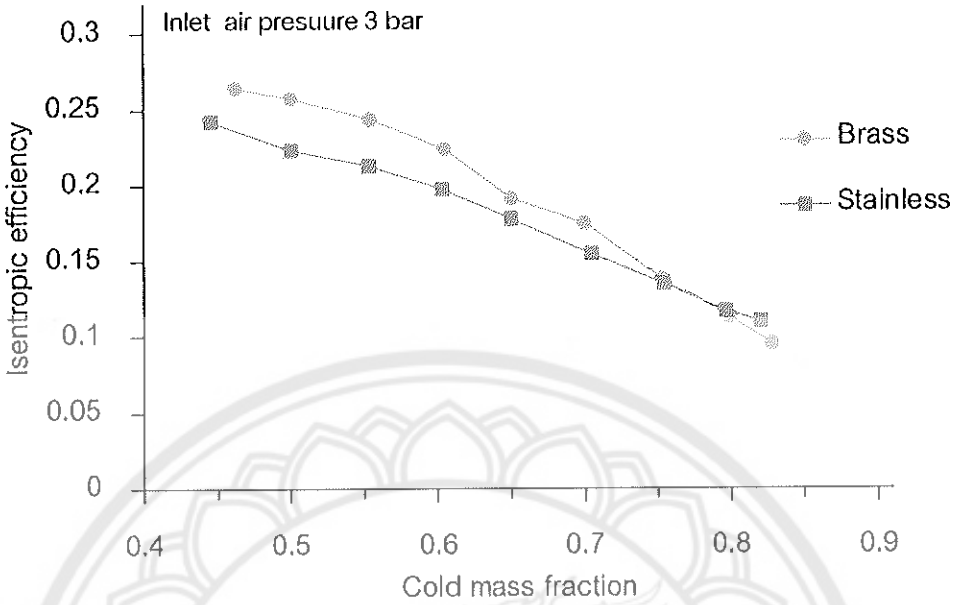
ภาพ 54 ความแตกต่างอุณหภูมิอากาศของท่อวอร์เท็กซ์ ที่มีต้นกำเนิดกระแสหมุนวนพลาสติก ที่ความดันอากาศ 1.5 bar



ภาพ 55 ความแตกต่างอุณหภูมิอากาศของท่อวอร์เท็กซ์ ที่มีต้นกำเนิดกระแสหมุนวนพลาสติก ที่ความดันอากาศ 3 bar

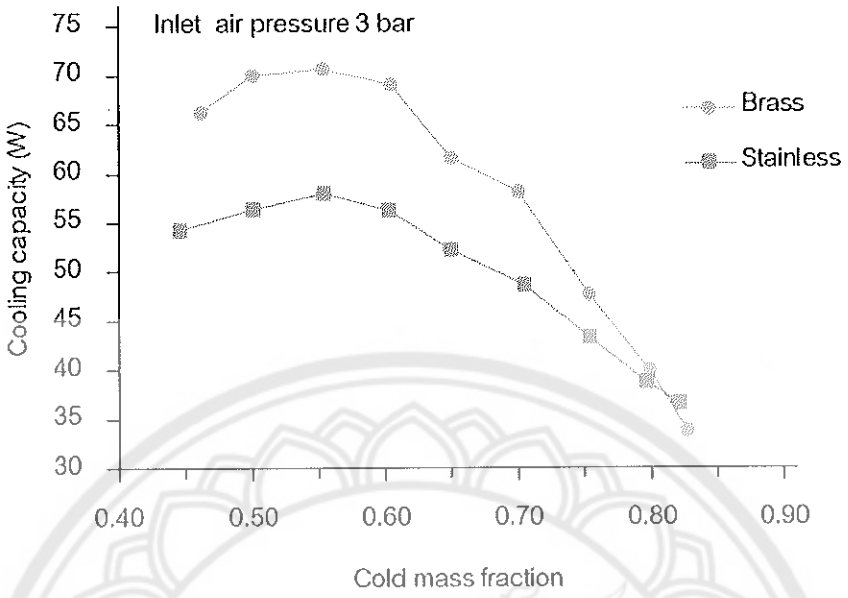
ภาพ 54 แสดงผลที่ความดันอากาศ 1.5 bar พบว่าการนำต้นกำเนิดกระแสหมุนวนทำจากพลาสติกมาติดตั้งในท่อวอร์เท็กซ์ทั้งสองชนิดวัสดุ ทำให้สามารถปรับค่าสัดส่วนมวลอากาศเย็นได้ใกล้เคียงกันในช่วงตั้งแต่ 0.41 ถึง 0.75 ที่สัดส่วนมวลอากาศเย็น 0.43 ท่อวอร์เท็กซ์ทองเหลืองมีค่าความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็นสูงสุด 18.4°C ซึ่งมีค่าสูงกว่าท่อวอร์เท็กซ์สแตนเลส 21.7% ในทำนองเดียวกันท่อวอร์เท็กซ์ทองเหลืองสามารถเพิ่มอุณหภูมิอากาศปลายท่อร้อนได้สูงกว่าท่อวอร์เท็กซ์สแตนเลส และในภาพ 55 แสดงผลที่ความดันอากาศ 3 bar พบว่าที่สัดส่วนมวลอากาศเย็นใกล้ 0.45 ท่อวอร์เท็กซ์ทองเหลืองมีค่าความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็นสูงสุด 21.6°C ขณะที่ท่อวอร์เท็กซ์สแตนเลสมีค่าสูงสุด 19.3°C ซึ่งท่อวอร์เท็กซ์ทองเหลืองมีค่าสูงกว่าท่อวอร์เท็กซ์สแตนเลส 10.7% เช่นเดียวกับที่สัดส่วนมวลอากาศเย็น 0.75 ท่อวอร์เท็กซ์ทองเหลืองมีค่าความแตกต่างอุณหภูมิอากาศร้อนสูงสุด 30.3°C สูงกว่าท่อวอร์เท็กซ์สแตนเลส 9.9%

จากภาพ 54 และภาพ 55 แสดงว่าท่อวอร์เท็กซ์ทำจากทองเหลืองที่ติดตั้งต้นกำเนิดกระแสหมุนวนพลาสติกมีความสามารถลดอุณหภูมิอากาศปลายท่อเย็นได้ดีกว่าท่อวอร์เท็กซ์สแตนเลส ซึ่งผลการทดลองไปในทิศทางเดียวกันทั้งที่ความดันอากาศ 1.5 bar และความดันอากาศ 3 bar ต่อมาพิจารณาประสิทธิภาพการทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ด้วยการวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพไอเซนโทรปิก ความสามารถการทำความเย็น และสมรรถนะการทำความเย็น



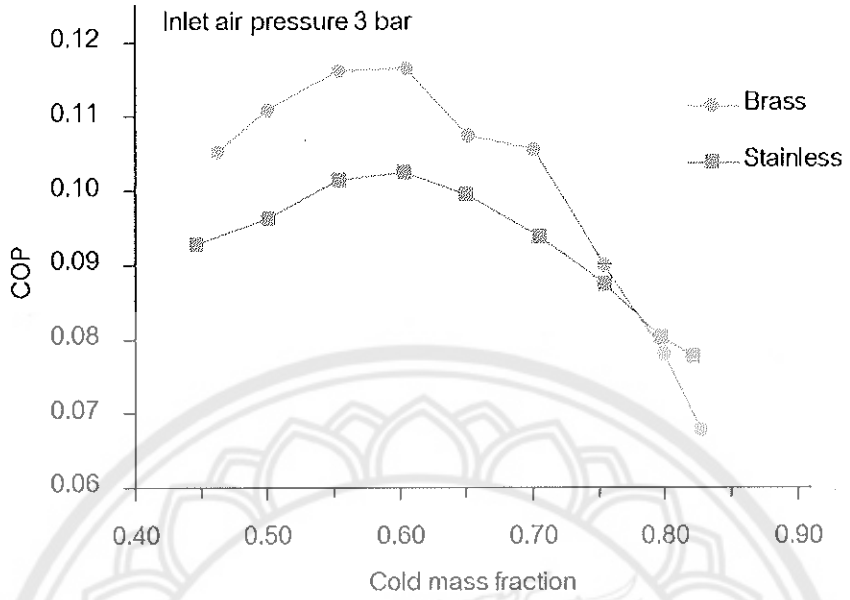
ภาพ 56 ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของท่อวอร์เท็กซ์ ทดสอบที่ความดันอากาศ 3 bar

