

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24
20-22 ตุลาคม 2553 จังหวัดอุบลราชธานี

ศึกษาถึงการแลกเปลี่ยนความร้อนของอีโคโนไมเซอร์

A Study of Heat Exchanger Efficiency of Economizer

นิวัติ พิริยะรุ่งโรจน์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ 51 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530
E-mail: jamesmutniiwat@hotmail.com โทรศัพท์ 0-2988-3666 Ext 3106, โทรสาร 0-2988-4040

จารุวัตร เจริญสุข

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ถนนฉลองกรุง เขต ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทรศัพท์ 0-2326-4197, โทรสาร 0-2326-4198

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของระยะห่างระหว่างท่อต่อคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของอีโคโนไมเซอร์ ที่มีทิศการไหลแบบตามขวาง โดยใช้ท่อสแตนเลสที่มีการจัดเรียงท่อแบบแนวเฉียง น้ำเย็นจะไหลอยู่ภายในท่อและอากาศร้อนจะไหลอยู่ในเปลือก อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศร้อนคงที่ที่ 1,080 kg/hr และ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำเท่ากับ 9 l/min. จากการทดลองพบว่าเมื่อชุดอีโคโนไมเซอร์มีการจัดระยะห่างระหว่างท่อในแนวนอนและแนวตั้งให้เท่ากับ 5.1 cm. ทำให้ 1) ปริมาณความร้อนเฉลี่ยที่น้ำได้รับสูงสุดเท่ากับ 17.9 KW. 2) อัตราส่วนความร้อนของน้ำได้รับต่อความร้อนจากอากาศร้อนมีค่าเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 0.298 3) ค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 0.403 และ 4) การสูญเสียความดันเท่ากับ 5.5 mm

คำหลัก: อีโคโนไมเซอร์, อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน, บอยเลอร์, เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อ

Abstract

This research is studied the effect of tube spacing to heat transfer characteristic of cross flow economizer using stainless steel pipes with staggered arrangement. The cold water flows into the tube and the hot air flows into the shell. The mass flows rate of hot air was kept constant at 1,080 kg/hr while the volume flows rate of cold water was kept constant at 9 l/min. When the horizontal and vertical center distance of economizer tube is 5.1 cm., the finding from the experimental are 1) the maximum of average heat transfer to water is 17.9 KW., 2) heat ratio of water to hot air is 0.298, 3) the maximum effective is 0.403, and 4) pressure drop is 5.5 mm.

Keywords: Economizer, Heat Exchanger, Boiler, Coil System, Tube-Type-Heat Exchanger

1. บทนำ

ปัจจุบันปัญหาด้านพลังงานเป็นปัญหาที่สำคัญของทั่วโลก ทั้งในด้านค่าใช้จ่ายที่สูงเพื่อให้ได้มา และแหล่งพลังงานนั้นๆ กำลังจะหมดไป โดยพบว่า เชื้อเพลิงส่วนหนึ่งถูกนำไปใช้กับเครื่องจักรเพื่อกำเนิด แหล่งพลังงานความร้อน ในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีอยู่ทั่วโลก ซึ่งหนึ่งในเครื่องจักรนั้นก็คือ หม้อต้มไอน้ำ โดยมีทั้งหม้อต้มไอน้ำขนาดเล็กและขนาดใหญ่ เช่น หม้อต้มไอน้ำขนาดเล็กที่มีความสามารถในการผลิตไอน้ำได้ 2 ตันต่อชั่วโมง ที่ความดันไอน้ำ 10 บาร์ จะต้องใช้เชื้อเพลิง แอล พี จี ประมาณปีละ 1,555,200 กิโลกรัม จากการที่หม้อต้มไอน้ำต้องการเชื้อเพลิงจำนวนมากนี้เอง จึงทำให้เกิดปัญหาเรื่องต้นทุนการผลิตที่เพิ่มขึ้น ทางแก้ปัญหานี้ก็คือการเลือกใช้หม้อต้มไอน้ำที่มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งจะผลิตความร้อนออกมามากกว่าหม้อต้มไอน้ำที่มีประสิทธิภาพต่ำ เมื่อใช้จำนวนเชื้อเพลิงเท่ากัน โดยวิธีการหนึ่งของการเพิ่มประสิทธิภาพหม้อต้มไอน้ำคือการติดตั้งชุดอีโคโนไมเซอร์

งานวิจัยเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนได้มีการศึกษาไว้หลายประเด็นแตกต่างกันเช่น งานวิจัยของ อติพงศ์ นันทพันธุ์และ คณะ [1] ได้ศึกษาถึงถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตามขวางที่ใช้ครีบกเกลียวชนิดขอบหยักกรณีศึกษาการจัดเรียงท่อแบบเหลื่อมกัน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะแปรผกผันกับขนาดท่อครีบก, ระยะห่างระหว่างท่อส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน, ความดันอากาศตกคร่อมกลุ่มท่อจะแปรผันกับขนาดท่อ ความสูงของครีบก อิศเรศ รุชกัลยา [2] ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวางกันตามกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ โดยสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ศึกษาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมและลักษณะทางกายภาพที่เหมาะสมบนพื้นฐานทางเศรษฐศาสตร์ความร้อน พบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้เป็นเครื่องมือสำหรับการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงได้

นิติเวศ ทองนุช และคณะ [3] ศึกษาการเพิ่มสมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อน โดยใช้แผ่นบิตสอดในท่อ พบว่า ผลการทดลองแผ่นบิตเป็นช่วงที่มีความห่าง 12.5 เซนติเมตร จะมีค่า Nusselt number ดีที่สุดเมื่อเทียบกับท่อเรียบและท่อที่ใส่แผ่นบิตเป็นช่วง แบบอื่นๆ ซึ่งมีค่า Friction factor ไม่มากนัก สรรพวรรธ วิทยาศัย และคณะ [4] การพาความร้อนแบบธรรมชาติของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อติดครีบกแบบเกร็ดภายใต้สนามไฟฟ้า พบว่า การใช้สนามไฟฟ้า สามารถเพิ่มสมรรถนะการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อติดครีบกแบบเกร็ดได้ประมาณ 5-10% ขึ้นอยู่กับค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อน และการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในแนวนอน จะมีค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าการติดตั้งในแนวตั้ง ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงทำการออกแบบ, สร้างชุดอีโคโนไมเซอร์ พร้อมทำการทดลอง เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดต่อการทำงาน

2. ทฤษฎี

ในการคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน อีโคโนไมเซอร์ สามารถคำนวณการแลกเปลี่ยนความร้อนของน้ำและอากาศร้อนได้จาก

$$\dot{Q}_w = \dot{m}_w C_{p_w} (T_{w_o} - T_{w_i}) \quad (1)$$

$$\dot{Q}_a = \dot{m}_a C_{p_a} (T_{a_i} - T_{a_o}) \quad (2)$$

เมื่อ $\dot{Q}$ คืออัตราการถ่ายเทความร้อน, $\dot{m}$ คืออัตราการไหลเชิงมวล, C_p คือค่าความจุความร้อนจำเพาะ T คืออุณหภูมิ, w คือ น้ำ และ a คือ อากาศ

ค่าประสิทธิภาพ (Effectiveness) ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน(E) ในกรณีที่ $\dot{m}_c C_{p_c} > \dot{m}_h C_{p_h}$ สามารถคำนวณได้จาก

