

ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์	การป้องกันการกัดกร่อนบนผิวภายนอกท่อของ เครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเทอร์โมไซฟอนด้วยการเคลือบ อีนาเมล	
ชื่อผู้เขียน	นายขวัญชัย ไกรทอง	
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ :	รศ.ดร. ประดิษฐ์ เทอดทูล	ประธานกรรมการ
	รศ.ดร. สมชาย ทองเต็ม	กรรมการ
	ผศ.ดร. สัมพันธ์ ไชยเทพ	กรรมการ

## บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาการป้องกันการกัดกร่อนบนผิวภายนอกท่อของเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเทอร์โมไซฟอนด้วยการเคลือบอีนาเมล โดยทดสอบกับเทอร์โมไซฟอนที่ทำจากท่อเหล็กขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 26.7 มม. ความหนาผนังท่อ 2.87 มม. และท่อทองแดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 28.5 มม. ความหนาผนังท่อ 1.27 มม. ความยาวท่อทั้งหมดเป็น 900 มม. มีส่วนทำระเหยยาว 695 มม. ส่วนไม่ถ่ายเทความร้อนยาว 10 มม. และส่วนควบแน่นยาว 195 มม. เทอร์โมไซฟอนมีทั้งหมด 4 ชุด แต่ละชุดประกอบด้วยเทอร์โมไซฟอนที่ทำจากท่อเหล็กและท่อทองแดงที่ไม่เคลือบและเคลือบอีนาเมล 3 ความหนาในส่วนทำระเหยของเทอร์โมไซฟอน โดยติดตั้งงานตัวแทนที่เป็นโลหะแผ่นบางขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 25.4 มม. ทำจากโลหะชนิดเดียวกับท่อที่ตำแหน่งด้านหน้ารับไอเสียร้อนและด้านตรงข้ามของเทอร์โมไซฟอน ทำการเคลือบอีนาเมลเฉพาะด้านที่เลือกเพื่อทดสอบผลกระทบในการกัดกร่อนเนื่องจากผลของทิศทางการไหลเท่านั้น โดยทดสอบกับไอเสียร้อนที่อุณหภูมิ 225°C ได้จากการเผาไหม้ของน้ำมันเตาเกรด A ที่มีน้ำมันดีเซลผสมอยู่ 20% โดยปริมาตร ทำการทดสอบวันละ 16 ชั่วโมง รวมทั้งหมด 1,000 ชั่วโมง เก็บ

ข้อมูลความร้อนส่งผ่านและอุณหภูมิแตกต่างของเครื่องอุ่นน้ำป้อนในช่วงการทำงานต่างๆ ข้อมูลการกัดกร่อนและเขม่าจากเทอร์โมไซฟอน และข้อมูลน้ำหนักจากชิ้นงานตัวอย่าง ที่เวลา 250, 500, 750 และ 1,000 ชั่วโมง ทำการวิเคราะห์ผลโดยวิเคราะห์การกัดกร่อนจากภาพถ่ายภาคตัดขวางท่อขยาย 25 เท่าที่ถ่ายโดยกล้องจุลทรรศน์ วิเคราะห์ผลจากการตรวจหาสารประกอบอนินทรีย์และสารประกอบอินทรีย์ในเขม่าโดยเครื่อง X-ray diffractometer และ Infra-red spectroscopy วิเคราะห์ความหนาเขม่าที่ได้จากการวัดที่ผิวท่อ วิเคราะห์อัตราการเกาะตัวของเขม่าเฉลี่ยจากน้ำหนักของชิ้นงานตัวแทนที่เพิ่มขึ้น วิเคราะห์ความต้านทานความร้อนของเขม่าที่ได้จากค่าความต้านทานความร้อนรวมของเครื่องอุ่นน้ำป้อนที่เปลี่ยนไป และวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ที่ได้จากค่าใช้จ่ายทั้งหมด จากผลการทดสอบพบว่าตำแหน่งด้านหน้ารับไอเสียร้อนและความหนาอินามาเมลไม่มีผลต่อการกัดกร่อนหรือความหนาเขม่าหรืออัตราการเกาะตัวของเขม่าเฉลี่ย การกัดกร่อนของท่อเหล็กและท่อทองแดงที่เคลือบอินามาเมลจะค่าน้อยกว่าท่อที่ไม่เคลือบ 0.169 มม. และ 0.186 มม. ตามลำดับ ที่เวลา 1,000 ชั่วโมง ตรวจพบสารประกอบอนินทรีย์คือ  $\text{CaSO}_4$  ส่วนสารประกอบอินทรีย์นั้นตรวจไม่พบจากเขม่าที่ได้จากผิวท่อโดยไม่ขึ้นกับชนิดวัสดุของท่อหรือการเคลือบหรือเวลา และพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างการกัดกร่อนกับเวลาของท่อเหล็กที่ไม่เคลือบและเคลือบอินามาเมลเป็นไปดังสมการ  $\text{Cr} = 0.008t^{0.4578}$  และ  $\text{Cr} = 0.0073t^{0.2431}$  ตามลำดับ ส่วนท่อทองแดงความสัมพันธ์ระหว่างการกัดกร่อนกับเวลาของท่อที่ไม่เคลือบและเคลือบอินามาเมลเป็นไปดังสมการ  $\text{Cr} = 0.0231t^{0.2938}$  และ  $\text{Cr} = 0.03474t^{0.202}$  ตามลำดับ ทางด้านอัตราการเกาะตัวของเขม่าเฉลี่ยพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกาะตัวของเขม่าเฉลี่ยกับเวลาของท่อเหล็กและท่อทองแดงเป็นไปดังสมการ  $\text{RW}_{\text{fouling}} = 18.784t^{-0.9778}$  และ  $\text{RW}_{\text{fouling}} = 126.97t^{-1.2373}$  ตามลำดับ ทางด้านความหนาเขม่าพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความหนาเขม่ากับเวลาของท่อเหล็กและท่อทองแดงเป็นไปดังสมการ  $R_{\text{fouling}} = 28.6275(1 - e^{-0.0018t})$  และ  $R_{\text{fouling}} = 31.3438(1 - e^{-0.009t})$  ตามลำดับ ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานความร้อนของเขม่ากับเวลาเป็นไปดังสมการ  $Z_{\text{fouling}} = 0.0925(1 - e^{-0.003t})$  ในการใช้งานท่อของเครื่องอุ่นน้ำป้อนแบบเทอร์โมไซฟอนที่ทำงานกับอุณหภูมิ 150 - 250°C จึงควรเลือกใช้ท่อเหล็กและท่อทองแดงเคลือบอินามาเมลที่มีความหนา 190 ไมครอน จึงจะคุ้มค่าเพราะเสียค่าใช้จ่ายทั้งหมดต่ำกว่าการเคลือบที่ความหนาอื่น