จากภาพ 56 พบว่าผลการทดลองคล้ายกับผลความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็นในภาพ 55 เนื่องจากประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็น ท่อวอร์เท็กซ์ทั้งสองวัสดุมีประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกสูงสุดที่สัดส่วนมวลอากาศเย็นประมาณ 0.45 หลังจากนั้นประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกมีค่าลดลงเมื่อสัดส่วนมวลอากาศเย็นเพิ่มขึ้น ท่อวอร์เท็กซ์ทองเหลืองมีประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกสูงสุด 0.27 ท่อวอร์เท็กซ์สแตนเลสมีค่าสูงสุด 0.24 แสดงให้เห็นว่าท่อวอร์เท็กซ์ทองเหลืองมีค่าสูงกว่าท่อวอร์เท็กซ์สแตนเลสถึง 11.1% ผลการทดลองจากงานวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Saidi, & Valipour (2003) ศึกษาการออกแบบท่อวอร์เท็กซ์ ที่ความดันอากาศ 3 bar ท่อวอร์เท็กซ์มีประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกในช่วงตั้งแต่ 0.165 ถึง 0.445 นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Eiamsa-ard (2010) ได้ศึกษาการแยกชั้นพลังงานภายในท่อวอร์เท็กซ์ ทดสอบที่ความดันอากาศ 3 bar ซึ่งท่อวอร์เท็กซ์มีประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกเท่ากับ 0.237



ภาพ 57 ความสามารถการทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ ทดสอบที่ความดันอากาศ 3 bar

ภาพ 57 แสดงผลความสามารถการทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ ซึ่งบอกถึงปริมาณความเย็นที่ปล่อยออกจากท่อด้านเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ จะขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของมวลอากาศเย็นและความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็น พบว่าเมื่อสัดส่วนมวลอากาศเย็นเพิ่มขึ้นความสามารถการทำความเย็นเพิ่มขึ้นด้วย จนมีค่าสูงสุดที่สัดส่วนมวลอากาศเย็น 0.55 และหลังจากนั้นค่าความสามารถการทำความเย็นลดลงตามสัดส่วนมวลอากาศเย็นที่เพิ่มขึ้น โดยที่ท่อวอร์เท็กซ์ที่ทำจากทองเหลืองมีความสามารถการทำความเย็นสูงสุด 70.7 W ขณะที่ท่อวอร์เท็กซ์สแตนเลสมีค่าสูงสุด 58.0 W ซึ่งท่อวอร์เท็กซ์ทองเหลืองมีค่าความสามารถการทำความเย็นสูงกว่าท่อวอร์เท็กซ์สแตนเลส 18% ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับท่อวอร์เท็กซ์ที่ผลิตจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นท่อวอร์เท็กซ์ที่มีจำหน่ายตามท้องตลาด โดยมีการศึกษาการลดอุณหภูมิภายในตู้ทดลองด้วยท่อวอร์เท็กซ์ ที่ความดันอากาศ 3 bar พบว่าท่อวอร์เท็กซ์มีค่าความสามารถการทำความเย็นภายในตู้ทดลองสูงสุด 70 W (สินีพร จันทร์สว่าง, และวราภรณ์ รัตตนงพิสัตย์, 2560) นั่นแสดงให้เห็นว่าท่อวอร์เท็กซ์ทองเหลืองมีค่าความสามารถการทำความเย็นใกล้เคียงกับท่อวอร์เท็กซ์ที่มีจำหน่ายตามท้องตลาดด้านอุปกรณ์ทำความเย็น



ภาพ 58 สมรรถนะการทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ ทดสอบที่ความดันอากาศ 3 bar

ภาพ 58 แสดงผลสมรรถนะการทำความเย็น(COP) ของท่อวอร์เท็กซ์ ซึ่งแสดงถึงความสามารถการทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ต่อพลังงานกลที่ใช้ในการผลิตการทำความเย็น จากภาพพบว่าท่อวอร์เท็กซ์มีสมรรถนะการทำความเย็นสูงสุดที่สัดส่วนมวลอากาศเย็น 0.60 โดยที่ท่อวอร์เท็กซ์ทองเหลืองมีสมรรถนะการทำความเย็นสูงสุด 0.117 ขณะที่ท่อวอร์เท็กซ์สแตนเลสมีค่าสูงสุด 0.103 จากการศึกษางานวิจัยก่อนหน้า ท่อวอร์เท็กซ์ทำการทดลองโดยใช้อากาศเป็นสารทำความเย็นมีสมรรถนะการทำความเย็นได้สูงสุด 0.16 ซึ่งถือว่าต่ำมากเมื่อเทียบกับระบบทำความเย็นทั่วไปแบบอัดไอ ซึ่งมีค่าระหว่าง 1.0-2.5 (นักสิทธิ์ คูวัฒนาชัย, และกำธร เหาตะวาณิชย์, 2532) งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับท่อวอร์เท็กซ์ทดลองที่ความดันอากาศ 5.6 bar มีสมรรถนะการทำความเย็นสูงสุด 0.16 (Torrella et al., 2013) นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ทดลองที่ความดันอากาศ 3 bar พบว่าท่อวอร์เท็กซ์มีสมรรถนะการทำความเย็นสูงสุดประมาณ 0.09 (Hamdan et al., 2018) จากผลการทดลองของงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าท่อวอร์เท็กซ์ที่ทำจากทองเหลืองมีสมรรถนะการทำความเย็นที่สอดคล้องกับผลการทดลองของงานวิจัยข้างต้น ท่อวอร์เท็กซ์เป็นอุปกรณ์ทำความเย็นที่มีสมรรถนะการทำความเย็นต่ำเหมาะสำหรับการทำงานเฉพาะ เช่น การเป่าลมเย็นจากท่อวอร์เท็กซ์ให้กับวัสดุขณะกลึงหรือตัด จะช่วยลดการเสียหายของชิ้นงานได้ดี

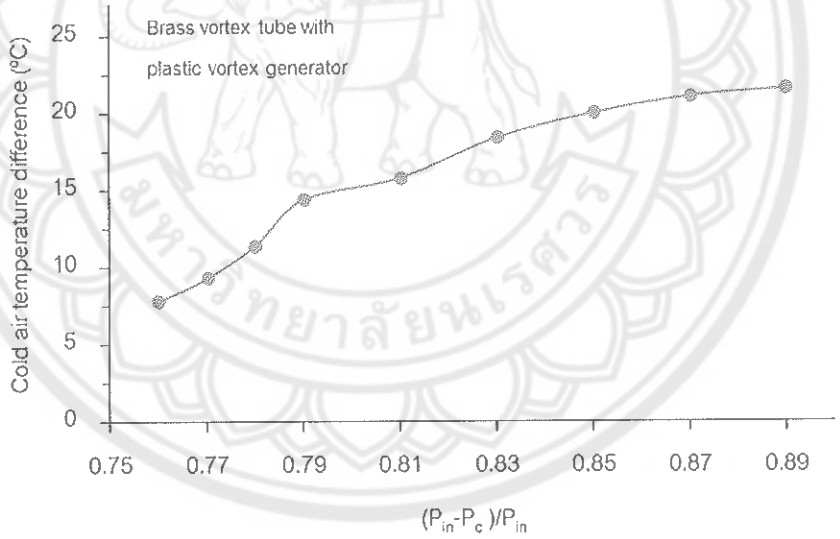
ผลการทดลองของท่อวอร์เท็กซ์จากทองเหลืองและสแตนเลส ที่มีต้นกำเนิดกระแสหมุนวนพลาสติก แสดงให้เห็นว่าท่อวอร์เท็กซ์ทองเหลืองมีความสามารถในการแยกชั้นอุณหภูมิได้ดีกว่าท่อวอร์เท็กซ์สแตนเลส พิจารณาจากผลความแตกต่างอุณหภูมิของท่อวอร์เท็กซ์ทองเหลืองมีค่าสูงกว่าท่อวอร์เท็กซ์สแตนเลส ที่ความดันอากาศ 1.5 bar และ 3 bar โดยที่ท่อวอร์เท็กซ์ทองเหลืองมีค่าความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็นสูงสุด 21.6°C และค่าความแตกต่างอุณหภูมิอากาศร้อนสูงสุด 30.3°C ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่าท่อวอร์เท็กซ์สแตนเลส 10.7% และ9.9% ตามลำดับ และยังแสดงให้เห็นว่าท่อวอร์เท็กซ์ทองเหลืองมีประสิทธิภาพการทำความเย็นสูงกว่าท่อวอร์เท็กซ์สแตนเลส โดยมีประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกสูงกว่า 11.1% มีความสามารถการทำความเย็นสูงกว่า 18.0% และมีสมรรถนะการทำความเย็นสูงกว่า 12.0% จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าทองเหลืองเป็นวัสดุที่สามารถทำให้ท่อวอร์เท็กซ์มีประสิทธิภาพการทำความเย็นที่ดีกว่าสแตนเลส