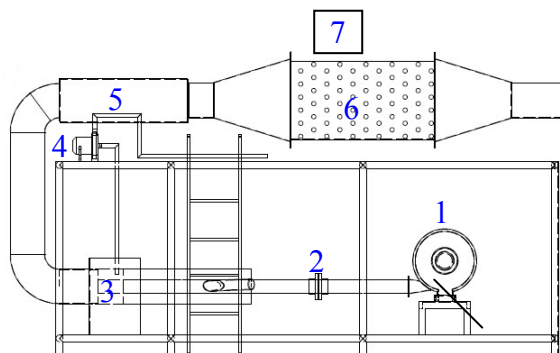
$$E = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{\max}} \quad (3)$$

$$E = \frac{\dot{m}_h C_{p_h} (T_{h,i} - T_{h,o})}{(\dot{m}c)_{\min} (T_{h,i} - T_{c,i})} \quad (4)$$

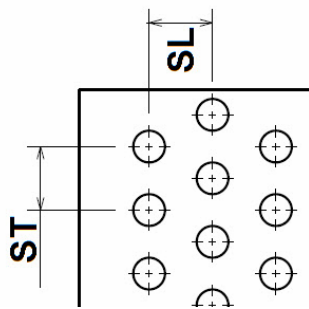
3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

อุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 1 ประกอบด้วย

- หมายเลข 1 = พัดลมขนาด 3 แรงม้า
- หมายเลข 2 = ชุดออร์ฟิสมิเตอร์
- หมายเลข 3 = ถังน้ำขนาด 50 ลิตร
- หมายเลข 4 = ปั๊มน้ำขนาด 1 แรงม้า
- หมายเลข 5 = ฮีตเตอร์ขนาด 50 กิโลวัตต์
- หมายเลข 6 = ชุดอีโคโนไมเซอร์
- หมายเลข 7 = ชุดเทอร์โมคัปเปิล 5 ตำแหน่ง



รูปที่ 1 ชุดอุปกรณ์ทำวิจัย



วิธีการทดลอง

1. ประกอบชุดอีโคโนไมเซอร์ที่ใช้ท่อแสดงนเลสที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางนอกเท่ากับ 3.34 cm. ยาว 40 cm. ซึ่งมีการจัดเรียงตัวแบบแนวเยื้อง(Staggred), ที่ระยะ S_t , $S_l = 5.1$ cm. แบบ 6 กลับ 8 แถว
2. เปิดพัดลม(หมายเลข 1)และปรับอัตราการไหลของอากาศให้เท่ากับ 1,080 kg/hr โดยวัดอัตราการไหลจากชุดออร์ฟิสมิเตอร์(หมายเลข 2)
3. วัดผลต่างระดับน้ำที่ตกคร่อมชุดอีโคโนไมเซอร์

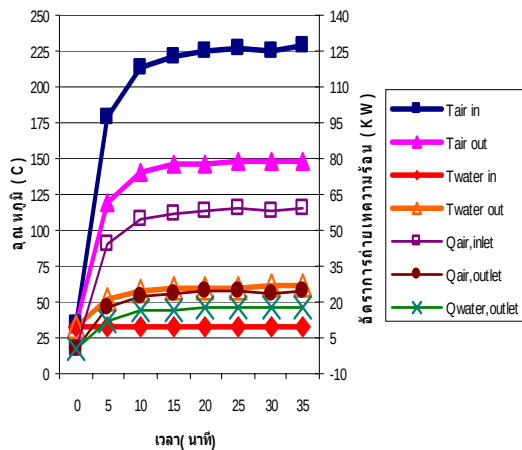
4. เปิดปั๊มน้ำ(หมายเลข 4)และปรับอัตราการไหลของน้ำให้เท่ากับ 9 l/min โดยใช้โรตاميเตอร์ ให้น้ำผ่านเข้าไปในเขตท่อของชุดอีโคโนไมเซอร์
5. เปิดฮีตเตอร์(หมายเลข 6)เพื่อให้ความร้อนกับอากาศก่อนเข้าสู่ชุดอีโคโนไมเซอร์
6. ทำการบันทึกอุณหภูมิอากาศร้อน ขาเข้า, ขาออก, อุณหภูมิน้ำขาเข้า, ขาออก, ทุก 5 นาทีจนครบ 35 นาที ทำการวัดอุณหภูมิอากาศแวดล้อม
7. ทำการเปลี่ยนชุดอีโคโนไมเซอร์อีก 8 กรณี ที่ระยะ ($S_t = 5.1$ cm., $S_l = 6.8$ cm.), ($S_t = 5.1$ cm., $S_l = 10.2$ cm.), ($S_t = 6.8$ cm., $S_l = 5.1$ cm.), ($S_t = 6.8$ cm., $S_l = 10.2$ cm.), ($S_t = 10.2$ cm., $S_l = 5.1$ cm.), ($S_t = 10.2$ cm., $S_l = 6.8$ cm.) และ ($S_t = 10.2$ cm., $S_l = 10.2$ cm.) ตามลำดับ