Thesis Title	Corrosion Protection on External Surface of a Thermosyphon Economizer by an Enamel Coating	
Author	Mr. Kwanchai Kraitong	
M.Eng.	Mechanical Engineering	
Examining Committee :	Associate Prof. Dr. Pradit Terdtoon	Chairman
	Associate Prof. Dr. Somchai Thongtem	Member
	Assistant Prof. Dr. Sumpun Chaitep	Member

#### Abstract

The purpose of this paper is to study the effects of using enamel as a protection from corrosion on thermosyphon economizers. The thermosyphons used in the experiment were made of mild steel tubing with an outside diameter of 26.7 mm and a wall thickness of 2.87 mm, and copper tubing with an outside diameter of 28.5 mm a wall thickness of 1.27 mm, and all thermosyphons used in this experiment were 900 mm in length. The length of the evaporator section was 695 mm ,the adiabatic section was 10 mm and the condenser section was 195 mm. These tubes were grouped into four sets. Each set consisted of an uncoated and coated steel thermosyphon and an uncoated and coated copper thermosyphon, which were coated with three different coating thicknesses of enamel on the evaporator section. The coated sample pieces made of the same material with a 25.4 mm diameter, were prepared separately and were attached to both sides of each thermosyphon, the faced side (for direct impact

from exhaust gases) and the lee side, in order to test the effect of corrosion from the flow of exhaust gases. The test was done using exhaust gas burned at a temperature of 225°C, generated from a mixture of heavy A grade fuel and 20% diesel by volume. The experiment was conducted 16 hours a day for a total of a 1,000 hours. Data was recorded from the heat transfer, the different temperatures of the economizer, the thermosyphon's corrosion, the fouling and the sample's weights at 250, 500, 750 and 1,000 hours. The corrosion was analyzed by photographs taken by a 25 X optical microscope. The inorganic and organic compounds in the fouling were analyzed by an X-ray diffractometer and an Infra-red spectroscope. The fouling thickness was obtained from measuring the surface of the thermosyphon and the average rate of fouling obtained from the increased weight of the samples. The thermal resistance of the economizer taken at regular intervals was used directly to analyze the fouling thermal resistance. The economic viability of the thermosyphon was then considered. It was found that neither the positioning of either facing nor the thickness of the enamel coating affected the corrosion, the fouling thickness, or the average rate of fouling. On completion of the experiment, the corrosion of the coated mild steel thermosyphon and the coated copper thermosyphon was found to be less than the uncoated thermosyphons of 0.15 mm and 0.136 mm respectively. The inorganic compound found in the fouling on the thermosyphon's surface was  $\text{CaSO}_4$ . However, there was no organic compound found in this investigation. Thus the fouling on the thermosyphon's surface did not depend on the material used in the tubes production, the coating or the operational time. Concerning the corrosion, it was found that the correlation between corrosion and time of the uncoated mild steel thermosyphon and the coated mild steel thermosyphon is  $\text{Cr} = 0.008t^{0.4578}$  and  $\text{Cr} = 0.0073t^{0.2431}$  respectively, the correlation between corrosion and time of the uncoated copper thermosyphon and the coated copper thermosyphon is  $\text{Cr} = 0.0231t^{0.2938}$  and  $\text{Cr} = 0.03474t^{0.202}$  respectively. In the case of the average rate of fouling, it was found that the correlation between the average rate of fouling and time of the mild steel thermosyphon and copper thermosyphon is  $\text{RW}_{\text{fouling}} = 18.784t^{-0.9778}$  and  $\text{RW}_{\text{fouling}} = 126.97t^{-1.2373}$  respectively. In the case of the fouling

thickness, it was found that the correlation between the fouling thickness and time of the mild steel thermosyphon and copper thermosyphon is  $R_{\text{fouling}} = 28.6275(1 - e^{-0.0018t})$  and  $R_{\text{fouling}} = 31.3438(1 - e^{-0.009t})$  respectively. The equation of the fouling resistance and time is  $Z_{\text{fouling}} = 0.0925(1 - e^{-0.0031t})$ . It can be concluded that the most cost effective tubing used in a thermosyphon at temperatures between 150 - 250°C was made of mild steel or copper with a thickness of 190 microns.