

## การใช้ท่อเหล็กทำคอนเดนเซอร์แบบซ่อนใต้ผนังในตู้เย็น A steel tube for hot-wall condenser in household refrigerator

จิรศักดิ์ จารุงศ์<sup>1\*</sup>, อภิชาติ อัจฉนาเสียว<sup>2</sup>, ชัยภัทร เครือหงส์<sup>2</sup>

<sup>1</sup> สาขาวิศวกรรมพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น 40002

<sup>2</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น 40002

\*ติดต่อ: jarupong\_j@hotmail.com, 089-2844308, โทรสาร 037-204193

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการทดสอบการถ่ายเทความร้อน ความสามารถในการทำความเย็นและการกัดกร่อนของตู้คอนเดนเซอร์ ซึ่งใช้ในตู้เย็นระบบอัดไอความเย็น 2 ประตู การทดสอบทำบนตู้เย็นจริง ขนาด 243 ลิตร ใช้สารทำความเย็น R-134a คอนเดนเซอร์เป็นแบบซ่อนใต้ผนัง (hot-wall condenser) จากผลการศึกษาพบว่าความสามารถในการทำความเย็นซึ่งประกอบด้วย การลดลงของอุณหภูมิภายในตู้เย็น (Temperature pull down) ตามมาตรฐาน AS/NZS 4474.1 อุณหภูมิเก็บอาหาร (Storage temperature) และการใช้พลังงานไฟฟ้า (Energy consumption) ตามมาตรฐานการทดสอบ ISO 15502 ตู้เย็นที่ใช้ท่อเหล็กเคลือบสังกะสีทำคอนเดนเซอร์มีค่า pull down time ของอุณหภูมิภายในช่องแช่แข็งและช่องแช่เย็นช้ากว่าตู้เย็นที่ใช้ท่อทองแดง 7 และ 10 นาที ตามลำดับ Storage temperature ในช่องแช่แข็งและช่องแช่เย็นมีค่าใกล้เคียงกัน ค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงกว่าเท่ากับ 3.7 % ผลการศึกษาการถ่ายเทความร้อนพบว่า การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยมีแนวโน้มลดลงตลอดช่วงการทดสอบ 6 เดือน โดยต่างกันเท่ากับ 1.79% การศึกษาการกัดกร่อนด้วยการวิเคราะห์ทางไฟฟ้าเคมีด้วยเทคนิคแอนโอดิกโพราไรเซชันในสารละลาย 0.1M NaCl + 0.5M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> และการกัดกร่อนแบบพ่นละอองเกลือ NaCl ความเข้มข้น 5% เปรียบเทียบระหว่างท่อทองแดงและท่อเหล็กเคลือบสังกะสี พบว่าท่อเหล็กเคลือบสังกะสีเกิดการกัดกร่อนก่อนท่อทองแดงเนื่องจากมีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนต่ำกว่าคือ -1.058 V<sub>SSE</sub> และ -0.3842 V<sub>SSE</sub> อัตราการกัดกร่อนจากการทดสอบด้วยวิธีพ่นละอองเกลือ แสดงให้เห็นว่าท่อเหล็กเคลือบสังกะสีมีค่าสูงกว่าท่อทองแดง โดยท่อเหล็กที่ผ่านการใช้งานแล้ว 6 เดือน มีอัตราการกัดกร่อนสูงสุดซึ่งเท่ากับ 20.94 mg/year

**คำหลัก:** ตู้เย็น, คอนเดนเซอร์, การถ่ายเทความร้อน, การกัดกร่อน

### Abstract

This paper presents the experiment of heat transfer, cooling performance and corrosion study condenser. The experiments were carried out on a real of vapor compression refrigerator 2 door size 243 liters using R-134a as the refrigerant to obtained the heat reject of hot-wall condenser in refrigerator and cooling performance items are temperature pull down according to AS/NZS 4474.1, storage temperature and energy consumption according test standard ISO 15502. The experiment results are found the refrigerator with zinc coated steel tube condenser show average temperature in freezer and fresh food compartment pull down time longer 7 and 10 minute, storage temperature from test results were nearly

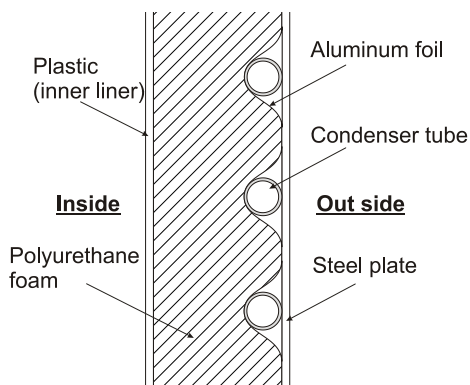
## AMM-94

same value and energy consumption is higher than 3.7%. Heat transfer study found average heat reject from condenser during 6 month reduce 1.79%. The corrosion study use electrochemical measurements by anodic polarization technique under solution 0.1M NaCl + 0.5M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and salt spray testing under 5wt% NaCl. The results from anodic polarization curve show corrosion of zinc coated steel tube will occurred before copper tube caused from corrosion potential value is lower, -1.058 V<sub>SSE</sub> and -0.3842 V<sub>SSE</sub>. Corrosion rate of zinc coated steel tube higher than copper tube, steel tube at 6 month is highest corrosion rate is 20.94 mg/year.

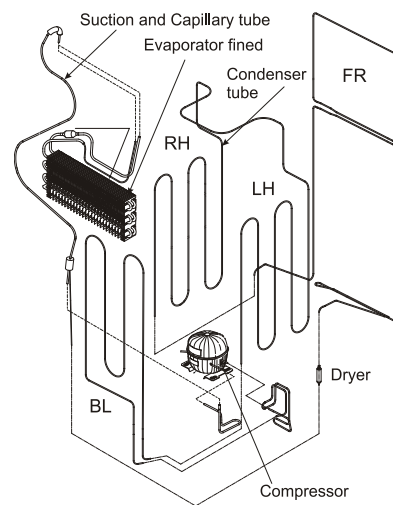
**Keywords:** Refrigerator, Condenser, Heat transfer, Corrosion.

### 1. บทนำ

คอนเดนเซอร์เป็นส่วนประกอบที่มีความสำคัญในระบบการทำงานของตู้เย็น การออกแบบจึงมีผลกระทบโดยตรงต่อประสิทธิภาพการทำความเย็นของระบบ คอนเดนเซอร์ที่นิยมใช้ในตู้เย็นขนาดเล็กถึงขนาดกลางมี 2 ประเภท คือ แบบ Wire and Tube (W&T) ซึ่งนิยมใช้กับตู้เย็นรุ่นเก่า มีลักษณะเป็นทองแดงขดคล้ายรูปตัวยู (U-shape) มีแท่งเหล็กลักษณะคล้ายลวดเชื่อมติดเพื่อช่วยในการระบายความร้อน ติดตั้งอยู่กับผนังด้านนอกโดยส่วนมากอยู่ทางด้านหลังของตู้เย็น แบบที่สองคือ แบบชอนใต้ผนัง (Hot-wall) บางครั้งเรียกว่า Skin condenser ซึ่งเป็นแบบที่สร้างขึ้นมาเพื่อทดแทนแบบเดิมและเป็นที่นิยมในปัจจุบัน มีลักษณะเป็นท่อทองแดงขดติดอยู่กับผนังตู้เย็นด้านในโดยใช้อะลูมิเนียมเหนียวเทป (Aluminium adhesive tape) ยึดท่อติดกับผนังตู้เย็นด้านข้างและด้านหลัง ท่อคอนเดนเซอร์จะไม่สามารถมองเห็นได้จากด้านนอก ดังรูปที่ 1



(ก)



(ข)

รูปที่ 1 คอนเดนเซอร์แบบชอนใต้ผนัง (ก) ภาพตัดขวางของคอนเดนเซอร์ในตู้เย็น (ข) ระบบท่อคอนเดนเซอร์ในตู้เย็น

การระบายความร้อนของคอนเดนเซอร์แบบ Hot-wall นั้น อลูมิเนียมเหนียวเทปจะถ่ายเทความร้อนจากท่อสู่ผนังท่อด้วยการนำความร้อน (Conduction) และผนังตู้จะระบายความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมด้วยวิธีการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน Bansal และ Chin [1] ได้ทำการศึกษาโดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และทำการทดลองบนตู้เย็นที่ใช้คอนเดนเซอร์แบบชอนใต้ผนัง (Hot-wall) เพื่อทำการศึกษากการถ่ายเทความร้อน (Condensing capacity) ความดันสูญเสีย (Pressure loss) และ degree of sub-cooling ที่เงื่อนไขต่าง ๆ กัน ค่าที่ได้จากแบบ

## AMM-94

จำลองทางคณิตศาสตร์ต่างจากการทดลอง 10% ซึ่งเป็นผลจากการที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่ได้พิจารณาผลการถ่ายเทความร้อนจากภายในตู้เย็น Gupta และ Gopal [2] ได้ทำการปรับปรุงแบบจำลองโดยเพิ่มการพิจารณาการถ่ายเทความร้อนจากภายในท่อคอนเดนเซอร์ตลอดความยาวที่ผ่าน Aluminium tape สู้ผนังภายนอกตู้เย็นทำให้แบบจำลองมีความถูกต้องมากขึ้นและพบว่าความกว้างและมุมของ Aluminium tape ที่ใช้ยึดท่อคอนเดนเซอร์มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน ความกว้างของ Aluminium tape ที่แคบกว่าและมุมที่ Aluminium tape สัมผัสกับท่อเพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนให้ได้ดีขึ้น Reborra และ Taglificio [3] ได้ทำการศึกษาเพื่อหาความสัมพันธ์ของ Thermal performance ระหว่างท่อคอนเดนเซอร์แบบซ่อนใต้ผนัง (hot-wall) และอีวาพอเรเตอร์ (Evaporator) ของตู้แช่ (chest freezer) โดยใช้วิธี Sensitivity Analysis โดยกำหนดตัวแปร (Design parameter) คือ ความหนาโลหะของผนังตู้ ความหนาของฉนวน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ Condenser และ Evaporator ระยะห่างระหว่างท่อ และ Thermal contact resistance พบว่าลักษณะทางความร้อนของ condenser และ evaporator นั้นเป็นอิสระต่อกัน ความหนาของผนังทำให้การถ่ายเทความร้อนดีขึ้นสำหรับด้าน Evaporator ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อที่เพิ่มขึ้นจะทำให้การถ่ายเทความร้อนดีขึ้นทั้งสองด้านแต่จะทำให้การประสิทธิภาพ (COP) ของตู้แช่ลดลง Zhang และคณะ [4] ทำการปรับปรุงชุดคอนเดนเซอร์แบบซ่อนใต้ผนัง (Hot-wall) โดยใช้ท่อที่มีขนาดเล็ก (Micro-Channel) เพื่อลดต้นทุนวัสดุด้วยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาจุดที่ดีที่สุด (Optimum design) ของความยาวและจำนวนท่อ โดยวัดจากค่าการถ่ายเทความร้อนพบว่าสามารถลดวัสดุที่ใช้ทำคอนเดนเซอร์ลง 48.6% โดยน้ำหนักเมื่อเทียบกับท่อคอนเดนเซอร์แบบปกติ

Hernes และ Melo [5] สร้างแบบจำลองเพื่อทำนายการใช้พลังงานไฟฟ้า (Energy consumption) เปรียบเทียบค่าการใช้พลังงานกับค่าที่ได้จากการ

ทดลองพบว่าต่างกันไม่เกิน 10% ในลักษณะเดียวกัน Hermes และคณะ [6] ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อทำนายค่าการใช้พลังงานไฟฟ้า พบว่าการเพิ่มจำนวนท่อของคอนเดนเซอร์และจำนวนครีบบของ evaporator ทำให้ค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าของตู้เย็นลดลง 7.5% เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการใช้พลังงานไฟฟ้ากับผลการทดลองตามมาตรฐาน AHAM พบว่ามีค่าไม่เกิน  $\pm 5\%$  อุณหภูมิภายนอกตู้เย็นนั้นส่งผลต่อค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าของตู้เย็นตามผลการศึกษาของ Saidur และคณะ [7] ที่แสดงให้เห็นว่าไหลลดภายในตู้เย็นประมาณ 60 – 70% เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างภายนอกและภายในตู้เย็น

ทองแดงเป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้สำหรับทำท่อคอนเดนเซอร์ในตู้เย็นเนื่องจากเป็นวัสดุที่มีค่าการนำความร้อนสูง (Thermal conductivity) ด้านทานการกัดกร่อนได้ดีและมีความยืดหยุ่นสูง เชื่อมและขดขึ้นรูปได้ง่าย แต่ในปัจจุบันราคาของทองแดงค่อนข้างผันผวนและมีแนวโน้มสูงขึ้น โดยราคาเฉลี่ย ณ เดือนสิงหาคม ปี 2556 สูงกว่าค่าเฉลี่ยในช่วงเดียวกันของปี 2546 – 2555 อยู่ถึง 27.0% และสูงกว่าในช่วงเดียวกันของปี 2553 อยู่ 1.7% [8] ส่งผลให้ราคาต้นทุนโดยรวมของตู้เย็นสูงขึ้น ดังนั้นจึงมีแนวคิดในการทำท่อเหล็กมาใช้แทนทองแดงแต่ท่อเหล็กก็มีจุดด้อยกว่าในการด้านทานการกัดกร่อนและการนำความร้อน

ทีมวิจัยจึงมีแนวความคิดในการนำเหล็กมาทำคอนเดนเซอร์ทดแทนการใช้ทองแดงเพื่อลดต้นทุน โดยเลือกใช้ท่อเหล็กผสมที่มีค่าการนำความร้อนใกล้เคียงกับทองแดงและเคลือบด้วยสังกะสีเพื่อลดปัญหาการกัดกร่อน ซึ่งจากการสืบค้นงานวิจัยก่อนหน้านี้ พบว่ายังไม่มีการวิจัยใดศึกษามาก่อน ดังนั้นทีมวิจัยจึงทำการศึกษการถ่ายเทความร้อน ความสามารถในการทำความเย็นและการทดสอบการกัดกร่อนเพื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างตู้เย็นที่ผลิตจากท่อทองแดงกับที่ผลิตจากท่อเหล็กเคลือบสังกะสี เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาเป็นแนวทางในการนำท่อเหล็กมาใช้ในอนาคต

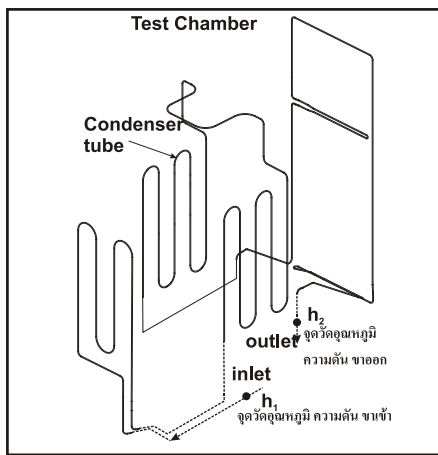
## AMM-94

### 2. วิธีการทดลอง

ทีมวิจัยได้ทำการออกแบบระบบเพื่อใช้ในการทดลอง โดยแบ่งออกเป็น 2 ระบบ เพื่อเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนของคอนเดนเซอร์และความสามารถในการทำความเย็น โดยตัวอย่างตู้เย็นที่ใช้เป็นแบบ 2 ประตู ระบบ No-frost ขนาด 243 ลิตร ใช้ R-134a เป็นสารทำความเย็น จำนวน 2 ตู้ ซึ่งตู้ที่ 1 ใช้ทองแดงเป็นท่อคอนเดนเซอร์ ส่วนตู้ที่ 2 ใช้ท่อเหล็กเคลือบสังกะสีเป็นท่อคอนเดนเซอร์ โดยมีรูปแบบ ขนาด ความยาวท่อเหมือนกัน

#### 2.1 การถ่ายเทความร้อนของคอนเดนเซอร์

แผนผังระบบที่ใช้ในการทดสอบแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งภายในห้องควบคุมอุณหภูมิและความชื้น (Chamber room) ที่ 32 °C และ 55 %RH ตามลำดับ โดยให้ตู้เย็นทำงานตลอดระยะเวลา 6 เดือน และวัดค่าอุณหภูมิ ความดัน อัตราการไหลที่ทางเข้าและทางออกของท่อคอนเดนเซอร์ทุกๆ เดือน



รูปที่ 2 แผนผังระบบที่ใช้ในการทดสอบการถ่ายเทความร้อน

ค่าการถ่ายเทความร้อนคำนวณได้จากสมการ

$$Q_H = \dot{m} (h_1 - h_2) \quad (1)$$

$Q_H$  คือ การถ่ายเทความร้อนของคอนเดนเซอร์ (W)

$h_1$  คือ เอนทาลปีของสารทำความเย็นที่ทางเข้าคอนเดนเซอร์ (J/kg)

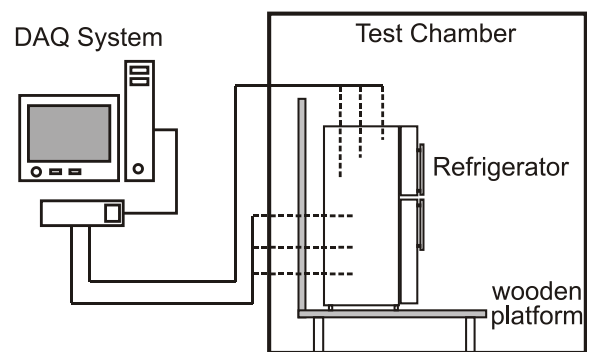
$h_2$  คือ เอนทาลปีของสารทำความเย็นที่ทางออกคอนเดนเซอร์ (J/kg)

$\dot{m}$  คือ อัตราการไหลของสารทำความเย็น (kg/s)

ค่าเอนทาลปีของสารทำความเย็นหาได้จากการใช้ตารางคุณสมบัติของสารทำความเย็นโดยใช้ข้อมูลอุณหภูมิสารทำความเย็นที่วัดได้จากการใช้เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ความดันของสารทำความเย็นที่วัดได้จากเกจวัดความดัน (Pressure gage)

#### 2.2 การทดสอบความสามารถในการทำความเย็น

การทดสอบความสามารถในการทำความเย็นทดสอบตามมาตรฐาน ISO 15502 [9] และ AS/NZS 4474.1 [10] เนื่องจากเป็นมาตรฐานที่ถูกนำมาใช้กำหนดเป็นมาตรฐานการทดสอบตู้เย็นของประเทศต่างๆ เช่น สหภาพยุโรป ออสเตรเลีย มาเลเซีย สิงคโปร์ และอีกหลายประเทศ โดยทดสอบในห้องควบคุมอุณหภูมิและความชื้น (Test Chamber) ดังรูปที่ 3 ซึ่งประกอบไปด้วยหัวข้อการทดสอบดังนี้ การลดลงของอุณหภูมิภายในตู้เย็น (Temperature pull-down) ตามมาตรฐาน AS/NZS 4474.1 หัวข้อที่ 3.4 อุณหภูมิเก็บอาหาร (Storage temperature) และการใช้พลังงานไฟฟ้า (Energy consumption) ตามมาตรฐาน ISO 15502 หัวข้อที่ 13 และ 15 ตามลำดับ



รูปที่ 3 แผนผังการติดตั้งการทดสอบการทำความเย็น

#### 2.3 การทดสอบการกัดกร่อน

ทำการทดสอบด้วยการวิเคราะห์ทางไฟฟ้าเคมีด้วยเทคนิค แอโนดิกโพราไรเซชัน (Anodic

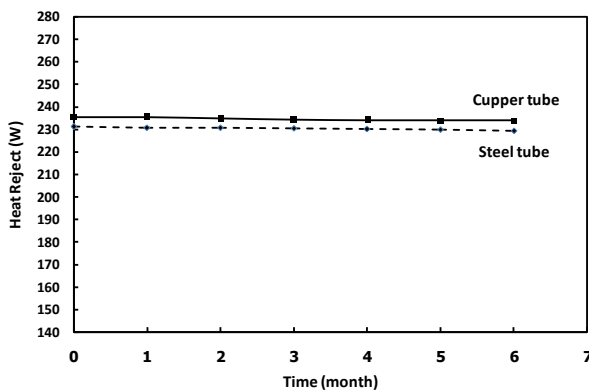
## AMM-94

Polarization) ในสารละลาย 0.1M NaCl + 0.5M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> โดยใช้เครื่องโพเทนชิโอแอสแตท (Potentiostat) รุ่น Reference 600 GAMRY INSTRUMENTS Co., Ltd. และการกัดกร่อนแบบพ่นละอองเกลือ NaCl ความเข้มข้น 5% ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM B-117 ด้วยเครื่องทดสอบการพ่นละอองเกลือรุ่น QC-711 COMETECH Co.,Ltd. ระยะเวลาในการทดสอบ 120 ชั่วโมง ทั้งสองการทดลองใช้ท่อคอนเดนเซอร์ที่ทำจากท่อเหล็กเคลือบสังกะสีและท่อทองแดงที่ยังไม่ผ่านการใช้งานและที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว 6 เดือน เป็นตัวอย่างสำหรับการทดสอบ

### 3. ผลการทดลอง

#### 3.1 ผลการเปรียบเทียบถ่ายเทความร้อนของคอนเดนเซอร์

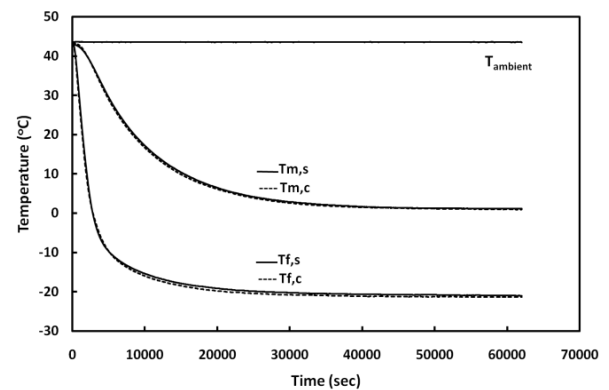
รูปที่ 4 แสดงผลการเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนระหว่างคอนเดนเซอร์ที่ใช้ท่อทองแดงและท่อเหล็กเคลือบสังกะสี ซึ่งพบว่า ทั้งท่อเหล็กเคลือบสังกะสีและท่อทองแดงมีการถ่ายเทความร้อนลดลงตลอดการใช้งานเป็นระยะเวลา 6 เดือน ที่ระยะเวลาการใช้งานตั้งแต่เริ่มต้นจนถึง 6 เดือนโดยทำการทดสอบทุกๆ เดือนพบว่าท่อทองแดงมีค่าการถ่ายเทความร้อนมากกว่าท่อเหล็กเคลือบสังกะสีเฉลี่ยตลอดช่วงอายุ 6 เดือน 1.79% การถ่ายเทความร้อนของท่อทองแดงเปรียบเทียบระหว่างเดือนที่ 0 และเดือนที่ 6 ลดลง 0.65% และท่อเหล็กเคลือบสังกะสีลดลง 0.76% ตามลำดับ



รูปที่ 4 การถ่ายเทความร้อนจากคอนเดนเซอร์เปรียบเทียบ

#### 3.2 ผลการเปรียบเทียบความสามารถในการทำความเย็น

การทดสอบ Temperature Pull Down เป็นการทดสอบความสามารถในการลดอุณหภูมิภายในตู้เย็นจากอุณหภูมิห้องลงมาที่อุณหภูมิที่กำหนด คือ ช่องแช่เย็นและช่องแช่แข็ง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 8 °C และ -13 °C ตามลำดับ การทดสอบทำตามมาตรฐาน AS/NZS 4474.1 หัวข้อ 3.4 ภายใต้อุณหภูมิห้องทดสอบที่ 43 °C ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งพบว่าตู้เย็นที่ใช้ท่อทองแดงและท่อเหล็กเคลือบสังกะสีเป็นคอนเดนเซอร์ มีความสามารถในการลดอุณหภูมิใกล้เคียงกัน โดยตู้เย็นที่ใช้ท่อเหล็กเคลือบสังกะสีทำคอนเดนเซอร์มีค่า Pull down time สำหรับช่องแช่เย็นและช่องแช่แข็งเท่ากับ 4 ชั่วโมง 57 นาที และ 2 ชั่วโมง 1 นาที ตามลำดับ ซึ่งเป็นอัตราที่เร็วกว่าที่มาตรฐานกำหนดไว้ว่าต้องใช้เวลาไม่เกิน 6 ชั่วโมง ค่า Pull down time ของตู้เย็นที่ใช้ท่อเหล็กเคลือบสังกะสีทำคอนเดนเซอร์มีค่ามากกว่าตู้เย็นที่ใช้ท่อทองแดงทำคอนเดนเซอร์เล็กน้อยคือ 10 นาที (ช่องแช่เย็น) และ 7 นาที (ช่องแช่แข็ง)

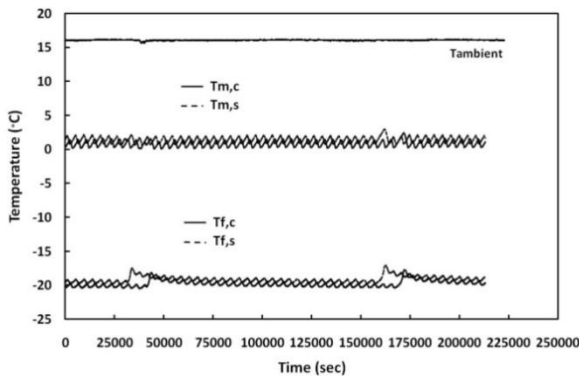


รูปที่ 5 Temperatures Pull Down Time

T<sub>f,s</sub> อุณหภูมิเฉลี่ยช่องแช่แข็งตู้เย็นคอนเดนเซอร์ท่อเหล็ก, T<sub>m,s</sub> อุณหภูมิเฉลี่ยช่องแช่เย็นตู้เย็นคอนเดนเซอร์ท่อเหล็ก, T<sub>f,c</sub> อุณหภูมิเฉลี่ยช่องแช่แข็งตู้เย็นคอนเดนเซอร์ท่อทองแดง, T<sub>m,c</sub> อุณหภูมิเฉลี่ยช่องแช่เย็นตู้เย็นคอนเดนเซอร์ท่อทองแดง, T<sub>ambient</sub> อุณหภูมิเฉลี่ยของห้องทดสอบ

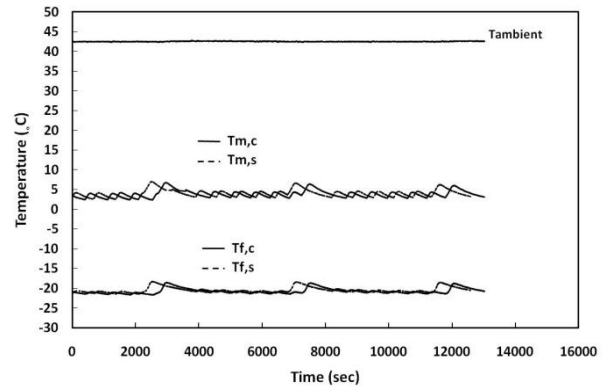
## AMM-94

การทดสอบ Storage Temperature เป็นการทดสอบความสามารถในการทำความเย็นของตู้เย็นให้ได้ตามที่มาตรฐานกำหนด คือช่องแช่เย็นอุณหภูมิกายในต้องมีค่าอยู่ระหว่าง  $0^{\circ}\text{C}$  ถึง  $8^{\circ}\text{C}$  โดยค่าเฉลี่ยต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับ  $4^{\circ}\text{C}$  ช่องแช่แข็งอุณหภูมิต้องต่ำกว่า  $-18^{\circ}\text{C}$  วิธีการทดสอบทำตามมาตรฐาน ISO 15502 หัวข้อที่ 13 ซึ่งกำหนดให้ทดสอบ 2 ครั้งคือที่อุณหภูมิห้องทดสอบ  $16^{\circ}\text{C}$  และ  $43^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับ ผลการทดสอบ พบว่า ตู้เย็นที่ใช้ท่อทองแดงและท่อเหล็กเคลือบสังกะสีเป็นคอนเดนเซอร์มีความสามารถในการทำความเย็น (อุณหภูมิกายใน) ใกล้เคียงกัน โดยตู้เย็นที่ใช้ท่อเหล็กเคลือบสังกะสีทำคอนเดนเซอร์ ค่า Storage Temperature ที่วัดได้จากการทดสอบที่อุณหภูมิกายในห้องทดสอบ  $16^{\circ}\text{C}$  เท่ากับ  $-19.2^{\circ}\text{C}$  (ช่องแช่แข็ง) และ  $1.3^{\circ}\text{C}$  (ช่องแช่เย็น) โดยมีค่าสูงกว่าตู้เย็นที่ใช้ท่อทองแดงทำคอนเดนเซอร์  $0.6^{\circ}\text{C}$  (ช่องแช่แข็ง) และ  $0.5^{\circ}\text{C}$  (ช่องแช่เย็น) ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 Storage temperatures ที่อุณหภูมิกายใน  $16^{\circ}\text{C}$

สำหรับการทดสอบที่อุณหภูมิกายในห้องทดสอบ  $43^{\circ}\text{C}$  อุณหภูมิกายในตู้เย็นที่ใช้ท่อเหล็กเคลือบสังกะสีเป็นคอนเดนเซอร์มีค่าเท่ากับ  $-20.8^{\circ}\text{C}$  (ช่องแช่แข็ง) และ  $3.6^{\circ}\text{C}$  (ช่องแช่เย็น) โดยมีค่าสูงกว่าตู้เย็นที่ใช้ท่อทองแดงทำคอนเดนเซอร์  $0.3^{\circ}\text{C}$  (ช่องแช่แข็ง) และ  $0.1^{\circ}\text{C}$  (ช่องแช่เย็น) ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 Storage temperatures ที่อุณหภูมิกายใน  $43^{\circ}\text{C}$

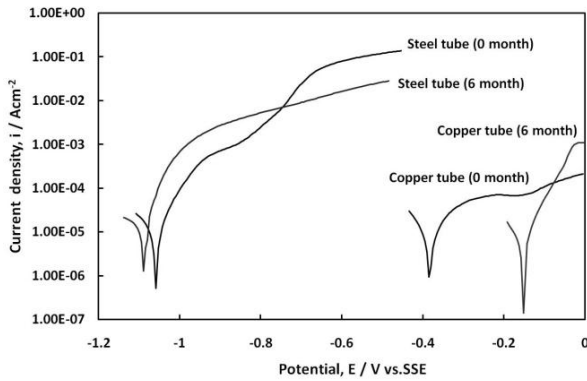
การทดสอบการใช้พลังงานไฟฟ้าตามมาตรฐาน ISO 15502 หัวข้อที่ 15 ที่อุณหภูมิกายในห้องทดสอบ  $32^{\circ}\text{C}$  พบว่าตู้เย็นที่ใช้ท่อทองแดงทำคอนเดนเซอร์ใช้พลังงานไฟฟ้า  $0.809\text{ kWh/day}$  ตู้เย็นที่ใช้ท่อเหล็กทำคอนเดนเซอร์ใช้พลังงานไฟฟ้า  $0.840\text{ kWh/day}$  ซึ่งต่างกัน  $3.7\%$

ในปัจจุบันมาตรฐานการทำความเย็นนั้น ได้ถูกนำมาเป็นตัวกำหนดการออกแบบ เพื่อให้ผ่านมาตรฐานเนื่องจากหลายประเทศได้ประกาศเป็นกฎหมายบังคับใช้ เช่น มาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก.) ของประเทศไทย จึงมีความจำเป็นต้องดำเนินการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบผล

### 3.3 ผลการทดสอบการกัดกร่อน

จากผลการศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของท่อคอนเดนเซอร์ที่ทำจากทองแดงและเหล็กเคลือบสังกะสีที่มีอายุการใช้งานต่างกัน คือ 0 เดือน และ 6 เดือน ด้วยเครื่องเครื่อง Potentiostat ในสารละลาย  $0.1\text{M NaCl} + 0.5\text{M Na}_2\text{SO}_4$  ได้ผลการทดลองดังแสดงด้วยเส้นโค้งโพราไรเซชันดังแสดงในรูปที่ 8 จากเส้นโค้งโพราไรเซชันของชิ้นงานท่อเหล็กและท่อทองแดงสามารถหาค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion potential,  $E_{\text{corr}}$ ) และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Current density,  $I$ ) ได้ ซึ่งพบว่าท่อทองเคลือบสังกะสีเริ่มเกิดการกัดกร่อนก่อนท่อทองแดง เนื่องจากมีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนต่ำกว่า

## AMM-94



รูปที่ 8 แอนโอดิกโพรไฟล์เซชันของท่อเหล็กและท่อทองแดงที่อายุการใช้งาน 0 เดือน และ 6 เดือน

นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบท่อเหล็กเคลือบสังกะสีที่มีอายุการใช้งาน 0 เดือน และ 6 เดือน พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนมีแนวโน้มใกล้เคียงกันโดยมีค่าเท่ากับ  $-1.058 V_{SSE}$  และ  $-1.089 V_{SSE}$  ตามลำดับ แสดงว่าท่อทั้งสองเริ่มเกิดการกัดกร่อน ณ เวลาใกล้เคียงกันโดยท่อที่ผ่านการใช้งาน 6 เดือนจะเกิดการกัดกร่อนก่อนเนื่องจากมีค่า  $E_{corr}$  ต่ำกว่า เนื่องจากมาจากท่อเหล็กเคลือบสังกะสีที่ผ่านการใช้งานมาแล้วจะเกิดการกัดกร่อนขึ้นตามธรรมชาติก่อนนำท่อมาทดสอบ ทำให้ผิวเคลือบมีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนลดลง โดยสังกะสีจะมีพฤติกรรมการป้องกันการกัดกร่อนด้วยการจ่ายอิเล็กตรอน ซึ่งหมายถึงความสามารถในการสูญเสียอิเล็กตรอนของพื้นผิวเคลือบเพื่อป้องกันการกัดกร่อนนั่นเอง

เมื่อเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของท่อทองแดง พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนมีค่าเท่ากับ  $-0.3842 V_{SSE}$  (0 เดือน) และ  $-0.1517 V_{SSE}$  (6 เดือน) ซึ่งกล่าวได้ว่าท่อทองแดงที่ 6 เดือนเริ่มเกิดการกัดกร่อนช้ากว่าเนื่องจากท่อทองแดงที่ผ่านการใช้งานมาแล้วจะเกิดออกไซด์ฟิล์ม ซึ่งจะทำหน้าที่ป้องกันการกัดกร่อนในตอนต้น ในขณะที่เดียวกันเมื่อค่าศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น พบว่าค่าความหนาแน่นของกระแสท่อทองแดงที่ 0 เดือนจะไม่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเกิดพาสซีฟฟิล์ม (passive film) บนผิวซึ่งจะทำหน้าที่ในการ

ต้านทานการกัดกร่อนในช่วงดังกล่าว เมื่อพิจารณาที่ 6 เดือนเมื่อศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นค่าความหนาแน่นกระแสจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเพราะไม่มีพาสซีฟฟิล์ม (passive film) ทำหน้าที่ต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากพาสซีฟฟิล์ม (passive film) ได้ถูกทำลายไปที่จุดที่เริ่มเกิดการกัดกร่อน

การทดสอบการกัดกร่อนแบบพ่นละอองเกลือเป็นการสังเกตพฤติกรรมการกัดกร่อนบนผิวชิ้นงานที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลาและหาอัตราการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นโดยประเมินจากน้ำหนักที่สูญหายไป (Weight loss) โดยอัตราการกัดกร่อนคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$R_{mpy} = \frac{534W}{dAT} \quad (2)$$

$R_{mpy}$  คือ อัตราการกัดกร่อน (mg/year)

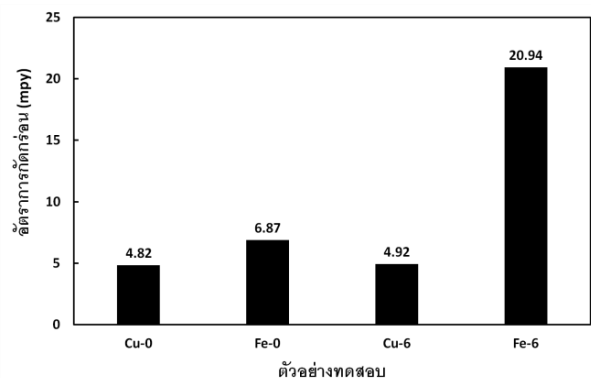
W คือ น้ำหนักที่หายไป (mg)

d คือ ความหนาแน่น ( $g/cm^3$ )

A คือ พื้นที่ของชิ้นงานที่ทำการกัดกร่อน ( $in^2$ )

T คือ เวลาในการทดสอบ (hr)

ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 9 ซึ่งพบว่า ท่อเหล็กเคลือบสังกะสีที่อายุการใช้งาน 0 เดือน (Fe-0) และ 6 เดือน (Fe-6) มีอัตราการกัดกร่อนเท่ากับ 20.94 mg/year และ 6.87 mg/year ตามลำดับ โดยที่ท่อทองแดงอายุการใช้งาน 0 เดือน (Cu-0) และ 6 เดือน (Cu-6) มีอัตราการกัดกร่อนใกล้เคียงกัน คือ 4.82 mg/year และ 4.92 mg/year ตามลำดับ



รูปที่ 9 อัตราการกัดกร่อนจากการทดสอบ Salt spray

## AMM-94

### 4. สรุปผล

จากการทดสอบเปรียบเทียบระหว่างตู้เย็นที่ใช้ท่อทองแดงและท่อเหล็กเคลือบสังกะสีทำคอนเดนเซอร์ ผลการทดสอบพบว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยระหว่างช่วงการทดสอบ 6 เดือนของตู้เย็นต่างกัน 1.79% การลดลงของอุณหภูมิภายในของตู้เย็นที่ใช้ท่อเหล็กเคลือบสังกะสีทำคอนเดนเซอร์ เฉลี่ยช้ากว่า 10 นาที ในช่องแช่เย็นและช้ากว่า 7 นาที สำหรับช่องแช่แข็ง อุณหภูมิเก็บอาหารเฉลี่ยภายในช่องแช่แข็งและช่องแช่เย็นของตู้เย็นมีค่าใกล้เคียงกันและการใช้พลังงานไฟฟ้าของตู้เย็นที่ใช้ท่อทองแดงทำคอนเดนเซอร์ต่ำกว่าท่อเหล็กเคลือบสังกะสี 3.7 %

การศึกษาการกัดกร่อนด้วยการวิเคราะห์ทางไฟฟ้าเคมีด้วยเทคนิคแอนโอดิก โพรราไรเซชัน ในสารละลาย 0.1M NaCl + 0.5M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> เปรียบเทียบกัน พบว่าท่อเหล็กเคลือบสังกะสีเกิดการกัดกร่อนก่อนท่อทองแดง การกัดกร่อนแบบพ่นละอองเกลือ NaCl ความเข้มข้น 5% พบว่าอัตราการกัดกร่อน ท่อเหล็กสูงกว่าท่อทองแดง โดยท่อเหล็กเคลือบสังกะสีที่ผ่านการใช้งานแล้วมีอัตราการกัดกร่อนสูงสุด 20.94 mpy เมื่อพิจารณาผลกระทบต่อต้นทุนจากการเปลี่ยนวัสดุที่ใช้ทำคอนเดนเซอร์จากท่อทองแดงเป็นท่อเหล็กเคลือบสังกะสีพบว่า ทำให้ต้นทุนวัสดุของตู้เย็นลดลง 3% ต่อตู้

### 5. เอกสารอ้างอิง

[1] P.K. Bansal and T.C. Chin. (2002). Design and modeling of hot-wall condensers in domestic refrigerators, *Applied Thermal Engineering*. vol. 22, no. 14, pp. 1601–1617.

[2] J.K. Gupta and M. Ram Gopal. (2008). Modeling of hot-wall condensers for domestic refrigerators, *International journal of refrigeration*, vol. 31, no. 6, pp. 979–988.

[3] A. Rebora and L.A. Tagliafico. (1998). Thermal performance analysis for hot-wall condenser and

evaporator configurations in refrigeration appliances, *International journal of refrigeration*, vol. 21, no. 6, pp. 490–502.

[4] H. Zhang, J. Li, and H. Li. (2010). Numerical Simulations of a Micro-Channel Wall-Tube Condenser for Domestic Refrigerators, *Tsinghua Science Technology*, vol. 15, no. 4, pp. 426–433.

[5] C.J.L. Hermes and C. Melo. (2009). Assessment of the energy performance of household refrigerators via dynamic simulation, *Applied Thermal Engineering*, vol. 29, no. 5–6, pp. 1153–1165.

[6] C.J.L. Hermes, C. Melo, F.T. Knabben, and J.M. Gonçalves. (2009). Prediction of the energy consumption of household refrigerators and freezers via steady-state simulation, *Applied Thermal Engineering*, vol. 86, no. 7–8, pp. 1311–1319.

[7] R. Saidur, H.H. Masjuki, and I.A. Choudhury. (2002). Role of ambient temperature, door opening, thermostat setting position and their combined effect on refrigerator-freezer energy consumption, *Energy Convers. Manag.*, vol. 43, no. 6, pp. 845–854.

[8] www.bangkokbank.com. ราคาโลหะสำคัญในตลาดโลก เดือน ส.ค. 2556. รายงานผลการวิจัย. ดาวน์โหลด 26 พย. 2556.

[9] ISO 15502. (2005). Household refrigerating appliances – characteristics and test methods, *International Organization for Standardization*, Geneva, Switzerland.

[10] AS/NZS 4474.1 (2007). Performance of household electrical appliances - Refrigerating appliances Part 1 : Energy consumption and performance, *Standards Australia*, Sydney, Australia.



**AMM-94**