4. ผลการทดลองและอภิปรายผล

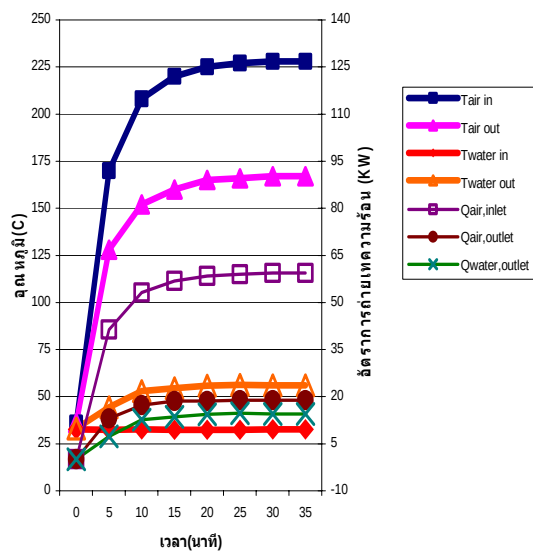
4.1 การศึกษาถึงระยะ S_t และ S_l ต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและการแลกเปลี่ยนความร้อนของอีโคโนไมเซอร์

รูปที่ 2 เมื่อชุดอีโคโนไมเซอร์มีการจัดเรียงให้ S_t , $S_l = 5.1$ cm. พบว่าอุณหภูมิอากาศขาเข้าจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากเดินเครื่องได้ 10 นาที อุณหภูมิที่วัดจุดต่างๆ เริ่มคงที่ โดยอุณหภูมิอากาศร้อนเฉลี่ยขาเข้า, ออก เท่ากับ 233 , 146 °C ตามลำดับ เมื่อมีการถ่ายเทความร้อนให้กับชุดอีโคโนไมเซอร์ ทำให้อุณหภูมิน้ำเฉลี่ยขาออกมีค่าเท่ากับ 60 °C และปริมาณความร้อนเฉลี่ยที่น้ำได้รับเท่ากับ 17.9 KW(การคำนวณค่าเฉลี่ยจะคิดจากนาฬิกาที่ 10 ถึงนาฬิกาที่ 35 ทุกกรณี) ซึ่งเป็นระยะการจัดเรียงท่อที่ทำให้การถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำมากที่สุดในช่วง 9 กรณี เนื่องจากการที่มีระยะ S_t ต่ำที่สุดในการทดลอง ($S_t = 5.1$ cm.) ทำให้พื้นที่หน้าตัด ของอีโคโนไมเซอร์มีขนาดเล็ก ส่งผลให้ความเร็วของอากาศร้อนก่อนเข้า

ชุด อีโคโนไมเซอร์ มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 3.17 m/s (ได้ $V_{max} = 9.52$ m/s) ทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วน ส่งผลให้มีการถ่ายเทความร้อนที่ผิวด้านนอกมากกว่าทุกกรณี



