# การลดอุณหภูมิในตู้ทดลองที่มีโหลดความร้อนด้วยอากาศเย็นจากท่อวอร์เท็กซ์

# The Reduction of Temperature in a Chamber with Heat Load using Cold Air from a Vortex Tube

สินีพร จันทร์สว่าง และ วราภรณ์ รัตตนงพิสัตย์*

Sineeporn Jansawang and Waraporn Rattanongphisat*

*ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร*

*Department of Physics, Faculty of Science*

Received : 12 June 2017

Accepted : 4 September 2017

Published online : 13 September 2017

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการลดอุณหภูมิในตู้ทดลองที่มีโหลดความร้อนของอุปกรณ์ไฟฟ้าด้วยอากาศเย็นจากท่อวอร์เท็กซ์ โดยตู้ทดลองมีขนาดกว้าง 30 cm สูง 41 cm และลึก 30 cm ทำการวิเคราะห์ความสามารถการทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ พบว่ามีค่าความสามารถการทำความเย็นสูงสุด 70 W และความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็น 27°C ที่ความดันอากาศขาเข้า 3 bar จากการทดลองเมื่ออุปกรณ์ไฟฟ้าทำงานทำให้เกิดความร้อนภายในตู้ทดลอง พบว่าภายในตู้ทดลองมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสูงขึ้น 1.1°C/นาที โดยอากาศเย็นจากท่อวอร์เท็กซ์สามารถลดการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิลงได้เป็น 0.6°C/นาที ขณะมีอุปกรณ์ไฟฟ้าทำงาน แสดงให้เห็นว่าท่อวอร์เท็กซ์สามารถลดความร้อนภายในตู้ทดลองได้

**คำสำคัญ** : ท่อวอร์เท็กซ์ ความสามารถการทำความเย็น ความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็น

**Abstract**

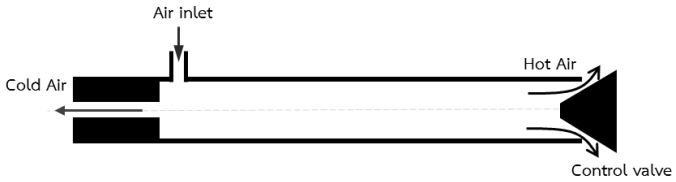
This research aims to study the reduction of temperature in a chamber by a cold air from a vortex tube. An electrical appliance as a heat load is inside the chamber. The testing chamber dimension is 30 cm width, 41 cm height and 30 cm depth. The analysis on the cooling capacity of vortex tube show its cooling capacity of 70 W and the cooling temperature difference of 27°C at the inlet compressed air of 3 bar. The electrical appliance generated heat when operate in the test chamber cause the temperature increase rate of 1.1°C/min. The use of cold air produced by a vortex tube could reduce the chamber temperature by 0.6°C/min. This imply that the vortex tube can deduct heat in the chamber.

**Keywords** : vortex tube, cooling capacity, cold air temperature drop

*Corresponding author. E-mail : waraporn@nu.ac.th

**บทนำ**

ท่อวอร์เท็กซ์ หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าท่อแรงคิว ฮีล-วอร์เท็กซ์ เป็นอุปกรณ์ผลิตอากาศร้อนและอากาศเย็นได้ในเวลาเดียวกัน มีลักษณะเป็นท่อคล้ายรูปตัวที แบ่งออกเป็น 3 ด้าน คือทางเข้าอากาศ ทางออกอากาศเย็นและทางออกอากาศร้อน ทำงานโดยใช้ของไหลที่มีความดันสูงป้อนเข้าไปในท่อ บริเวณลำท่อเกิดการแยกชั้นพลังงานทำให้เกิดบริเวณอุณหภูมิสูงและต่ำแยกออกจากกัน จากนั้นของไหลจะถูกปล่อยไปที่ปลายทั้งสองด้าน แสดงดังภาพที่ 1




***ภาพที่ 1*** ลักษณะรูปร่างและการทำงานของท่อวอร์เท็กซ์

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามีนักวิจัยหลายท่านสนใจศึกษาการทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ (Saidi & Valipour, 2003) ได้สร้างแบบจำลองศึกษาพฤติกรรมการทำงานของท่อวอร์เท็กซ์ พบว่าความดันอากาศทางเข้า และสัดส่วนมวลอากาศเย็น เป็นตัวแปรสำคัญมีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิปลายท่อเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ (Dincer *et al*., 2008) ได้ศึกษาจำนวนของนอสเซิลที่ติดตั้งบริเวณทางเข้าท่อวอร์เท็กซ์ ศึกษาที่นอสเซิลขนาด 2 4 และ 6 นอสเซิล พบว่าเมื่อติดตั้ง 4 นอสเซิลขึ้นไป ท่อวอร์เท็กซ์จะมีประสิทธิภาพดี นั้นแสดงว่าจำนวนนอสเซิลมีผลต่อการแยกชั้นและการไหลของอากาศภายในท่อ (El-Soghiar *et al*., 2014) ได้ศึกษาผลของความดันอากาศที่มีต่อความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ ทดสอบความดันตั้งแต่ 0.5 บาร์ ถึง 3 บาร์ พบว่าที่ความดัน 3 บาร์ ทำให้อุณหภูมิความแตกต่างระหว่างอากาศทางเข้ากับอากาศเย็นและประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกของท่อวอร์เท็กซ์มีค่าสูงกว่าความดันอื่นด้วยค่าเท่ากับ 45°C และ 0.07 ตามลำดับ นั่นแสดงว่าความดันมีผลต่อการลดอุณหภูมิปลายท่อเย็น (Rattanongphisat & Thungthong, 2014) ได้ศึกษาการเพิ่มความสามารถการทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์โดยการติดตั้งเทอร์โมอิเล็กตริกโมดูลบริเวณผิวท่อ เพื่อลดอุณหภูมิผิวท่อร้อนโดยเปรียบเทียบการทดลองระหว่างไม่ติดตั้งกับที่ติดตั้งเทอร์โมอิเล็กตริกโมดูล พบว่าเมื่อติดตั้งเทอร์โมอิเล็กตริกโมดูลช่วยเพิ่มความสามารถการทำความเย็นและเพิ่มประสิทธิภาพการทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ 4.3% และ 9.6% ตามลำดับ และจากงานวิจัยก่อนหน้าของ (Jansawang & Rattanongphisat, 2016) ที่ศึกษาประสิทธิภาพการทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ในตู้ทดลอง ทดสอบโดยใช้อากาศที่ความดัน 3 บาร์ และแปรค่าสัดส่วนมวลอากาศตั้งแต่ 0.28 ถึง 1 พบว่าที่ค่าสัดส่วนมวลอากาศเย็นเท่ากับ 0.55 มีค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศทางเข้ากับอุณหภูมิอากาศเย็นเท่ากับ 27°C และค่าประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกสูงที่สุดเท่ากับ 0.33 นอกจากนั้นได้มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์มาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ โดย (Reddy *et al.,* 2013) นำท่อวอร์เท็กซ์มาติดตั้งกับห้องโดยสารรถยนต์ พบว่าระบบความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์สามารถลดอุณหภูมิภายในห้องโดยสารได้

จากงานวิจัยที่ผ่านมาข้างต้นได้ศึกษาประสิทธิภาพการทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ที่เงื่อนไขการทำงานต่างกันตามแต่วัตถุประสงค์ในการใช้งาน คณะผู้วิจัยมีความสนใจศึกษาการนำความเย็นจากท่อวอร์เท็กซ์มาลดความร้อนขณะที่มีความร้อนจากอุปกรณ์ไฟฟ้าติดตั้งภายในตู้ทดลองขนาด 0.00369 $m^3$ ด้วยเงื่อนไขการทดสอบความเย็นจากท่อวอร์เท็กซ์ที่ทำงาน ณ ความดันอากาศ 3 บาร์ และสัดส่วนมวลอากาศเย็นเท่ากับ 0.55 จากผลการทดสอบที่ให้ค่าความเย็นสูงภายใต้เงื่อนไขการศึกษาที่ผ่านมาของคณะผู้วิจัย ทั้งนี้เพื่อศึกษาการลดอุณหภูมิภายในตู้ทดลองด้วยอากาศเย็นจากท่อวอร์เท็กซ์

**วิธีดำเนินการ**

1. ข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาได้มีการออกแบบตู้ทดลองให้มีขนาดปริมาตรภายใน $3.69 \times 10^{-2}$ $m^3$ ขนาดกว้าง 30 cm สูง 41 cm และลึก 30 cm ท่อวอร์เท็กซ์ที่นำมาศึกษามีรายละเอียดดังตารางที่ 1

***ตารางที่ 1*** รายละเอียดท่อวอร์เท็กซ์

| ลักษณะของท่อวอร์เท็กซ์ | ขนาด |
|---|---|
| ความยาวท่อ | 90 mm |
| เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ | 10 mm |
| เส้นผ่านศูนย์กลางปลายท่อเย็น | 9.2 mm |
| เส้นผ่านศูนย์กลางปลายท่อร้อน | 7 mm |
| อัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ | 9 |
| เส้นผ่านศูนย์กลางนอสเซิลทางเข้าท่อ | 4.8 mm |
| จำนวนนอสเซิลทางเข้าท่อ | 6 |
| ความหนาของท่อ | 1 mm |

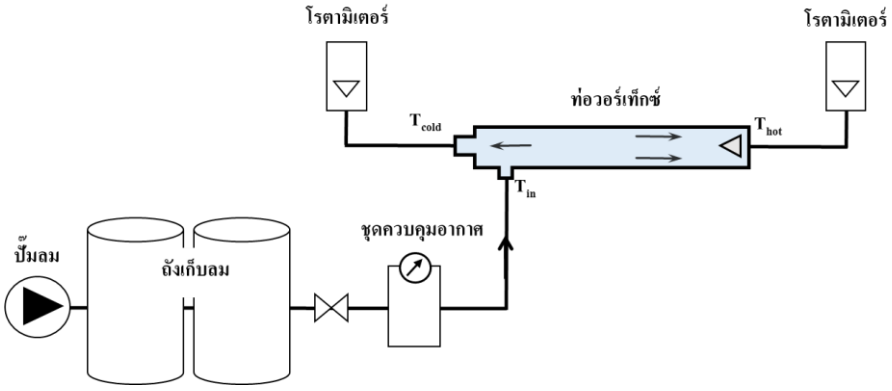
ในการศึกษาความสามารถในการทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ ได้ศึกษาเกี่ยวกับสัดส่วนมวลอากาศเย็น (Cold mass fraction) ของท่อวอร์เท็กซ์ ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญต่อการทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ สามารถคำนวณได้จากสมการ (1)

$$CF = \frac{m_c}{m_{in}} \tag{1}$$

เมื่อ CF คือสัดส่วนมวลอากาศเย็น $m_c$ คืออัตราการไหลมวลอากาศเย็น (kg/s) และ $m_{in}$ คืออัตราการไหลของมวลอากาศทางเข้าท่อ (kg/s) โดย $0 \leq CF \leq 1$

ระบบทดสอบอัตราการไหลของอากาศแสดงดังภาพที่ 2 โดยในงานวิจัยชิ้นนี้มีอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบประกอบไปด้วย ท่อวอร์เท็กซ์ ปั๊มลม ถังเก็บลม ชุดควบคุมอากาศ โรตามิเตอร์ เครื่องบันทึกข้อมูล หัววัดอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิ้ล ชนิดเค อุปกรณ์ไฟฟ้าหรืออุปกรณ์ให้ความร้อน ตู้ทดลอง และสายยางสำหรับลมอัด ขั้นตอนการทำงานเริ่มจากปั๊มลมทำการอัดอากาศไปเก็บไว้ในถังเก็บลม ดังรูปที่ 2 ทำการเปิดวาล์วท่อลมอัดเพื่อทำการทดลอง อากาศอัดที่

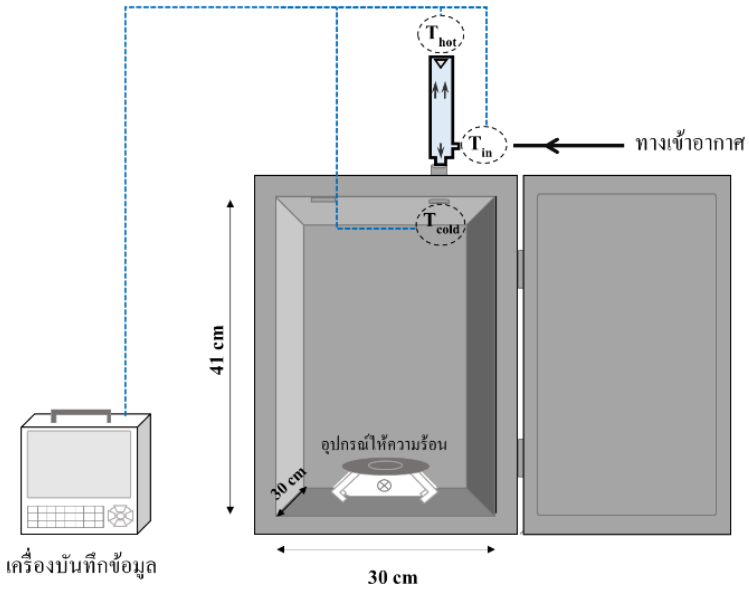
ปล่อยออกจากถังเก็บลม สามารถปรับความดันอากาศได้ด้วยชุดควบคุมอากาศ ทำหน้าที่กรองอากาศและปรับความดันอากาศให้คงที่ จากนั้นอากาศอัดจะส่งไปยังท่อวอร์เท็กซ์ ภายในท่อวอร์เท็กซ์จะเกิดการแยกชั้นอุณหภูมิอากาศร้อนและอากาศเย็นออกจากกัน กระแสอากาศร้อนไหลออกปลายท่อด้านหนึ่งและกระแสอากาศเย็นไหลออกจากปลายท่ออีกด้านหนึ่ง ปลายท่อทั้ง 2 ด้านต่อเข้ากับโรตามิเตอร์ทำหน้าที่วัดอัตราการไหลของอากาศ และสามารถปรับอัตราการไหลของอากาศของท่อวอร์เท็กซ์ได้จากการหมุนวาล์วบริเวณปลายท่อร้อน แล้วจึงนำอัตราการไหลของอากาศแต่ละด้านมาคำนวณหาสัดส่วนมวลอากาศเย็นตามสมการที่ 1




***ภาพที่ 2*** การติดตั้งการทดสอบอัตราการไหลอากาศของท่อวอร์เท็กซ์

2.การทดสอบการลดอุณหภูมิในตู้ทดลองที่มีโหลดความร้อนด้วยอากาศเย็นจากท่อวอร์เท็กซ์

หลังจากทำการทดสอบระบบดังภาพที่ 2 ได้นำปลายท่อเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ติดตั้งบริเวณผนังด้านบนของตู้ทดลอง ติดตั้งหัววัดอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิ้ล ชนิดเค ภายในตู้ทดลองและติดตั้งหัววัดอุณหภูมิกับปลายท่อวอร์เท็กซ์ทั้ง 3 ด้าน ได้แก่ ปลายท่อทางเข้าอากาศ($T_{in}$) ปลายท่อทางออกอากาศเย็น($T_{cold}$) และปลายท่อทางออกอากาศร้อน($T_{hot}$) โดยที่หัววัดอุณหภูมิจะถูกต่อเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ เพื่อบันทึกข้อมูลขณะทำการทดลองและนำไปวิเคราะห์ผล โดยทำการทดสอบความสามารถการทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ที่ความดันอากาศ 3 บาร์ และหลังจากนั้นจะทำการทดสอบการลดอุณหภูมิในตู้ทดลองที่มีโหลดความร้อนจากอุปกรณ์ไฟฟ้า 65 W ด้วยอากาศเย็นจากท่อวอร์เท็กซ์ โดยทดสอบที่ค่าสัดส่วนมวลอากาศเย็นที่มีค่าความสามารถการทำความเย็นดีที่สุด แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบดังภาพที่ 3




***ภาพที่ 3*** อุปกรณ์ทดสอบการลดอุณหภูมิในตู้ทดลองที่มีความร้อนจากอุปกรณ์ไฟฟ้าด้วยอากาศเย็นของท่อวอร์เท็กซ์

การประเมินประสิทธิภาพการทำงานของท่อวอร์เทกซ์พิจารณาจากประสิทธิภาพไอเซนโทรปิกและสมการความสามารถการทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ โดยที่ประสิทธิภาพไอเซนโทรปิก (Isentropic efficiency) (Saidi & Valipour, 2003) คำนวณได้จากสมการ

$$\eta_{is}=\frac{\Delta T_{cold}}{\Delta T_{is}}=\frac{T_{in}-T_{cold}}{T_{in}\left[1-\left(\frac{P_{atm}}{P_{in}}\right)^{(k-1)/k}\right]} \quad (2)$$

เมื่อ $\Delta T_{cold}$ คือความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็นหรือความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศทางเข้ากับอากาศเย็น (K) $\Delta T_{is}$ คือความแตกต่างอุณหภูมิไอเซนโทรปิก (K) $P_{atm}$คือความดันบรรยากาศ (บาร์) $P_{in}$คือความดันอากาศทางเข้าท่อ (บาร์) และ k คืออัตราส่วนความร้อนจำเพาะของอากาศ

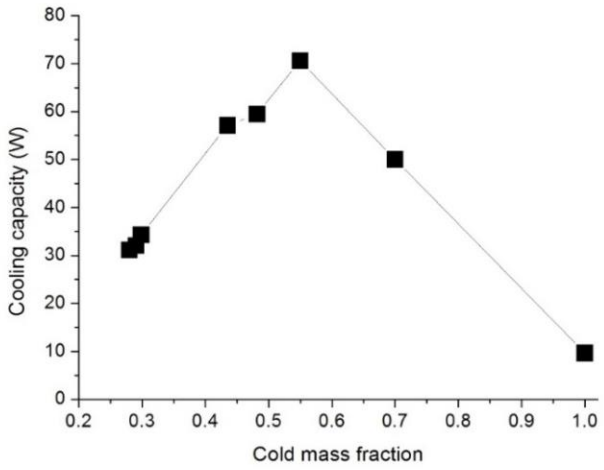
ความสามารถการทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ (Cooling capacity) สามารถคำนวณจาก

$$Q_c=m_c c_p \Delta T_{cold} \quad (3)$$

เมื่อ $Q_c$ คือความสามารถการทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ (W) $m_c$ คืออัตราการไหลของมวลอากาศเย็น (kg/s) $C_p$ คือค่าความจุความร้อนที่ความดันอากาศคงที่ และ$\Delta T_{cold}$ คือความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศทางเข้ากับอากาศเย็น (K)

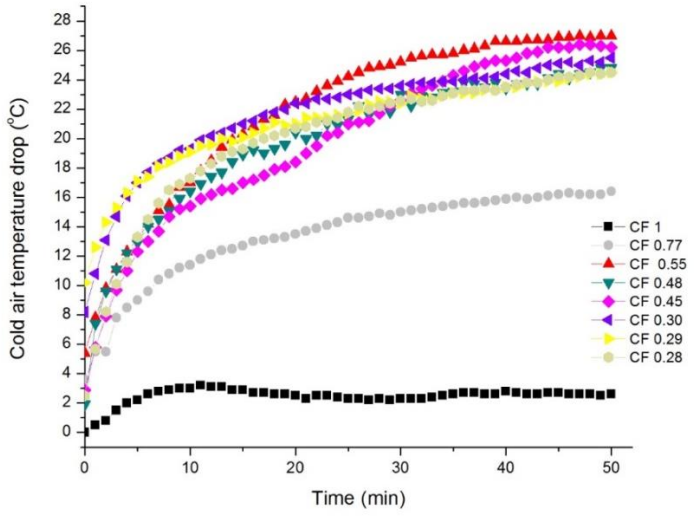
**ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล**

จากรายงานวิจัยที่ผ่านมา (Jansawang & Rattanongphisat, 2016) เมื่อทดสอบท่อวอร์เท็กซ์ที่ความดันอากาศ 3 บาร์ ด้วยค่าสัดส่วนมวลอากาศเย็นตั้งแต่ 0.28 ถึง 1 นั้น พบว่าค่าสัดส่วนมวลอากาศเย็นที่ 0.55 ให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 0.33 ดังสมการที่ 2 นอกจากนั้นยังให้ค่าการทำความเย็นมากสุด ณ ความดันอากาศอัดที่ใช้ในการทดสอบ 3 bar เมื่อนำมาทดสอบให้ความเย็นกับตู้ทดลองขณะไม่มีโหลดความร้อนจะได้ผลการทดลองดังภาพที่ 4



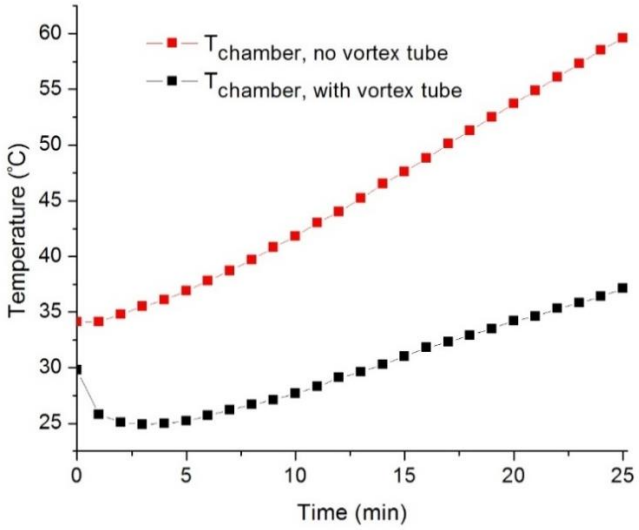

***ภาพที่ 4*** ความสามารถการทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ในตู้ทดลอง ที่ความดัน 3 บาร์

ภาพที่ 4 ความสามารถการทำความเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ขณะที่ไม่มีความร้อนจากอุปกรณ์ไฟฟ้า สามารถคำนวณจากสมการ (3) ซึ่งมีผลขึ้นอยู่กับความแตกต่างอุณหภูมิอากาศยื่นและสัดส่วนมวลอากาศเย็น ผลการทดลองพบว่าท่อวอร์เท็กซ์มีความสามารถการทำความเย็นระหว่าง 9 W และ 70 W โดยเมื่อปรับค่าสัดส่วนมวลอากาศเย็นเท่ากับ 0.55 จะให้ความสามารถการทำความเย็นสูงสุด




***ภาพที่ 5*** ความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็นของท่อวอร์เท็กซ์กับเวลา

ภาพที่ 5 แสดงแนวโน้มความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็นของท่อวอร์เท็กซ์ หรือความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิอากาศทางเข้ากับอากาศเย็นกับเวลาที่ใช้ในการทดสอบ ขณะที่ไม่มีความร้อนจากอุปกรณ์ไฟฟ้า พบว่าในช่วงเวลา 10 นาทีเริ่มต้น ค่าความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วมากสุดถึง 14.5°C เนื่องจากกระบวนการแยกชั้นพลังงานภายในท่อวอร์เทกซ์ จากนั้นความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็นเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 25 นาที จะเห็นได้ว่าที่ค่าสัดส่วนมวลอากาศเย็น (Cold mass fraction; CF) เท่ากับ 0.55 ความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็นมีค่าสูงสุดเท่ากับ 27°C นั่นแสดงว่าท่อวอร์เท็กซ์สามารถให้อุณหภูมิอากาศเย็นได้ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับค่าสัดส่วนมวลอากาศเย็นอื่น ดังนั้นจึงนำเงื่อนไขการทดสอบค่าสัดส่วนมวลอากาศเย็นเท่ากับ 0.55 นี้ไปใช้ในการศึกษาการลดความร้อนเมื่อมีอุปกรณ์ไฟฟ้าทำงานในตู้ทดลองดังผลการทดลองแสดงตามภาพที่ 6




***ภาพที่ 6*** อุณหภูมิภายในตู้ทดลองที่มีอุปกรณ์ไฟฟ้าทำงานขณะที่มีและไม่มีอากาศเย็นจากท่อวอร์เท็กซ์

จากภาพที่ 6 แสดงถึงอุณหภูมิภายในตู้ทดลองเทียบกับเวลา ขณะที่มีความร้อนจากอุปกรณ์ไฟฟ้าขนาด 65 W พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในตู้ทดลองมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องภายใน 25 นาที อุณหภูมิเพิ่มจาก 34°C เป็น 60°C คิดเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1.1°C/นาที และขณะที่มีโหลดความร้อนจากอุปกรณ์ไฟฟ้าและท่อวอร์เท็กซ์ให้อากาศเย็นทำงานไปพร้อมกัน พบว่าอุณหภูมิเริ่มต้น 30°C ช่วงเวลา 3 นาทีแรก อุณหภูมิเฉลี่ยภายในตู้ทดลองลดลง 5.0°C หลังจากนั้นจึงเพิ่มขึ้นคิดเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ 0.6°C/นาที จะเห็นได้ว่าท่อวอร์เท็กซ์มีความสามารถการทำความเย็นที่ 70 W อุปกรณ์ให้ความร้อนขนาด 65 W มีการสะสมความร้อนภายในตู้ทดลอง และมีการสูญเสียความเย็นจากท่อวอร์เทกซ์ ทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยภายในตู้ยังคงมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ด้วยอัตราที่ช้าลง จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าอากาศเย็นจากท่อวอร์เท็กซ์ในตู้ทดลองที่มีความร้อนเกิดจากอุปกรณ์ไฟฟ้าสามารถลดการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในตู้ทดลองให้มีค่าช้าลงได้ ทั้งนี้แสดงให้เห็นว่าท่อวอร์เทกซ์สามารถลดความร้อนภายในตู้ทดลองได้ แต่อย่างไรก็ตามควรเลือกใช้งานกับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีขนาดเหมาะสมกับท่อวอร์เท็กซ์ เพื่อประสิทธิผลการทำความเย็นที่ดีต่อไป

## สรุปผลการวิจัย

การลดอุณหภูมิในตู้ทดลองที่มีอุปกรณ์ไฟฟ้าทำงานและเกิดความร้อนภายในตู้ทำได้โดยใช้อากาศเย็นจากท่อวอร์เท็กซ์ ทั้งนี้ได้เลือกเงื่อนไขการทำงานท่อวอร์เทกซ์ที่ให้ประสิทธิภาพที่ดีจากผลงานวิจัยก่อนหน้ามาทำการทดสอบที่อากาศความดัน 3 บาร์ สัดส่วนมวลอากาศเย็น 0.55 พบว่ามีค่าความสามารถการทำความเย็นดีสุดที่ 70 W และค่าความแตกต่างอุณหภูมิอากาศเย็นสูงสุด 27°C คือให้อากาศเย็นที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าที่เงื่อนไขสัดส่วนมวลอากาศเย็นอื่น ผลการทดสอบการลดอุณหภูมิในตู้ทดลองที่มีความร้อนจากอุปกรณ์ไฟฟ้าขนาด 65 W พบว่าขณะที่ให้ท่อวอร์เท็กซ์และอุปกรณ์ไฟฟ้าทำงานพร้อมกัน อุณหภูมิเฉลี่ยภายในตู้ทดลองเปลี่ยนแปลงไปคิดเป็นอัตราการเพิ่มขึ้น 0.6°C/นาที เมื่อเทียบกับขณะที่ไม่มีอากาศเย็นค่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในตู้เพิ่มขึ้นสูงกว่าด้วยอัตรา 1.1°C/นาที นั่นแสดงว่าอากาศเย็นจากท่อวอร์เท็กซ์สามารถชะลอการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในตู้ทดลองได้

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณการสนับสนุนงานวิจัยจากมหาวิทยาลัยนเรศวร และคณะวิทยาศาสตร์

## เอกสารอ้างอิง

Dincer, K., Baskaya, S. and Uysal, B.Z. (2008). Experimental investigation of the effects of length to diameter ratio and nozzle number on the performance of counter flow Ranque-Hilsch vortex tube. *Heat mass transfer, 44*, 367-373.

El-Soghiar, M.S., El-Dosoky, M.F., Abdel-Rahman, A.K., Mohamed, H.A. and Morsy, M.G. (2014). Performance study of a modified Ranque-Hilsch vortex tube. *Journal of Engineering Sciences Assiut University Faculty of engineering, 42*(6), 1414-1429.

Jansawang, S. and Rattanongphisat, W. (2016). A study on cooling efficiency of vortex tube with the chamber. Proceeding of the 5th Phayao Research Conference, 633-639. (in Thai)

Rattanongphisat, W. and Thungthong, K. (2014). Improvement vortex cooling capacity by reducing hot tube surface temperature: Experiment. *Energy Procedia, 52*, 1-9.

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

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