งานวิจัยนี้มีการหุ้มฉนวนที่บริเวณผิวท่อร้อนของท่อวอร์เท็กซ์เพื่อลดการสูญเสียความร้อนจากภายในท่อออกไปนอกท่อ และช่วยลดการถ่ายเทความร้อนของอากาศภายนอกท่อเข้าไปยังภายในท่อวอร์เท็กซ์ด้วย นั่นเป็นเพียงการหุ้มฉนวนเพียงบริเวณท่อร้อน ซึ่งเป็นส่วนกลางของท่อวอร์เท็กซ์เท่านั้น แต่บริเวณส่วนต้น(ปลายท่อเย็นและห้องสร้างกระแสหมุนวน) และบริเวณส่วนปลาย(วาล์วควบคุม) ไม่มีการหุ้มฉนวน ดังนั้นอาจจะเกิดการถ่ายเทความร้อนจากภายในท่อวอร์เท็กซ์ออกไปยังนอกท่อวอร์เท็กซ์ผ่านตัวกลางที่เป็นผิวของวัสดุ และจากการรวบรวมงานวิจัยเกี่ยวกับเกณฑ์การออกแบบท่อวอร์เท็กซ์ของ Yilmaz et al. (2009) ได้กล่าวถึงวัสดุสำหรับนำมาทำท่อวอร์เท็กซ์ พื้นผิวภายในของท่อวอร์เท็กซ์ต้องมีผิวเรียบ ซึ่งพื้นผิวภายในที่ราบเรียบจะส่งผลต่อการแยกชั้นอุณหภูมิอากาศและประสิทธิภาพของท่อวอร์เท็กซ์ที่ดีขึ้น และความหยาบ ขรุขระ ไม่เรียบ (Roughness) ของผิวภายในท่อจะมีผลต่อความเสียดทานระหว่างอากาศและผิวท่อ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของท่อวอร์เท็กซ์เช่นกัน โดยจะทำให้เกิดการแยกชั้นของอุณหภูมิอากาศภายในท่อวอร์เท็กซ์ลดลง พื้นผิวภายในของท่อวอร์เท็กซ์ขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตและคุณสมบัติของวัสดุแต่ละชนิด ในส่วนกระบวนการผลิต ผู้วิจัยได้ทำการสร้างท่อวอร์เท็กซ์ภายใต้เงื่อนไขด้านเครื่องมือและช่างผู้เชี่ยวชาญเดียวกัน แต่ในส่วนของคุณสมบัติของวัสดุ เมื่อพิจารณาความขรุขระของผนังท่อ(Absolute Roughness) พบว่าทองเหลืองเป็นวัสดุที่มีผิวเรียบมากกว่าสแตนเลส (Rennels, & Hudson, 2012) นี่อาจจะเป็นเหตุผลหนึ่งที่ทำให้ท่อวอร์เท็กซ์ที่ทำจากทองเหลืองมีประสิทธิภาพดีกว่าสแตนเลส

การเปรียบเทียบผลการทดลองกับงานวิจัยอื่น

1. ผลของความดันอากาศที่ปลายท่อวอร์เท็กซ์ต่ออุณหภูมิอากาศเย็น

ความดันอากาศที่ป้อนเข้าไปในท่อวอร์เท็กซ์เป็นแหล่งที่ให้พลังงานสำหรับท่อวอร์เท็กซ์ ซึ่งทำให้เกิดการแยกชั้นอุณหภูมิอากาศเย็นและอากาศร้อนภายในท่อวอร์เท็กซ์ แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของความดันอากาศขาเข้าของท่อวอร์เท็กซ์ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิอากาศปลายท่อเย็นและความดันอากาศที่ปลายท่อเย็น จากงานวิจัยของ Rattanongphisat et al. (2008) กล่าวถึงความดันของของไหลที่เข้าไปภายในท่อผ่านหัวฉีดในแนวสัมผัส ของไหลจะถูกส่งไปตามลำท่อร้อน กระแสอากาศที่อยู่รอบขอบท่อใกล้กับผนัง มีความดันอากาศสูงกว่ากระแสอากาศที่อยู่บริเวณแกนกลางท่อ ซึ่งหมายถึงกระแสอากาศที่แกนกลางท่อมีความดันต่ำจะทำให้อุณหภูมิอากาศต่ำด้วย เพื่อเป็นการพิสูจน์ความสัมพันธ์ของความดันอากาศกับอุณหภูมิอากาศปลายท่อ จึงได้นำผลการทดลองของท่อวอร์เท็กซ์ทองเหลือง ที่มีต้นกำเนิดกระแสหมุนวนจากพลาสติก ที่ความดันอากาศขาเข้า 3 bar ผลการทดลองตามภาพ 59



ภาพ 59 การลดลงของความดันอากาศปกติที่มีผลต่อการแยกชั้นอุณหภูมิอากาศ

ภาพ 59 แสดงถึงอัตราส่วนระหว่างความแตกต่างของความดันอากาศขาเข้าและความดันอากาศปลายท่อเย็นต่อความดันอากาศขาเข้าที่มีผลต่อความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็น จากภาพพบว่าอัตราส่วนของความดันอากาศเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็นเพิ่มขึ้นด้วย จากงานวิจัยของ Ahlborn et al. (1996) ได้ศึกษาการแยกชั้นของอุณหภูมิของท่อ

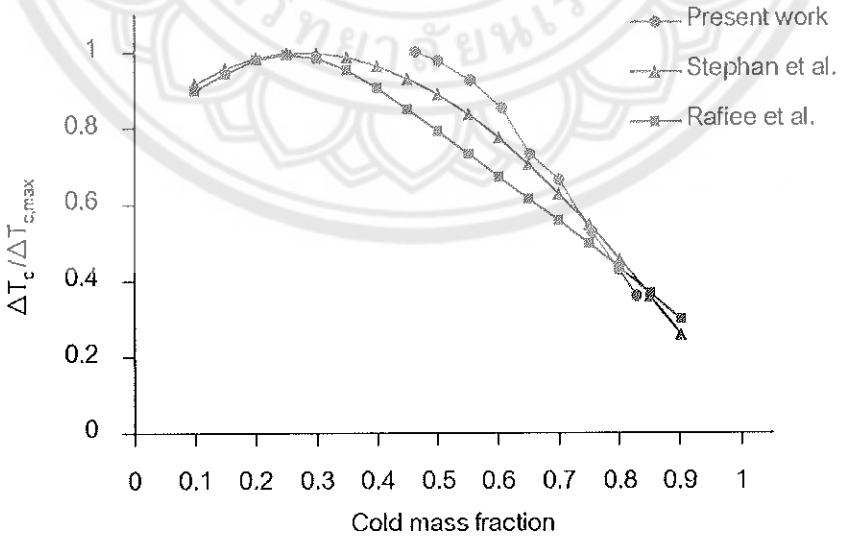
วอร์เท็กซ์ที่ความดันต่ำ พบว่าการแยกชั้นอุณหภูมิอากาศภายในท่อวอร์เท็กซ์มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับการลดลงของความดันอากาศปกติ หรือ ความดันอากาศแตกต่างที่เทียบค่า (Normalized pressure drop) ระหว่างความดันอากาศขาเข้าและความดันอากาศปลายท่อเย็น

2. **ความสัมพันธ์ที่คล้ายกันไม่ขึ้นอยู่เงื่อนไขการทำงาน**

Stephan et al. (1983) ได้ศึกษาการประมาณค่าของท่อวอร์เท็กซ์ที่มีลักษณะทางเรขาคณิตคล้ายกัน ได้กล่าวถึงอัตราส่วนของความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็นต่อความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็นที่มีค่าสูงสุด $\Delta T_c / \Delta T_{c,max}$ ซึ่งได้เขียนความสัมพันธ์ตามฟังก์ชันของสัดส่วนมวลอากาศเย็น ซึ่งเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ที่คล้ายกัน(Similarity relation) สำหรับการแยกชั้นพลังงานหรือการเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศปลายท่อเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ด้านล่าง

$$\frac{\Delta T_c}{\Delta T_{c,max}} = f(y) \tag{4.1}$$

โดยที่ ΔT_c คือความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็น $\Delta T_{c,max}$ คือความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็นที่มีค่าสูงสุด และ f(y) คือฟังก์ชันของสัดส่วนมวลอากาศเย็น ซึ่งเป็นสมการที่เป็นอิสระกับเงื่อนไขการดำเนินการทดลองและสารทำงานภายในท่อวอร์เท็กซ์ที่มีรูปร่าง รูปทรงทางเรขาคณิตคล้ายกัน



ภาพ 60 ความสัมพันธ์ที่คล้ายกันตามฟังก์ชันของสัดส่วนมวลอากาศ

จากภาพ 60 แสดงการยืนยันว่าผลการทดลองของท่อวอร์เท็กซ์นี้มีความสัมพันธ์คล้ายกันกับงานวิจัยของ Stephan et al. (1983) และงานวิจัยของ Rafiee, & Sadeghiazad (2014) จากภาพพบว่า $\Delta T_c / \Delta T_{c,max}$ มีค่าสูงสุดที่สัดส่วนมวลอากาศเย็นประมาณ 0.3 และเมื่อสัดส่วนมวลอากาศเย็นเพิ่มขึ้น ทำให้ $\Delta T_c / \Delta T_{c,max}$ มีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งผลการทดลองของท่อวอร์เท็กซ์ทองเหลืองมีลักษณะลดลงเช่นกัน ซึ่งค่าความสัมพันธ์ที่คล้ายกันนี้เป็นไปในทิศทางเดียวกัน

การประเมินค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของท่อวอร์เท็กซ์

ในส่วนการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของระบบทำความเย็นท่อวอร์เท็กซ์ที่ใช้อากาศเป็นสารทำความเย็นในการทำงาน สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยค่าดัชนีผลกระทบที่มีต่อการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนเทียบเท่าโดยรวม (Total equivalent warming impact หรือ TEWI) ซึ่งเป็นผลกระทบรวมระหว่างผลกระทบทางตรงที่เกิดจากการใช้สารทำความเย็นและผลกระทบทางอ้อมที่เกิดจากการใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับระบบ โดยอ้างอิงตามเงื่อนไขของคณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยเรื่องการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Intergovernmental Panel on Climate Change หรือ IPCC, 2005) ที่มีการปลดปล่อยสารทำงานออกสู่ชั้นบรรยากาศ

ท่อวอร์เท็กซ์เป็นอุปกรณ์ทำความเย็นชนิดหนึ่ง ที่สามารถทำงานโดยใช้สารทำความเย็นจากธรรมชาติ นั่นคือใช้อากาศเป็นสารทำงาน ซึ่งมีผลกระทบต่อการเกิดภาวะโลกร้อนน้อยมาก เนื่องจากสารทำความเย็นธรรมชาติเป็นสารที่มีค่าศักยภาพที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (GWP) ต่ำ ส่วนประกอบของอากาศประกอบด้วยไนโตรเจนกับออกซิเจนเป็นหลักถึง 99% และมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 0.04% ดังนั้นอากาศจึงมีค่า GWP ที่ต่ำ เทียบเท่ากับ 0 หรือเรียกว่า GWP ของอากาศ เท่ากับ 0 และท่อวอร์เท็กซ์สามารถทำงานด้วยอากาศที่มีความดันสูงอัดเข้าไปในท่อ ท่อวอร์เท็กซ์ไม่มีส่วนประกอบที่ต้องใช้ไฟฟ้าในการทำงาน แต่ในกระบวนการผลิตอากาศอัดเพื่อให้อากาศมีความดันสูงนั้น จำเป็นต้องใช้พลังงานจากปั๊มลมเพื่อผลิตลมอัดแล้วส่งต่อตามลำท่อเข้าไปที่ท่อวอร์เท็กซ์ ซึ่งปั๊มลมที่ทำหน้าที่เป็นต้นกำเนิดในการผลิตลม มีส่วนประกอบหลักคือมอเตอร์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล ในการพิจารณาระบบทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ที่มีผลกระทบที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อนวิเคราะห์ด้วยสมการ TEWI ที่แสดงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้งทางตรงและทางอ้อม แสดงให้เห็นว่าท่อวอร์เท็กซ์ไม่มีผลกระทบทางตรงที่เกิดจากการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกของสารทำความเย็น มีเพียงผลกระทบที่เกิดขึ้นทางอ้อมจากการใช้พลังงานเท่านั้น ดังนั้นจะได้สมการ TEWI ของท่อวอร์เท็กซ์ว่า

$$TEWI_{\text{vortex tube with air}} = \text{Indirect effect}$$

$$TEWI_{\text{vortex tube with air}} = E \times \beta \times n \quad (4.2)$$

เมื่อ E คือการใช้พลังงานต่อปี(kWh) β คือปริมาณการปลดปล่อยก๊าซ CO_2จากการผลิตไฟฟ้า ($kgCO_2$/kWh) และ n คืออายุการใช้งานของมอเตอร์ปั๊มลม(ปี) จากข้อมูลปริมาณการปลดก๊าซCO_2 จากการใช้พลังงานไฟฟ้าของประเทศไทยเฉลี่ยเท่ากับ 0.465 kg CO_2 /kWh (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2561) ขนาดของมอเตอร์ปั๊มลมที่ใช้งานมีกำลังขนาด 5 HP หรือ 3.7 kW และมีอายุการใช้งานเฉลี่ย 10 ปี พิจารณาให้ใช้งานท่อวอร์เท็กซ์วันละ 1 ชั่วโมง เปิดใช้งานทุกวัน 365 วันต่อปี ท่อวอร์เท็กซ์จะมีอัตราการใช้ไฟฟ้าเท่ากับ 1351 kWh/year จะสามารถคำนวณค่า TEWI ของท่อวอร์เท็กซ์ได้ว่า

$$TEWI_{\text{vortex tube with air}} = 1351 \frac{\text{kWh}}{\text{year}} \times 0.465 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{kWh}} \times 10 \text{ year}$$

$$TEWI_{\text{vortex tube with air}} = 6282 \text{ kgCO}_2 \quad (4.3)$$

นั่นแสดงให้เห็นว่าระบบทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ที่ใช้อากาศเป็นสารทำงานมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเท่ากับ 6282 $kgCO_2$ หากนำมาเปรียบเทียบกับระบบทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ที่ใช้สารทำความเย็น R134a ซึ่งเป็นสารทำความเย็นที่เคยนำมาใช้ในการทดลองกับท่อวอร์เท็กซ์ ซึ่ง R134a เป็นสารทำความเย็น Hydrofluorocarbon (HFC) ใช้สำหรับเครื่องทำความเย็นที่มีอุณหภูมิปานกลาง เช่น ระบบปรับอากาศในอากาศ รถยนต์ และตู้เย็น โดยที่ R134a มีค่าศักยภาพในการเกิดภาวะโลกร้อน(GWP 100 ปี) เท่ากับ 1300 อายุของR134aที่อยู่บนชั้นบรรยากาศเท่ากับ 14 ปี โดยพิจารณาการเติมสารทำความเย็น 1 กิโลกรัม มีการรั่วไหลของสารทำความเย็น 1% ต่อปี และสารทำความเย็นสามารถนำกลับมาใช้ได้ใหม่ 50% ตามสมการ 2.18 สามารถหาค่าดัชนีผลกระทบที่มีต่อการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนเทียบเท่าโดยรวม(TEWI) ของท่อวอร์เท็กซ์ที่ใช้ R134a เป็นสารทำความเย็นได้ว่า

$$TEWI_{\text{vortex tube with R134a}} = \text{Direct effect} + \text{Indirect effect}$$

$$TEWI_{\text{vortex tube with R134a}} = \left[(GWP \times m \times L \times N) + (GWP \times m\,(1 - \alpha)) \right] + (E \times \beta \times n) \quad (4.4)$$