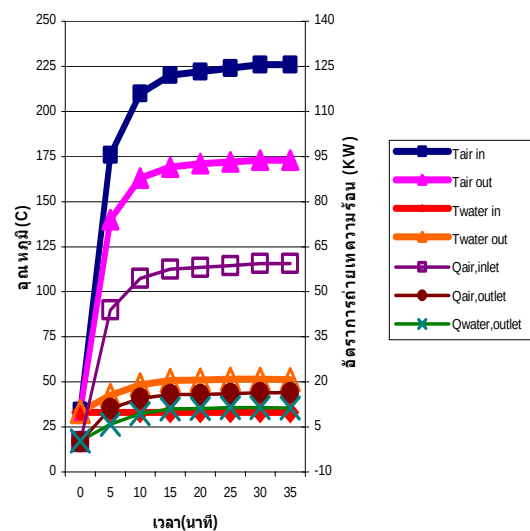
รูปที่ 2 ผลอุณหภูมิและอัตราการถ่ายเทความร้อนเทียบกับเวลา กรณี S_t , $S_l = 5.1$ cm.



รูปที่ 3 ผลอุณหภูมิและอัตราการถ่ายเทความร้อนเทียบกับเวลา กรณี S_t , $S_l = 6.8$ cm.

รูปที่ 3 เมื่อชุดอีโคโนไมเซอร์มีการจัดเรียงให้ S_t , $S_l = 6.8$ cm. อุณหภูมิเฉลี่ยอากาศร้อนขาเข้า, ออก เท่ากับ 222.6, 162 °C ตามลำดับ ซึ่งอุณหภูมิอากาศร้อนขาออกจาก อีโคโนไมเซอร์ สูงกว่า กรณี

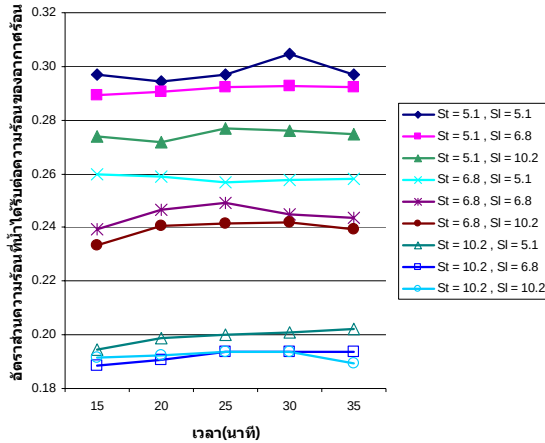
$S_t = 5.1$ cm. แสดงว่ามีการสูญเสียไปกับอากาศร้อนมากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิเฉลี่ยน้ำขาออก ลดลงเหลือเท่ากับ 55.26 °C ปริมาณความร้อนเฉลี่ยที่น้ำได้รับลดลงเหลือเท่ากับ 14.05 KW เนื่องจากจัดเรียงท่อที่มีระยะ S_t มากขึ้น ทำให้ความเร็วของแก๊สร้อนที่ไหลก่อนเข้าสู่ชุดอีโคโนไมเซอร์ต่ำลง ซึ่งเท่ากับ 2.48 m/s (ได้ $V_{max} = 4.97$ m/s) ผ่านผิวด้านนอกของท่อที่มีค่าต่ำลง การไหลแบบปั่นป่วนลดลง ทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนลดลง



รูปที่ 4 ผลอุณหภูมิและอัตราการถ่ายเทความร้อนเทียบกับเวลากรณี S_t , $S_l = 10.2$ cm.

รูปที่ 4 เมื่อชุดอีโคโนไมเซอร์มีการจัดเรียงให้ S_t , $S_l = 10.2$ cm. อุณหภูมิอากาศเฉลี่ยร้อนขาเข้า, ออก เท่ากับ 221.33, 170.16 °C ตามลำดับ อุณหภูมิเฉลี่ยน้ำขาออกเท่ากับ 50.73 °C ปริมาณความร้อนเฉลี่ยที่น้ำได้รับเท่ากับ 10.96 KW ซึ่งอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ต่ำที่สุด เนื่องมาจากการเพิ่มที่ระยะ $S_t = 10.2$ cm., ทำให้ความเร็วของอากาศร้อนที่ไหลก่อนชุดอีโคโนไมเซอร์ต่ำลงเหลือเท่ากับ 2.48 m/s (ได้ $V_{max} = 4.97$ m/s) ทำให้การถ่ายเทความร้อนลดลงเช่นเดียวกับกรณี $S_t = 6.8$ cm.

4.2 การศึกษาถึงของระยะ S_t , S_l ต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนของอากาศร้อนให้กับน้ำ



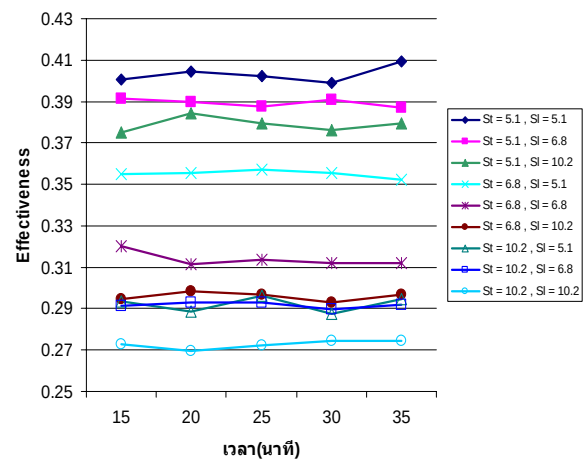
รูปที่ 5 อัตราส่วนความร้อนของน้ำที่เพิ่มขึ้นต่อความร้อนของอากาศร้อนก่อนเข้าสู่ตู้ไอโคโนมิเซอร์เทียบกับเวลา

จากรูปที่ 5 พบว่าระยะ S_t มีอิทธิพลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน ซึ่งทำให้สามารถแบ่งผลการทดลองได้เป็น 3 กลุ่ม โดยแบ่งตามระยะ S_t โดยที่ระยะ $S_t = 5.1$ cm. จะให้อัตราการถ่ายเทความร้อนมากกว่า กรณี $S_t = 6.8$ cm. และ 10.2 cm. ตามลำดับ ดังเหตุผลที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ โดยที่กรณี $S_t = 5.1$ cm., $S_l = 5.1$ cm. จะทำให้น้ำได้รับความร้อนจากอากาศร้อนมีสัดส่วนสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 0.298

เมื่อคงที่ระยะ $S_t = 5.1$ และ 6.8 cm. พบว่าเมื่อระยะ S_l เพื่อมากขึ้น จะให้อัตราการถ่ายเทความร้อนลดน้อยลง เนื่องจากการเพิ่มระยะ S_l จะทำให้พื้นที่หน้าตัดของช่องว่างที่อากาศร้อนไหลผ่านเพิ่มมากขึ้น ทำให้ความเร็วอากาศร้อนที่ไหลผ่านกลุ่มท่อลดต่ำลง สัมประสิทธิ์การพาความร้อนลดต่ำลง แต่ในกรณีที่ $S_t = 10.2$ cm.

พบว่า การเพิ่มระยะ S_l จะมีผลต่อการแลกเปลี่ยนความร้อนน้อยกว่ากรณี $S_t = 5.1$ และ 6.8 cm. เนื่องจากการเพิ่มระยะ S_l ทำให้เปอร์เซ็นต์การเพิ่มพื้นที่หน้าตัดของช่องว่างที่อากาศร้อนจะไหลผ่านมีค่าน้อยกว่ากรณี $S_t = 5.1$ และ 6.8 cm. ตามลำดับ จึงทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนต่างกันไม่มาก