เมื่อ GWP คือค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน L คือการรั่วไหลของสารทำความเย็นต่อปี (กิโลกรัม/ปี) N คือระยะเวลาที่สารทำเย็นอยู่บนชั้นบรรยากาศ (ปี) m คือการเติมสารทำความเย็น (กิโลกรัม) α คือปัจจัยที่มีการนำสารทำความเย็นกลับมาใช้ใหม่ สามารถแทนค่าตัวแปรตามเงื่อนไขเบื้องต้นได้ว่า

$$TEWI_{\text{vortex tube with R134a}} = \left[\left(1300 \times 1\,\text{kg} \times 0.01\frac{\text{kg}}{\text{year}} \times 14\ \text{year}\right) + \left(1300 \times 1\,\text{kg}\,(1\text{-}0.5)\right)\right] + \left(1351\frac{\text{kWh}}{\text{year}} \times 0.465\frac{\text{kgCO}_2}{\text{kWh}} \times 10\ \text{year}\right)$$

$$TEWI_{\text{vortex tube with R134a}} = 182 + 650 + 6282\ (\text{kgCO}_2)$$

$$TEWI_{\text{vortex tube with R134a}} = 7114\ \text{kgCO}_2 \qquad (4.5)$$

จะได้ว่าท่อวอร์เท็กซ์ที่ใช้ R134a เป็นสารทำความเย็นมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเท่ากับ 7114 kgCO_2 จากการคำนวณระบบทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ที่ใช้อากาศและ R134a เป็นสารทำงานพบว่าท่อวอร์เท็กซ์ที่ใช้อากาศเป็นสารทำงานมีค่าดัชนีผลกระทบที่มีต่อการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนเทียบเท่าโดยรวมต่ำกว่าการใช้ R134a เนื่องจากอากาศไม่มีผลกระทบที่เกิดจากการรั่วไหลของสารทำความเย็นหรือไม่มีผลกระทบที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม นั่นจึงสามารถสรุปได้ว่าท่อวอร์เท็กซ์ที่ใช้อากาศมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่ำกว่าการใช้ R134a เป็นสารทำความเย็น

บทที่ 5

บทสรุป

งานวิจัยนี้ได้สร้างท่อวอร์เท็กซ์ โดยอ้างอิงจากงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับ ตัวแปรที่มีผลต่อท่อวอร์เท็กซ์ สำหรับเป็นแนวทางในการกำหนดขนาดที่สอดคล้องกับงานวิจัยที่ได้ศึกษามาก่อนหน้า โดยในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาท่อวอร์เท็กซ์ที่มีรูปแบบการไหลของอากาศแบบสวนทางกัน เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ทำจากวัสดุที่มีค่าการนำความร้อนต่างกันระหว่างสแตนเลสและทองเหลือง โดยใช้อากาศเป็นสารทำความเย็นที่ได้จากธรรมชาติ ทดสอบที่ความดันอากาศ 1.5 bar และ 3 bar

สรุปผลการวิจัย

1. สแตนเลสและทองเหลืองเป็นวัสดุที่สามารถนำมาสร้างท่อวอร์เท็กซ์ทำให้เกิดกระแสอากาศร้อนและอากาศเย็นได้จริง ชนิดของวัสดุมีผลต่อการแยกชั้นอุณหภูมิภายในท่อวอร์เท็กซ์นอก การเพิ่มความดันอากาศขาเข้าท่อวอร์เท็กซ์จะทำให้การแยกชั้นอุณหภูมิอากาศภายในท่อวอร์เท็กซ์เพิ่มขึ้นด้วย พิจารณาจากความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็นและอากาศร้อนที่มากขึ้นและมีการแยกชั้นอุณหภูมิอากาศสูงสุดที่ความดันอากาศ 3 bar

2. ท่อวอร์เท็กซ์ที่ทำจากทองเหลืองมีประสิทธิภาพการทำความเย็นสูงกว่าท่อวอร์เท็กซ์ที่ทำจากสแตนเลส ภายใต้การติดตั้งต้นกำเนิดกระแสหมุนวนพลาสติกและทดสอบที่ความดันอากาศ 3 bar ผลการทดลองพบว่าท่อวอร์เท็กซ์ทองเหลืองมีค่าความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็นสูงสุด 21.6°C ค่าความแตกต่างอุณหภูมิอากาศร้อนสูงสุด 30.3°C ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกสูงสุด 0.27 ความสามารถการทำความเย็นสูงสุด 70.7 W และสมรรถนะการทำความเย็นสูงสุด 0.117 ซึ่งมีผลสูงกว่าท่อวอร์เท็กซ์สแตนเลสคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เท่ากับ 11% 10% 11% 18% และ 12% ตามลำดับ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าท่อวอร์เท็กซ์ที่ทำจากทองเหลืองมีผลทำให้เกิดการแยกชั้นของอุณหภูมิอากาศได้ดีกว่าท่อวอร์เท็กซ์ที่ทำจากสแตนเลส

3. การประเมินค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของท่อวอร์เท็กซ์สามารถวิเคราะห์จากค่าดัชนีผลกระทบที่มีต่อการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนเทียบเท่าโดยรวม(TEWI) พบว่าระบบทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ที่ใช้อากาศมีผลกระทบทำให้เกิดภาวะโลกร้อนต่ำกว่าท่อวอร์เท็กซ์ที่ใช้สารทำความเย็น R134a เนื่องจากอากาศเป็นสารทำความเย็นที่ได้จากธรรมชาติ ไม่มีอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม

ข้อเสนอแนะ

โดยทั่วไปค่าสัดส่วนมวลอากาศเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ อยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของมวลอากาศที่ปลายท่อ ในงานวิจัยนี้ไม่สามารถให้ค่าสัดส่วนมวลอากาศเย็นครอบคลุมทั้งหมด ดังนั้นหากต้องการข้อมูลการแปรค่าสัดส่วนมวลอากาศเย็นที่กว้างขึ้น ควรมีการออกแบบสร้างชิ้นส่วนของวาล์วควบคุมให้สัมพันธ์กับช่องอากาศเย็น

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

นักสิทธ์ คูวัฒนาชัย, และกำธร เหาตะวาณิชย์. (2532). การเปลี่ยนแปลงสมรรถนะของท่อวอร์เท็กซ์ (Vortex tube) กับขนาดของท่อ. ใน *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 3* (น. 1-23). กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

พงษ์ธร จรัญญากรณ์. (2537). *เทอร์โมไดนามิกส์*. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดยูเคชั่น.

พิสิทธิ์ อะมุตะคุ, และไพรสัณฑ์ ศักดิ์ชัชวาลย์. (2549). *ศึกษาสมรรถนะทางเทอร์โมไดนามิกส์ของอากาศในท่ออุปกรณ์วอเทกซ์* (รายงานการศึกษาค้นคว้าด้วยตัวเอง). มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.

มนตรี พิรุณเกษตร. (2548). *อุณหพลศาสตร์ 1*. กรุงเทพฯ: วิทยพัฒน์.

วราภรณ์ รัตตนงพิสัตย์. (2011). ท่อวอร์เท็กซ์เทคโนโลยีทำความเย็นที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม. *Technology promotion, 38*(219), 76-78.

วิรัช กองสิน. (2557). ศึกษาและออกแบบกระติกเก็บวัคซีนด้วยอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กตริก. ใน *การประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติการพัฒนาชนบทที่ยั่งยืน "Rethink: Social Development for Sustainability in ASEAN Community" ครั้งที่ 4* (น.138-142). ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

ศีขรินทร์ โกมลหิรัญ. (2555). *ท่อวอร์เท็คสำหรับระบบปรับอากาศในที่จำกัด* (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพฯ.

ศรัทธา อาภรณ์รัตน์. (2557). *ทฤษฎีระบบเครื่องทำความเย็น*. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สินีพร จันทร์สว่าง, และวราภรณ์ รัตตนงพิสัตย์. (2560). การลดอุณหภูมิในตู้ทดลองที่มีโหลดความร้อนด้วยอากาศเย็นจากท่อวอร์เท็กซ์. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา, 22*(ฉบับพิเศษ), 468-475.

สินีพร จันทร์สว่าง. (2558). *การศึกษาประสิทธิภาพการลดภาระการทำความเย็นด้วยท่อวอร์เท็กซ์* (รายงานการศึกษาค้นคว้าด้วยตัวเองปริญญาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยนเรศวร, พิษณุโลก.

สิทธิพร พึ่งใหญ่. (2542). *หลักพื้นฐานและประยุกต์ทางอุณหพลศาสตร์*. กรุงเทพฯ: ศูนย์การพิมพ์แก่นจันทร์.

สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2561). *รายงานสถิติพลังงานของประเทศไทย 2561*. กรุงเทพฯ: เพจเมคเกอร์.

AIRMASTER. (2019). *Tool cooling 56000F*. Retrieved January 5, 2019, from https://www.air-masters.eu/en/tool-cooling/134-tool-cooling-56000f.html

Ahlborn, B., Camire, J., & Keller, J.U. (1996). Low-pressure vortex tubes. *Journal of Physics D Applied Physics, 29*(6), 1469 -1472.

Ahlborn, B., & Groves, S. (1997). Secondary flow in a vortex tube. *Fluid Dynamics Research, 21*, 73-86.

Ameen, A. (2006). *Refrigeration and air conditioning*. India: Prentice-Hall of India.

Aydin, O., & Baki, M. (2006). An experimental study on the design parameters of a counterflow vortex tube. *Energy, 31*, 2763-2772.

Agrawal, N., Naik, S.S., & Gawale, Y.P. (2014). Experimental investigation of vortex tube using natural substance. *International communications in heat and mass transfer, 2*, 51-55.

Aljuwayhel, N.F., Nellis, G.F., & Klein, S.A. (2005). Parametric and internal study of the vortex tube using a CFD model. *International Journal of Refrigeration, 28*(3) 442–450.

Attalla, M., Ahmed, H., Ahmed, M.S., & Wafa, A.A. (2017). An experimental study of nozzle number on Ranque Hilsch counter-flow vortex tube. *Experimental Thermal and Fluid Science, 82*, 381–389.

Aydin, O., Markal, B., & Avci, M. (2010). A new vortex generator geometry for a counter-flow Ranque-Hilsch vortex tube. *Applied Thermal Engineering, 30*, 2505-2511.

Balmer, R.T. (1988). Pressure-driven Ranque-Hilsch temperature separation in liquids. *Journal of Fluids Engineering, 110*, 161-164.

Cebeci, I., Kirmaci, V., & Topcuoglu, U. (2016). The effects of orifice nozzle number and nozzle made of polyamide plastic and aluminum with different inlet pressures on heating and cooling performance of counter flow Ranque–Hılsch vortex tubes: An experimental investigation. *International Journal of Refrigeration, 72*, 140-146.

Darokar, H., Borse, S., & Devade, K. (2012). Experimental investigations on divergent vortex tube with convergent entry nozzle. *International Journal of engineering research and Technology, 1*(6), 1-6.

Devade, K., & Pise, A. (2014). Effect of cold orifice diameter and geometry of hot end valves on performance of converging type Ranque Hilsch vortex tube. *Energy Procedia, 54*, 642-653.

Dincer, K., Berber, A., & Ozen, D.N. (2013). Investigation of Performance of Heating and Cooling of Counter Flow Ranque-Hilsch Tubes with L/D=15, 16, 17, 18 for Brass. *Applied Mechanics and Materials, 372*, 350-353.

Duspara, M., Kosec, B., Stoic, M., Kramar, D., & Stoic, A. (2013). Application of vortex tube for tool cooling. *Journal of Production Engineering, 16* (2), 41-44.

Devade, K.D., & Pise, A.T. (2017). Issues and prospects of energy separation in vortex tubes: Review. *Heat Transfer-Asian Research, 47*(3), 461-491.

Eiamsa-ard, S., & Promvonge, P. (2008). Review of Ranque–Hilsch effects in vortex tubes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12*, 1822–1842.

Eiamsa-ard, S., & Vongsarnpikoon, L. (2000). Experimental investigation of temperature reduction in a Ranque- Hilsch vortex tube. *The Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand, 14*, 60-65.

Eiamsa-ard, S. (2010). Experimental investigation of energy separation in a counter-flow Ranque–Hilsch. *International Communications in Heat and Mass Transfer, 37*, 156-162.

Farzaneh-Gord, M., & Sadi, M. (2014). Improving vortex tube performance based on vortex generator design. *Energy, 72*, 492-500.

Gao, C. *Experimental study on the Ranque-Hilsch vortex tube* (Unpublished doctoral dissertation). Technische Universiteit Eindhoven, Netherlands.

Hilsch, R. (1947). The Use of the Expansion of Gases in a Centrifugal Field as Cooling Process. *Review of Scientific Instruments, 18*, 108-113.

Holman, J.P. (2002). *Heat Transfer (9 th ed)*. New York: McGraw-Hill Companies.

Hamdan, M.O., Al-Omari, S., & Oweimer, A.S. (2018). Experimental study of vortex tube energy separation under different tube design. *Experimental Thermal and Fluid Science, 91*, 306–311.

Hamdan, M.O., Alsayyed, B., & Elnajjar, E. (2013). Nozzle parameters affecting vortex tube energy separation performance. *Heat and Mass Transfer, 49*(4), 533–541.

Im, S.Y., & Yu, S.S. (2012). Effects of geometric parameters on the separated air flow temperature of a vortex tube for design optimization. *Energy, 37*, 154-160.

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2005). *Safeguarding the Ozone Layer and the Global Climate System: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. England: Cambridge University Press.

Kaya, H., Günver, F., & Kirmacia, V. (2018). Experimental investigation of thermal performance of parallel connected vortex tubes with various nozzle materials. *Applied Thermal Engineering, 136*, 287–292.

Kirmaci, V., & Kaya, H. (2018). Effects of working fluid nozzle number nozzle material and connection type on thermal performance of a RanqueHilsch vortex tube: A review. *International Journal of Refrigeration, 91*, 254-266.

Kirmaci, V., Kaya, H., & Cebeci, I. (2018). An experimental and exergy analysis of a thermal performance of a counter flow Ranque-Hilsch vortex tube with different nozzle materials. *International Journal of Refrigeration, 85*, 240-254.

Kumar, A., Vivekanand, & Subudhi, S. (2017). Cooling and dehumidification using vortex tube. *Applied Thermal Engineering, 122*, 181-193.

Lin, S., Chen, J., & Vatistas, G.H. (1990). A heat transfer relation for swirl flow in a vortex tube. *The Canadian Journal of Chemical Engineering, 68*(6), 944-947.

Onal, G., & Dincer, K. (2013). Experimental study of performance of a counter flow Ranque- Hilsch Vortex tube with inner threaded body. *World academic of science, Engineering and technology, 7*(8), 631-633.

Pourmahmoud, N., Esmaily, R., & Hassanzadeh, A. (2015). Experimental investigation of diameter of cold end orifice effect in vortex tube. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 29*(3), 629-632.

Pelmar engineering. (2019). *Personal Air Cooler-Personal Air Conditioners-Personal Cooling Vests*. Retrieved February 1, 2019, from https://www.pelmareng .com/personal_cooling/

Polihronov, J.G., & Straatman, A.G. (2015). The Maximum COP of Vortex Tubes. *Canadian Journal of Physics, 99*, 1-4.

Promvonge, P., & Eiamsa-ard, S. (2005). Investigation on the vortex thermal separation in a vortex tube refrigerator. *Science Asia, 31*, 215-223.

Rattanongphisat, W., Riffat, S.B., & Gan, G. (2008). Thermal separation flow characteristic in a vortex tube: CFD model. *International Journal of Low-Carbon Technologies, 3*(4), 282-295.

Rafiee, S.E., & Sadeghiazad, M.M. (2014). Effect of Conical Valve Angle on Cold-Exit Temperature of Vortex Tube. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 28*, 785-794.

Rattanongphisat, W., & Jansawang, S. (2018). The effect of vortex generator materials and L/D ratios on performance of stainless vortex tube. *Journal of Physics: Conference Series, 1144*, 1-4.

Reddy, B. (2013). Air cooling in automobiles using vortex tube refrigeration system. *International journal of engineering science and technology, 5*, 341-348.

Rennels, D.C., & Hudson, H.M. (2012). *Pipe flow: a practical and comprehensive guide*. Canada: John Wiley & Sons.

Scheper, G.W. (1951). The vortex tube; internal flow data and a heat transfer theory. *Journal of the ASRE, Refrigeration Engineering, 59*, 985-989.

Stephan, K., Lin, S., Durst, M., Huang, F., & Seher, D. (1984). A similarity relation for energy separation in a vortex tube. *International Journal of Heat and Mass Transfer, 27*(6), 911-920.

Stephan, K., Lin, S., Durst, M., Huang, F., & Seher, D. (1983). An investigation of energy separation in a vortex tube. *International Journal of Heat and Mass Transfer, 26*(3), 341-348.

Saidi, M., & Valipour M. (2003). Experimental modeling of vortex tube refrigerator. *Applied Thermal Engineering, 23*, 1971-1980.

Torrella, E., Patiño, J., Sánchez, D., Llopis, R., & Cabello, R. (2013). Experimental evaluation of the energy performance of an air vortex tube when the inlet parameters are varied. *The Open Mechanical Engineering Journal, 7*, 98-107.

VorTech. (2019). *Vortex Enclosure Coolers*. Retrieved January 5, 2019, from https://www.vortextube.co.uk/enclosure-coolers

Veretennikov, S.V., Piralishvili, Sh.A, Evdokimov, O.A., & Guryanov, A.I. (2018). Heat transfer simulation of unsteady swirling flow in a vortex tube. *Journal of Physics: Conference Series, 980*, 1-6.

Wisnoe, W., Ismail, N., Remeli, M.F., & Zakaria, M.F. (2013). Experimental investigation on the effect of conical valve shape and swirl generator to the performance of Ranque- Hilsch Vortex Tube. *IEEE Business Engineering and Industrial Applications Colloquium 2013*, 812-817.

Wisnoe, W., Rahman, K.M.A., Istihat, Y., & Natarajan, V.D. (2017). The Effect of Orifice Diameter to the Acoustic Signals Captured at the Cold Part of a Ranque-Hilsch Vortex Tube. *MATEC Web of Conferences, 95*, 1-6.

Xue, Y., Arjomandi, M., & Kelso, R.M. (2010). A critical review of temperature separation in a vortex tube. *Experimental Thermal and Fluid Science, 34*(8), 1367-1374.

Yilmaz, M., Kaya, M., Karagoz, S., & Erdogan, S. (2009). A review on design criteria for vortex tubes. *Heat Mass Transfer, 45*, 613-632.

Zhai, X. (2017). Research on the application of vortex tube type of cooling jacket in coal mine. *AIP Conference Proceedings, 1864*, 1-6.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก ชุดสำหรับชุดทดสอบท่อวอร์เท็กซ์ที่ทำจากสแตนเลสและทองเหลือง ที่ติดตั้งต้นกำเนิดกระแสหมุนวนพลาสติก ทดสอบที่ความดันอากาศ 3 bar

ตาราง 5 ผลการบันทึกข้อมูลอุณหภูมิด้วยเครื่องบันทึกข้อมูลสำหรับชุดทดสอบท่อวอร์เท็กซ์ที่ทำจากสแตนเลสและทองเหลือง ที่ติดตั้งต้นกำเนิดกระแสหมุนวนพลาสติก ทดสอบที่ความดันอากาศ 3 bar

เวลา (นาที)	อุณหภูมิอากาศของท่อวอร์เท็กซ์สแตนเลส (°C)			อุณหภูมิอากาศท่อวอร์เท็กซ์ทองเหลือง (°C)		
	ทางเข้าท่อ	ปลายท่อเย็น	ปลายท่อร้อน	ทางเข้าท่อ	ปลายท่อเย็น	**ปลายท่อร้อน**
	ที่สัดส่วนมวลอากาศเย็น 0.82			ที่สัดส่วนมวลอากาศเย็น 0.83		
0	27.1	27.2	27.3	27.7	27.5	27.9
1	26.9	18.7	27.5	28.5	21.1	38
2	27.1	18.8	38.0	29.8	22.2	43.3
3	27.5	19.1	43.7	31.3	23.1	47.1
4	27.8	19.2	47.3	32.4	24.2	50.1
5	28.2	19.6	49.5	33.4	25.2	52.6
6	28.5	19.8	50.7	33.9	25.5	54.8
7	29.0	20.3	52.6	34.2	26	56.3
8	29.2	20.4	54.0	34.3	26.4	57.6
9	29.4	20.8	54.7	34.2	26.2	58.6
10	29.6	20.9	55.2	34	26.2	59.2
	ที่สัดส่วนมวลอากาศเย็น 0.80			ที่สัดส่วนมวลอากาศเย็น 0.80		
0	27.6	27.8	27.9	28.5	30.6	28.7
1	27.9	19.2	42.2	29.8	21.3	45.8

ตาราง 5 (ต่อ)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิอากาศของท่อวอร์เท็กซ์สแตนเลส (°C)			อุณหภูมิอากาศท่อวอร์เท็กซ์ทองเหลือง (°C)		
	ทางเข้าท่อ	ปลายท่อเย็น	ปลายท่อร้อน	ทางเข้าท่อ	ปลายท่อเย็น	ปลายท่อร้อน
2	28.3	19.2	47.4	30.3	21.5	51
3	28.8	19.5	50.5	30.9	21.9	54.2
4	29.1	19.6	52.3	31.4	22	56.6
5	29.5	20	54.2	31.7	22.5	58.3
6	29.6	20.1	55.1	32.1	22.8	59.6
7	29.9	20.5	56	32.5	23.1	60.8
8	30.1	20.5	56.8	32.8	23.5	61.3
9	30.1	20.5	57.1	33.3	23.8	62.2
10	30.2	20.7	57.5	33.5	24.2	62.8
	ที่สัดส่วนมวลอากาศเย็น 0.75			ที่สัดส่วนมวลอากาศเย็น 0.75		
0	28.1	28.5	28.7	29.3	30.7	29.3
1	28.8	27.5	29.2	29.7	19.4	31.3
2	28.4	18.4	46.3	30.4	19.3	48.0
3	28.8	18.3	50.7	31.6	20.1	53.4
4	29.1	18.2	52.7	32.3	20.9	56.3
5	29.2	18.7	54.0	32.9	21.4	58.7
6	29.2	18.7	55.2	33.3	21.5	60.4
7	29.4	19.0	55.7	33.5	21.8	61.7

ตาราง 5 (ต่อ)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิอากาศของท่อวอร์เท็กซ์สแตนเลส (°C)			อุณหภูมิอากาศท่อวอร์เท็กซ์ทองเหลือง (°C)		
	ทางเข้าท่อ	ปลายท่อเย็น	ปลายท่อร้อน	ทางเข้าท่อ	ปลายท่อเย็น	ปลายท่อร้อน
8	29.6	18.9	56.3	33.6	22.0	62.7
9	29.7	19.1	56.5	33.9	22.1	63.6
10	29.8	18.9	56.7	34.3	22.6	64.3
	ที่สัดส่วนมวลอากาศเย็น 0.70			ที่สัดส่วนมวลอากาศเย็น 0.70		
0	28.6	28.3	29.1	30.1	31.4	30.2
1	28.7	18.9	31.6	31.3	18.1	51.2
2	29.1	17.4	45.8	32.1	18.4	56
3	29.5	17.3	49.8	33	18.8	59
4	30.0	17.6	51.8	33.6	19	60.9
5	30.4	17.9	53.3	33.9	19.2	62.4
6	30.9	18.2	54.4	34.1	19.8	63.4
7	31.1	18.4	55.2	34.3	19.8	63.9
8	31.3	18.7	55.7	34.5	20.1	64.4
9	31.5	18.8	56.2	34.6	20.3	64.7
10	31.7	18.9	56.5	34.7	20.3	65
	ที่สัดส่วนมวลอากาศเย็น 0.65			ที่สัดส่วนมวลอากาศเย็น 0.65		
0	28.9	29.0	27.5	30.4	31.4	30.6
1	30.1	26.8	28.0	30.6	19.9	32.6
2	29.5	16.2	46.4	31.5	20.0	49.4

ตาราง 5 (ต่อ)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิอากาศของท่อวอร์เท็กซ์สแตนเลส (°C)			อุณหภูมิอากาศท่อวอร์เท็กซ์ทองเหลือง (°C)		
	ทางเข้าท่อ	ปลายท่อเย็น	ปลายท่อร้อน	ทางเข้าท่อ	ปลายท่อเย็น	ปลายท่อร้อน
3	29.9	16.1	50.0	32.3	16.4	56.3
4	30.4	16.1	51.6	33.2	17.2	58.3
5	30.6	16.3	52.6	33.9	17.4	59.8
6	30.9	16.4	53.4	34.3	18.3	61.0
7	31.1	16.5	54.0	34.7	18.5	61.9
8	31.4	16.9	54.2	35.1	18.6	62.5
9	31.6	17.1	54.5	35.2	18.8	62.9
10	31.7	17.3	54.8	35.3	19.2	63.2
	ที่สัดส่วนมวลอากาศเย็น 0.60			ที่สัดส่วนมวลอากาศเย็น 0.60		
0	29.3	28.7	29.8	30.7	31.4	30.4
1	30.2	18.3	31.4	31.0	17.8	33.3
2	30.1	15.1	47.2	32.0	14.6	52.2
3	30.5	14.8	49.9	32.9	15.0	56.2
4	31.0	14.9	51.3	33.6	15.1	58.3
5	31.3	15.1	52.1	34.4	16.0	60.0
6	31.7	15.4	52.8	34.8	16.0	60.9
7	31.7	15.5	53.2	34.9	16.7	61.8
8	31.8	15.5	53.4	34.9	16.6	62.2

ตาราง 5 (ต่อ)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิอากาศของท่อวอร์เท็กซ์สแตนเลส (°C)			อุณหภูมิอากาศท่อวอร์เท็กซ์ทองเหลือง (°C)		
	ทางเข้าท่อ	ปลายท่อเย็น	ปลายท่อร้อน	ทางเข้าท่อ	ปลายท่อเย็น	ปลายท่อร้อน
9	32.0	15.9	53.4	34.9	16.9	62.5
10	32.0	16.2	53.4	34.9	16.7	62.5
	ที่สัดส่วนมวลอากาศเย็น 0.55			ที่สัดส่วนมวลอากาศเย็น 0.55		
0	29.6	28.4	29.1	31	31.3	30.7
1	29.9	16.3	31.4	31.5	12.5	50.8
2	30.1	13.2	46.4	32.1	12.4	54
3	30.3	13.0	48.5	32.7	12.6	56
4	30.7	13.1	49.5	33.3	12.6	57.2
5	31.1	13.3	50.1	33.7	13.4	58.1
6	31.2	13.3	50.5	33.9	13.6	58.5
7	31.4	13.9	50.8	34	13.9	58.9
8	31.4	13.9	50.9	34.2	14.1	59
9	31.4	14.0	50.9	34.3	14.3	59.4
10	31.5	14.3	50.7	34.3	14.3	59.5
	ที่สัดส่วนมวลอากาศเย็น 0.50			ที่สัดส่วนมวลอากาศเย็น 0.50		
0	29.8	28.5	29.8	31.3	31	31.3
1	30.8	17.4	31.7	31.7	11.1	49.2
2	29.9	12.2	44.9	32.2	10.9	51.4
3	30.2	11.7	45.8	32.7	10.9	52.6

ตาราง 5 (ต่อ)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิอากาศของท่อวอร์เท็กซ์สแตนเลส (°C)			อุณหภูมิอากาศท่อวอร์เท็กซ์ทองเหลือง (°C)		
	ทางเข้าท่อ	ปลายท่อเย็น	ปลายท่อร้อน	ทางเข้าท่อ	ปลายท่อเย็น	ปลายท่อร้อน
4	30.5	11.7	46.4	33.1	11.5	53.4
5	30.9	12.1	46.8	33.4	11.9	54
6	31.2	12.4	47.2	33.6	12.2	54.2
7	31.4	12.6	47.2	33.7	12.6	54.2
8	31.4	13.0	47.3	33.8	12.7	54.4
9	31.6	13.3	47.3	33.7	12.6	54.4
10	31.7	13.5	47.2	33.7	12.6	54.6
	ที่สัดส่วนมวลอากาศเย็น 0.45			ที่สัดส่วนมวลอากาศเย็น 0.46		
0	29.7	29	29.5	31.3	31	31.1
1	29.2	10.2	41.7	31.2	10.4	46.7
2	28.9	9.3	42.4	31.5	9.9	48.1
3	28.7	8.7	42.7	32	9.8	48.9
4	28.1	8.3	42.2	32.3	10.4	49.5
5	27.7	8.1	41.8	32.6	10.7	49.8
6	27.3	7.8	41.7	32.8	10.9	49.9
7	26.9	7.7	41.1	32.9	11.4	50
8	26.6	7.3	40.7	32.9	11.2	50
9	26.2	7	40.3	32.9	11.4	50.2
10	25.8	6.5	40.1	32.9	11.3	50.2

ตาราง 6 ผลการบันทึกและการคำนวณผลเมื่อความแตกต่างอุณหภูมิคงที่ ณ เวลา 10 นาที ของชุดทดสอบท่อวอร์เท็กซ์ที่ทำจากสแตนเลส

สัดส่วนมวลอากาศเย็น	ΔT_c	ΔT_h	ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิก (η)	ความสามารถการทำความเย็น (W)	COP
0.82	9	26	0.11	36	0.08
0.80	10	27	0.12	39	0.08
0.75	11	27	0.14	43	0.09
0.70	13	25	0.16	49	0.10
0.65	14	23	0.18	52	0.10
0.60	16	21	0.19	55	0.10
0.55	17	19	0.21	58	0.10
0.50	18	16	0.22	57	0.10
0.45	19	14	0.24	54	0.10

ตาราง 7 ผลการบันทึกและการคำนวณผลเมื่อความแตกต่างอุณหภูมิคงที่ ณ เวลา 10 นาที ของชุดทดสอบท่อวอร์เท็กซ์ที่ทำจากทองเหลือง

สัดส่วนมวลอากาศเย็น	ΔT_c	ΔT_h	ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิก (η)	ความสามารถการทำความเย็น (W)	COP
0.83	8	25	0.10	35	0.10
0.80	10	29	0.12	41	0.10
0.75	12	30	0.14	49	0.10
0.70	14	30	0.17	58	0.11
0.65	16	28	0.20	63	0.11
0.60	18	28	0.22	68	0.12
0.55	20	25	0.24	71	0.12
0.50	21	21	0.26	70	0.12
0.46	22	17	0.26	66	0.11