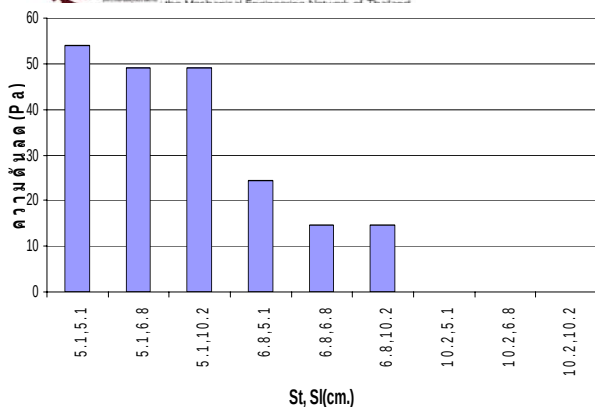
4.3 การศึกษาถึงประสิทธิผล (Effectiveness) ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ 6 Effectiveness(ประสิทธิผล)เทียบกับเวลา

จากรูปที่ 6 พบว่าที่กรณี $S_t, S_l = 5.1$ cm. จะทำให้ค่าประสิทธิผลมากที่สุดเฉลี่ยเท่ากับ 0.403 นั้นหมายถึงการจัดที่ระยะเยื้องดังกล่าว จะทำให้อุณหภูมิอากาศร้อนขาออกเท่ากับ 146°C ซึ่งต่ำที่สุดกว่าทุกกรณี และการเพิ่ม S_t และ S_l มากขึ้น ความเร็วของอากาศที่ผ่านกลุ่มท่อลดต่ำลง การถ่ายเทความร้อนลดต่ำลง(สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายนอกลดต่ำลง) ทำให้การถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำได้น้อยลง อุณหภูมิอากาศร้อนขาออกจึงสูง ค่าประสิทธิผลที่ได้จึงต่ำลงซึ่งสอดคล้องกับหัวข้อ 4.2

จากรูปที่ 7 ระยะ S_t มีอิทธิพลต่อความดันลดมากกว่าระยะ S_l โดยที่ระยะ $S_t = 5.1$ และ 6.8 cm.



รูปที่ 7 ความดันลดของการไหลผ่านกลุ่มท่อที่มีการจัดเรียงต่างๆ ของอากาศที่อุณหภูมิบรรยากาศ

เนื่องจากการจัดเรียงท่อที่ระยะแตกต่างกันทำให้ค่าของ ความเสียดทาน, สัดส่วนของระยะ S_t ต่อ S_l และ ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านกลุ่มท่อซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่แตกต่างกัน โดยที่ระยะ $S_t = 5.1$ cm., $S_l = 5.1$ cm. ความเร็วของอากาศสูงสุดเท่ากับ 5.71 m/s ทำให้เกิดความดันลดของการไหลผ่านกลุ่มท่อมากที่สุดเท่ากับ 5.5 mm. และความดันลดจะลดลงเมื่อระยะ S_t มากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มระยะ $S_t = 10.2$ cm. พบว่าอิทธิพลของความเร็ว และตัวแปรอื่นมีค่าน้อยลงเนื่องจากระยะห่างระหว่างท่อที่มากทำให้ความเร็วของอากาศลดลงเหลือเท่ากับ 1.55 m/s จึงทำให้ความดันลดลงอย่างมาก ซึ่งจากการทดลองไม่สามารถอ่านความแตกต่างได้จากมอโนมิเตอร์ ทั้งกรณี $S_l = 5.1, 6.8$ และ 10.2 cm. ตามลำดับ

5. สรุป

5.1 ชุดอีโคโนไมเซอร์มีการจัดเรียงท่อให้ S_t, S_l เท่ากับ 5.1 cm. ทำให้อุณหภูมิน้ำเฉลี่ยขาออกเพิ่มขึ้นจาก 32 °C เป็น 60 °C โดยอุณหภูมิอากาศร้อนเฉลี่ยขาเข้า, ออก เท่ากับ 233 , 146 °C ตามลำดับ และปริมาณความร้อนเฉลี่ยที่น้ำได้รับเท่ากับ 17.9 KW ซึ่งเป็นการจัดเรียงท่อที่ให้การถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำมากที่สุดในการทดลอง

5.2 ระยะ S_t มีอิทธิพลที่แปรผกผันอย่างมากกับอัตราการถ่ายเทความร้อนทุกระยะ S_l เท่ากับ 5.1 cm., 6.8 cm. และ 10.2 cm. แต่ระยะ S_l มีอิทธิพลต่อการอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ระยะ S_t เท่ากับ 5.1 cm., 6.8 cm. โดยที่กรณี $S_t = 5.1$ cm., $S_l = 5.1$ cm. จะทำให้น้ำได้รับความร้อนจากอากาศร้อนมีสัดส่วนเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 0.298

5.3 ชุดอีโคโนไมเซอร์มีการจัดเรียงท่อ $S_t = 5.1$ cm., $S_l = 5.1$ cm. จะทำให้ค่าประสิทธิภาพมากที่สุดเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 0.403

5.4 เมื่ออากาศที่มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิบรรยากาศไหลผ่านท่อที่มีระยะ $S_t = 5.1$ cm., $S_l = 5.1$ cm. ทำให้เกิดความดันลดของการไหลผ่านกลุ่มท่อมากที่สุดเท่ากับ 5.5 mm.

6.กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ฝ่ายอุตสาหกรรม โครงการโครงการอุตสาหกรรม และวิจัยสำหรับปริญญาดุษฎี (IRPUS) ประจำปี 2552 ที่ให้การสนับสนุนทุนอุดหนุนงานวิจัย และขอขอบพระคุณบริษัท ส.ไพศาล สตีม บอยเลอร์ จำกัด ที่ให้ความร่วมมือและสนับสนุนการทำการวิจัย ขอขอบคุณ นายนราชัย เกษประดิษฐ์, นายชูชาติ สิทธิชัย, นายกัมพล อ่อนศรี, นายจักรพันธ์ อิงขจร, นายสันติ ชูเข้ม, นายอรรถพล โสภาว์วัฒน์, นายกิตติศักดิ์ หัวขุนทด และ นายโยธิน ประหยัดทรัพย์ นักศึกษาภาควิชาวิศวกรรม เครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ที่ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี

7.เอกสารอ้างอิง

7.1 บทความจากเอกสารประกอบการประชุม

[1] อติพงศ์ นันทพันธุ์ และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ , 2546, คุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเครื่อง

แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตามขวางที่ใช้ครีบก
เกลียวชนิดขอบหยัก กรณีศึกษาการจัดเรียงท่อแบบ
เหลื่อมกัน, คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

[2] อิศเรศ รุชกัลยา, 2546, สภาวะที่เหมาะสมที่สุด
ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขวางกันตาม
กฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์, คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

[3] นิติเวศ ทองนุช, บุญชัย ศิลปะกิจวงษ์กุล, มณฑา
เทียมเมือง และ พงษ์เจต พรหมวงศ์, 2547, การเพิ่ม
สมรรถนะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อน
โดยใช้แผ่นปิดสอดในท่อ, คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง

[4] สรรพวรรธ วิทยาชัย และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริ
โรจน์ 2548, การพาความร้อนแบบธรรมชาติของ
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อติดครีบกแบบเกล็ด
ภายใต้สนามไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

7.4 หนังสือ

[1] ชัยสวัสดิ์ เทียนวิบูลย์, เทคโนโลยีไอน้ำ,
กรุงเทพมหานคร

[2] Frank P.Incropera David P.DeWitt,
Introduction to Heat Transfer , John Wiley, New
York

[3] นักสิทธิ คุ้มณาชัย, การถ่ายเทความร้อน, โคร
การตำราเรียน ฟิสิกส์เซนต์เตอร์

[4] รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์, การถ่ายเทความร้อน,
โครการตำราเรียน คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันพระ
จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง