

สมบัติทางกลและทางเคมีกายภาพของวัสดุท่อเทอร์โมไซฟอนชนิดทองแดง ที่จุ่มแชในโมลาส

MECHANICAL AND PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF COPPER THERMOSYPHON MATERIAL SUBMERGED IN MOLASSES

ธนศิษฐ์ วงศ์ศิริอำนวย, นำพร ปัญญโญใหญ่ และ ทิพาพร คำแดง*

Thanasit Wongsiriamnuay, Numpon Panyoyai and Tipapon Khamdaeng*

สาขาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ เพื่อวิเคราะห์สมบัติทางกลและทางเคมีกายภาพของวัสดุท่อเทอร์โมไซฟอนชนิดทองแดงที่จุ่มแชในโมลาส ใช้ขึ้นทดสอบทองแดงขนาดตามมาตรฐาน ASTM E8M จุ่มแชในโมลาส โดยแปรค่าอุณหภูมิที่ 25 40 60 และ 80 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการจุ่มแชที่ 720, 1,440 และ 2,160 ชั่วโมง ทดสอบแรงดึงเพื่อวิเคราะห์สมบัติทางกลจากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด พบว่าเปอร์เซ็นต์การลดพื้นที่หน้าตัดแปรผันตรงกับระยะเวลาในการจุ่มแช การลดพื้นที่หน้าตัดสูงสุดมีค่าเท่ากับ 73.77 ± 1.09 เปอร์เซ็นต์ ที่ระยะเวลาในการจุ่มแช 2,160 ชั่วโมง นอกจากนี้ขึ้นทดสอบที่จุ่มแชในโมลาสที่ระยะเวลาในการจุ่มแชแตกต่างกัน มีค่าการลดพื้นที่หน้าตัดเฉลี่ยมากกว่าขึ้นทดสอบที่ไม่ได้จุ่มแชในโมลาส 1.2 เท่า จากผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพโดยใช้เทคนิค SEM-EDS พบว่าปริมาณธาตุทองแดงลดลงเมื่อใช้ระยะเวลาในการจุ่มแชนานขึ้น จากผลการวิเคราะห์ที่ได้สามารถนำไปเป็นข้อมูลเพื่อเลือกวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการสร้างท่อเทอร์โมไซฟอนเพื่อนำไปแลกเปลี่ยนความร้อนในถังกักเก็บโมลาสได้

คำสำคัญ: ความเค้นแรงดึง, เทอร์โมไซฟอน, โมลาส, สมบัติทางกล, สมบัติทางเคมีกายภาพ

* ผู้ประสานงาน: ทิพาพร คำแดง

อีเมล: tipapon@mju.ac.th

ABSTRACT

This research aimed to determine the mechanical and physicochemical properties of copper thermosyphon materials submerged in molasses. The copper specimens with the ASTM E8M standard size were prepared and submerged in molasses with the temperature was varied from 25 to 40, 60, and 80 °C, and the submerged times of 720, 1,440, and 2,160 hours. The tensile tests were performed to estimate the mechanical properties from the stress and strain relation. The results showed that percentages of cross-sectional area reduction were directly related with submerged times. The maximum area reduction was equal to $73.77 \pm 1.09\%$ at submerged time of 2,160 hours. The area reduction of specimens submerged in molasses with different submerged durations was averagely 1.2 times higher than that without submerging in molasses. From the physicochemical properties analysis using SEM-EDS technique, it was found that copper content decreased when submerged time increased. These results could be used as the data for material selection of thermosyphon operating in molasses storage tank.

KEYWORDS: tensile strength, thermosyphon, molasses, mechanical properties, physicochemical properties

บทนำ

ปัจจุบันโมลาสมีบทบาทสำคัญต่อภาคอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถนำไปใช้เป็นวัตถุดิบการผลิตในหลากหลายอุตสาหกรรม ไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมพลังงาน สำหรับการผลิตเอทานอลเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า และใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตแก๊สโซฮอล์ อุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม การผลิตแอลกอฮอล์สำหรับการผลิตสุรา การผลิตกรดน้ำส้ม ผงชูรส น้ำส้มสายชู ซีอิ๊ว และซอสปรุงรส เป็นต้น รวมถึงการผลิตยีสต์ เพื่อเป็นวัตถุดิบในการผลิตโปรตีนในอาหารสัตว์ ใช้เลี้ยงสัตว์ ใช้ทำปุ๋ย ใช้ทำน้ำสกัดชีวภาพ

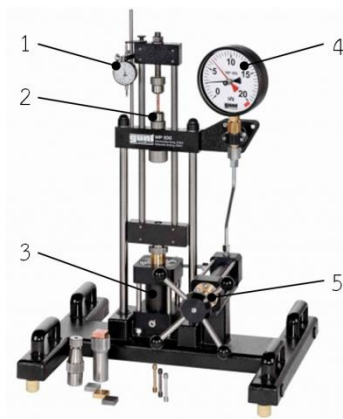
และใช้บำบัดน้ำเสียทั้งในครัวเรือนและอุตสาหกรรม (Pant and Adholeya, 2007; Silalertruksa et al., 2015)

ในระบบอุตสาหกรรมนั้น การเก็บรักษาโมลาสต้องเก็บในถังที่มีขนาดใหญ่ทรงกลมสูง มีความแข็งแรงทนทานต่อความร้อนสูงได้ รอบถังจะมีขอบรับโมลาสในกรณีที่เกิดล้นออกมานอกถังเก็บและจะมีบ่อรวมอยู่ในด้านถัดไปเป็นการป้องกันในกรณีที่โมลาสล้นถัง โดยตัวแปรสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อการณ์ออกจากถังของโมลาส คืออุณหภูมิภายในถังโมลาส โดยที่ถังโมลาสของแต่ละโรงงานจะมีขนาดแตกต่างกันตามปริมาณการผลิตของแต่ละโรงงาน สำหรับโรงงานอุตสาหกรรมในปัจจุบันได้มีการเลือกใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในหลายรูปแบบในการพัฒนาอุตสาหกรรมเพื่อให้เหมาะสมกับวัตถุดิบชนิดต่าง ๆ อีกทั้งการรักษาสภาพของวัตถุดิบ คุณสมบัติด้าน สี กลิ่น ตลอดจนคุณค่าทางอาหาร ให้คงสภาพอยู่ให้ได้มากที่สุด ในงานวิจัยนี้ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อเทอร์โมไซฟอนจึงถูกนำมาศึกษาสำหรับใช้ในการลดอุณหภูมิหรือระบายความร้อนของโมลาสภายในถังเพื่อให้คงอยู่ในสภาวะอุณหภูมิที่เหมาะสมตลอดเวลาในระยะเวลาตามต้องการ เนื่องจากท่อเทอร์โมไซฟอนมีลักษณะพิเศษต่างจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดอื่น ๆ คือ สามารถส่งถ่ายความร้อนได้ดี แม้ว่าแหล่งรับความร้อนและแหล่งระบายความร้อนอยู่ห่างกันมาก ๆ ไม่ต้องการพลังงานจากภายนอก สร้างและติดตั้งง่าย มีค่าอัตราการคืนทุนต่ำ และยังคงสะดวกต่อการบำรุงรักษา

นอกจากนี้วัสดุท่อเทอร์โมไซฟอนที่เลือกใช้ในการสร้างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะต้องไม่มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลและสมบัติทางเคมีในระหว่างกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน อีกทั้งจะต้องมีคุณสมบัติในการต้านทานการกัดกร่อน เนื่องจากมีรายงานพบว่าการกัดกร่อนมีผลต่อสมบัติทางกลของวัสดุ (Garbatov et al., 2014; Martínez et al., 2018; Sheng and Xia, 2017) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาสมบัติทางกลและทางเคมีกายภาพของวัสดุท่อเทอร์โมไซฟอนชนิดทองแดงที่จุ่มแช่ในโมลาสที่อุณหภูมิและระยะเวลาในการจุ่มแช่แตกต่างกัน เพื่อนำไปเป็นข้อมูลในการเลือกใช้วัสดุท่อเทอร์โมไซฟอนสำหรับการแลกเปลี่ยนความร้อนในถังกักเก็บโมลาสต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

เตรียมชิ้นทดสอบทองแดงขนาดตามมาตรฐาน ASTM E8M (ASTM, 2003) สำหรับใช้ในการทดสอบแรงดึง ศึกษาผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการจุ่มแช่ที่มีต่อสมบัติทางกลและสมบัติทางเคมีของชิ้นทดสอบทองแดง ทดสอบโดยนำชิ้นทดสอบไปจุ่มแช่ในโมลาสที่อุณหภูมิ 25 40 60 และ 80 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการจุ่มแช่ที่ 720, 1,440 และ 2,160 ชั่วโมง นำชิ้นทดสอบปกติ (ไม่ได้จุ่มแช่โมลาส) และชิ้นทดสอบที่จุ่มแช่ตามเงื่อนไขที่กำหนดมาทดสอบแรงดึงด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (Universal material tester, WP300, Gunt Hamburg, Berlin, Germany) ดังแสดงในรูปที่ 1 จากนั้นนำค่าจากการทดสอบมาสร้างเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเพื่อหาค่าสมบัติทางกลต่าง ๆ ได้แก่ โมดูลัสความยืดหยุ่น ความเค้นที่จุดคราก ความเครียดที่จุดคราก การลดพื้นที่หน้าตัด และความต้านทานแรงดึงสูงสุด ส่วนการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างชิ้นทดสอบปกติ (ไม่ได้จุ่มแช่โมลาส) และชิ้นทดสอบที่จุ่มแช่ในโมลาส สามารถตรวจสอบโดยใช้เทคนิค SEM-EDS (FE-Scanning Electron Microscope, JSM 6335 F, JEOL Ltd.) เพื่อหาค่าการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของธาตุทางเคมีและลักษณะพื้นผิวของชิ้นทดสอบ



รูปที่ 1 เครื่องทดสอบแรงดึงพร้อมอุปกรณ์สำหรับการทดสอบแรงดึง ประกอบด้วย

- (1) มาตรฐานวัดระยะยืด (2) หัวจับชิ้นทดสอบ (3) กระจบอกไฮดรอลิก
- (4) มาตรฐานวัดแรง และ (5) ล้อมือ

ที่มา: www.gunt.de/en/products/materials-testing-20kn

การทดสอบแรงดึงเริ่มจากนำชิ้นทดสอบทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ความยาวพิกัด (Gauge length) 30 มิลลิเมตร ที่มีขนาดตามมาตรฐาน ASTM E8M มาติดตั้งเข้ากับหัวจับให้แน่น จากนั้นปรับค่าแรงและระยะยืดเริ่มต้นให้เป็นศูนย์ เริ่มการให้แรงดึงโดยการหมุนล้อมือ (Hand wheel) ตามเข็มนาฬิกาด้วยความเร็วคงที่ ทดสอบจนกระทั่งชิ้นทดสอบขาดออกจากกัน ในการทดสอบนี้ แรงและระยะยืดที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างการทดสอบสามารถวัดได้จากอุปกรณ์รับ กล่าวคือโพลดเซลล์และเซนเซอร์ตรวจวัดตำแหน่งแบบอิเล็กทรอนิกส์ และส่งสัญญาณผ่านตัวขยายสัญญาณและแปลงเป็นข้อมูลเพื่อนำไปแสดงภาพบนจอคอมพิวเตอร์ โดยข้อมูลที่ได้แสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะยืด จากนั้นจึงใช้สมการ (1) และ (2) เพื่อคำนวณเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด และใช้สมการ (3) ถึง (7) ในการคำนวณเพื่อหาสมบัติทางกลของชิ้นทดสอบ

สมการสำหรับการคำนวณสมบัติทางกลมีดังนี้

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (1)$$

โดยที่ σ คือ ความเค้น หน่วยเป็นเมกะปาสคาล

F คือ แรง หน่วยเป็นนิวตัน

A_0 คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบก่อนดึง หน่วยเป็นตารางมิลลิเมตร

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2)$$

โดยที่ ϵ คือ ความเครียด

ΔL คือ ความยาวที่เปลี่ยนแปลงไป หน่วยเป็นมิลลิเมตร

L_0 คือ ความยาวของชิ้นทดสอบก่อนดึง หน่วยเป็นมิลลิเมตร

$$\%RA = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100 \quad (3)$$

โดยที่ $\%RA$ คือ เปอร์เซ็นต์การลดพื้นที่หน้าตัด หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์

A_f คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบหลังดึง หน่วยเป็นตารางมิลลิเมตร

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (4)$$

โดยที่ E คือ โมดูลัสความยืดหยุ่น หน่วยเป็นเมกะปาสคาล

$$\sigma_y = \frac{F_{0.2\% \varepsilon}}{A_0} \quad (5)$$

โดยที่ σ_y คือ ความเค้นที่จุดคราก หน่วยเป็นเมกะปาสคาล
 $F_{0.2\% \varepsilon}$ คือ แรงที่ 0.2 เปอร์เซ็นต์ของความเครียด ลากขนานไปกับส่วนที่เป็นเส้นตรงได้เป็นจุดตัดบนกราฟ หน่วยเป็นนิวตัน

$$\varepsilon_y = \frac{\Delta L_{0.2\% \varepsilon}}{L_0} \quad (6)$$

โดยที่ ε_y คือ ความเครียดที่จุดคราก
 $\Delta L_{0.2\% \varepsilon}$ คือ ความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปที่ 0.2 เปอร์เซ็นต์ของความเครียด ลากขนานไปกับส่วนที่เป็นเส้นตรงได้เป็นจุดตัดบนกราฟ หน่วยเป็นมิลลิเมตร

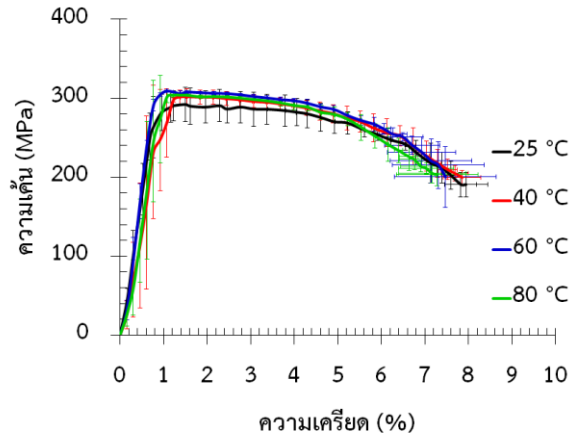
$$\sigma_u = \frac{F_{\max}}{A_0} \quad (7)$$

โดยที่ σ_u คือ ความต้านทานแรงดึงสูงสุด หน่วยเป็นเมกะปาสคาล
 F_{\max} คือ แรงดึงสูงสุด หน่วยเป็นนิวตัน

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ผลของอุณหภูมิโมลาสต่อสมบัติทางกล

รูปที่ 2 แสดงผลความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของชิ้นทดสอบทองแดงที่อุณหภูมิการจุ่มแช่ 25 40 60 และ 80 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลาจุ่มแช่ 2,160 ชั่วโมง



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของชิ้นทดสอบทองแดง ที่อุณหภูมิการจุ่มแช่แตกต่างกัน ที่ระยะเวลาจุ่มแช่ 2,160 ชั่วโมง

ตารางที่ 1 และตารางที่ 2 แสดงผลของอุณหภูมิโมลาสต่อสมบัติทางกลของชิ้นทดสอบทองแดง พบว่าอุณหภูมิโมลาสที่เปลี่ยนแปลงไปมีผลต่อโมดูลัสความยืดหยุ่นและความเครียดคราก โดยที่อุณหภูมิการจุ่มแช่ 40 และ 80 องศาเซลเซียส โมดูลัสความยืดหยุ่นมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิโมลาสเพิ่มขึ้น ส่วนความเครียดครากมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิโมลาส สมบัติทางกลที่เหลือคือ ความเค้นคราก การลดพื้นที่หน้าตัดและความต้านทานแรงดึงสูงสุด พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของโมลาสที่เปลี่ยนแปลงไป

ตารางที่ 1 สมบัติทางกลของชิ้นทดสอบที่จุ่มแช่ในโมลาสที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ (°C)	โมดูลัสความยืดหยุ่น (GPa)	ความเค้นคราก (MPa)	ความเครียดคราก (%)
25	40.40 (6.12) ^b	310.00 (9.56) ^a	1.01 (0.06) ^a
40	33.75 (4.15) ^a	299.44 (5.50) ^a	1.19 (0.15) ^b
60	40.68 (2.85) ^b	306.44 (1.40) ^a	1.00 (0.05) ^a
80	35.34 (1.76) ^{ab}	298.33 (12.1) ^a	1.10 (0.08) ^{ab}

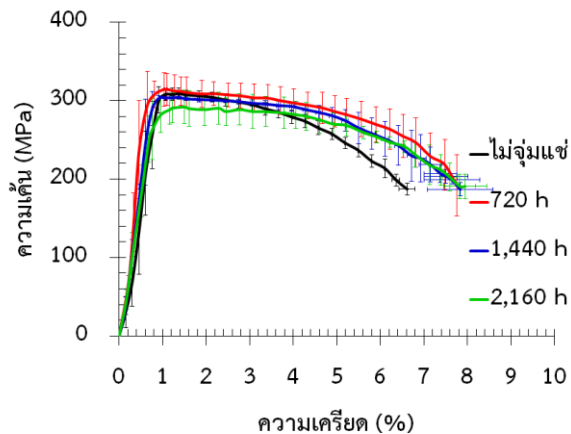
หมายเหตุ: ข้อมูลในตารางแสดงเป็น ค่าเฉลี่ย (ค่าเบี่ยงเบน) ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแต่ละหลักที่แตกต่างกันแสดงค่าความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$)

ตารางที่ 2 สมบัติทางกลของชิ้นทดสอบที่จุ่มแช่ในโมลาสที่อุณหภูมิต่าง ๆ (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	การลดพื้นที่หน้าตัด (%)	ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (MPa)
25	74.51 (1.07) ^a	303.63 (9.96) ^a
40	66.55 (4.58) ^a	302.02 (0.71) ^a
60	70.64 (2.37) ^a	310.29 (2.05) ^a
80	65.43 (7.71) ^a	303.48 (9.10) ^a

หมายเหตุ: ข้อมูลในตารางแสดงเป็น ค่าเฉลี่ย (ค่าเบี่ยงเบน) ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแต่ละหลักที่แตกต่างกันแสดงค่าความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$)

ผลของระยะเวลาในการจุ่มแช่ต่อสมบัติทางกล



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของชิ้นทดสอบทองแดงที่ไม่ได้จุ่มแช่และจุ่มแช่เป็นระยะเวลาแตกต่างกัน ที่อุณหภูมิการจุ่มแช่ 25 องศาเซลเซียส

รูปที่ 3 แสดงผลความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของชิ้นทดสอบทองแดงที่ไม่ได้จุ่มแช่และจุ่มแช่เป็นระยะเวลา 720 1,440 และ 2,160 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิการจุ่มแช่ 25 องศาเซลเซียส ตารางที่ 3 และตารางที่ 4 แสดงผลของระยะเวลาในการจุ่มแช่ต่อสมบัติทางกลของชิ้นทดสอบทองแดง พบว่าสมบัติทางกลมีแนวโน้มคล้ายกับผลในตารางที่ 1 กล่าวคือโมดูลัสความยืดหยุ่นและความเครียดครากมีการเปลี่ยนแปลงไปตาม

ระยะเวลาการจุ่มแช่ โดยพบว่าโมดูลัสความยืดหยุ่นมีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้ระยะเวลาในการจุ่มแช่นานขึ้น ส่วนความเคียดครากมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ระยะเวลาในการจุ่มแช่นานขึ้น

ตารางที่ 3 สมบัติทางกลของชิ้นทดสอบปกติ (ไม่ได้จุ่มแช่โมลาส) และชิ้นทดสอบที่จุ่มแช่ในโมลาสที่ระยะเวลาต่าง ๆ

เวลา (h)	โมดูลัสความยืดหยุ่น (GPa)	ความเค้นคราก (MPa)	ความเคียดคราก (%)
ไม่จุ่มแช่	34.74 (4.95) ^{ab}	310.00 (10.0) ^a	1.10 (0.10) ^{ab}
720	41.10 (4.64) ^b	298.75 (10.7) ^a	1.00 (0.06) ^a
1,440	38.73 (3.08) ^{ab}	302.92 (6.71) ^a	1.04 (0.05) ^{ab}
2,160	32.81 (3.14) ^a	300.67 (8.18) ^a	1.18 (0.14) ^b

หมายเหตุ: ข้อมูลในตารางแสดงเป็น ค่าเฉลี่ย (ค่าเบี่ยงเบน) ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแต่ละหลักที่แตกต่างกันแสดงค่าความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$)

ตารางที่ 4 สมบัติทางกลของชิ้นทดสอบปกติ (ไม่ได้จุ่มแช่โมลาส) และชิ้นทดสอบที่จุ่มแช่ในโมลาสที่ระยะเวลาต่าง ๆ (ต่อ)

เวลา (h)	การลดพื้นที่หน้าตัด (%)	ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (MPa)
ไม่จุ่มแช่	56.81 (11.1) ^a	313.57 (9.72) ^a
720	67.67 (5.20) ^{ab}	304.13 (8.82) ^a
1,440	66.41 (6.69) ^{ab}	308.61 (4.82) ^a
2,160	73.77 (1.09) ^b	301.84 (6.77) ^a

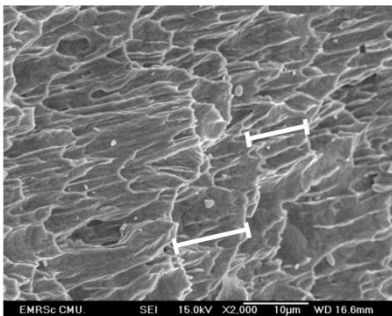
หมายเหตุ: ข้อมูลในตารางแสดงเป็น ค่าเฉลี่ย (ค่าเบี่ยงเบน) ตัวอักษรภาษาอังกฤษในแต่ละหลักที่แตกต่างกันแสดงค่าความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$)

นอกจากนี้ พบว่าการลดพื้นที่หน้าตัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ระยะเวลาในการจุ่มแช่นานขึ้นเช่นกัน เมื่อเปรียบเทียบการลดพื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบปกติที่ไม่ได้จุ่มแช่ในโมลาสกับชิ้นทดสอบที่จุ่มแช่ในโมลาส ที่ระยะเวลาในการจุ่มแช่แตกต่างกัน (720 1,440 และ 2,160 ชั่วโมง) พบว่ามีค่าต่างกันเฉลี่ยถึง 22.0 ± 6.9 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าระยะเวลา

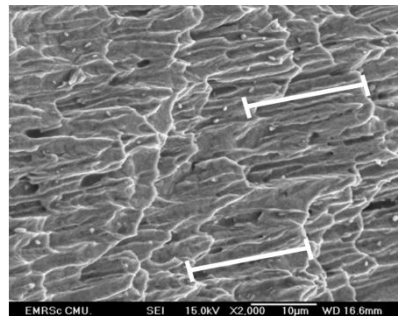
ในการจุ่มแช่มีผลต่อสมบัติทางกล (โมดูลัสความยืดหยุ่น ความเครียดคราก และการลดพื้นที่หน้าตัด) ของชิ้นทดสอบทองแดง

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพ

พื้นผิวของชิ้นทดสอบแบบปกติ (ไม่ได้จุ่มแช่โมลาส) และแบบที่จุ่มแช่ในโมลาส ที่ระยะเวลา 2,160 ชั่วโมง จากเทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า แสดงในรูปที่ 4(ก) และ 4(ข) ตามลำดับ พบว่าชิ้นทดสอบที่จุ่มแช่ในโมลาส ที่ระยะเวลา 2,160 ชั่วโมง จะมีระยะการยึดตัวของพื้นผิวเฉพาะตำแหน่งมากกว่า 10 ไมโครเมตร ซึ่งหากเปรียบเทียบกับชิ้นทดสอบแบบปกติแล้วพบว่า ส่วนมากจะมีระยะการยึดตัวของพื้นผิวเฉพาะตำแหน่งที่น้อยกว่า 10 ไมโครเมตร สอดคล้องกับผลของการทดสอบทางกลที่ว่า เมื่อใช้ระยะเวลาในการจุ่มแช่นานขึ้น ชิ้นทดสอบทองแดงจะมีความเหนียวเพิ่มขึ้น (ความเครียดครากและการลดพื้นที่หน้าตัดเพิ่มขึ้น)



(ก)

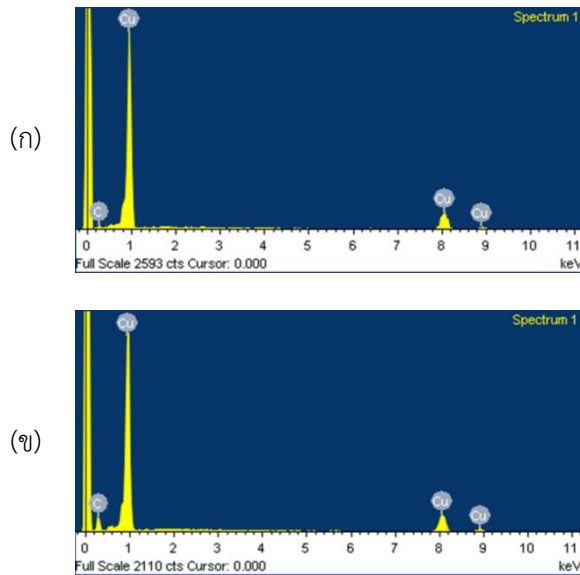


(ข)

รูปที่ 4 พื้นผิวชิ้นทดสอบทองแดง (ก) แบบปกติ และ (ข) แบบที่จุ่มแช่ในโมลาส ที่ระยะเวลา 2,160 ชั่วโมง จากเทคนิค SEM

การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของชิ้นทดสอบแบบปกติ (ไม่ได้จุ่มแช่โมลาส) และแบบที่จุ่มแช่ในโมลาส ที่ระยะเวลา 2,160 ชั่วโมง จากเทคนิค SEM-EDS แสดงในรูปที่ 5(ก) และ 5(ข) ตามลำดับ จากสเปกโตรเมตรีพบว่า ชิ้นทดสอบทองแดงประกอบด้วยธาตุหลักคือ Cu และธาตุเจือปนคือ C โดยหลังจากที่จุ่มแช่ชิ้นทดสอบในโมลาสเป็นระยะเวลา 2,160 ชั่วโมง พบว่าปริมาณ Cu ลดลงจาก 92.68 เป็น 74.65 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่วนปริมาณ C เพิ่มขึ้น

จาก 7.32 เป็น 25.35 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (ตารางที่ 5) ดังนั้นจากผลการวิเคราะห์ที่ได้ จึงสรุปได้ว่าชั้นทดสอบที่จุ่มแช่ในโมลาสเป็นระยะเวลา 2,160 ชั่วโมง จะมีปริมาณธาตุองค์ประกอบที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งเป็นผลทำให้สมบัติทางกลของชั้นทดสอบเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม



รูปที่ 5 สเปกโตรเมตรีของชั้นทดสอบทองแดง (ก) แบบปกติ และ (ข) แบบที่จุ่มแช่ในโมลาส ที่ระยะเวลา 2,160 ชั่วโมง จากเทคนิค SEM-EDS

ตารางที่ 5 ปริมาณธาตุองค์ประกอบของชั้นทดสอบปกติและชั้นทดสอบที่จุ่มแช่ในโมลาส ที่ระยะเวลา 2,160 ชั่วโมง

ธาตุ	ปริมาณ (wt.%)	
	ปกติ	จุ่มแช่ 2,160 ชั่วโมง
C	7.32	25.35
Cu	92.68	74.65
รวม	100	100

อุณหภูมิโมลาสมีผลต่อสมบัติทางกล (โมดูลัสความยืดหยุ่นและความเครียดคราก) ของขึ้นทสดอบทองแดง แต่อย่างไรก็ตามการแปรผันของสมบัติทางกลของขึ้นทสดอบทองแดง อาจเนื่องมาจากการหมุนล้อมือ (Hand wheel) ด้วยความเร็วที่ไม่คงที่ในช่วงแรกของการทดสอบ ทำให้ที่อุณหภูมิการจุ่มแช่ 40 และ 80 องศาเซลเซียส โมดูลัสความยืดหยุ่นและความเครียดครากของขึ้นทสดอบ มีค่าน้อยกว่าและมากกว่าค่าที่อุณหภูมิการจุ่มแช่ 25 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ดังนั้นเพื่อกำจัดข้อจำกัดดังกล่าว ในการทดสอบครั้งต่อไป จึงควรมีการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมความเร็วแบบอัตโนมัติ เพื่อควบคุมความเร็วในการหมุนล้อมือ (Hand wheel) ให้คงที่

ระยะเวลาในการจุ่มแช่มีผลต่อสมบัติทางกล (โมดูลัสความยืดหยุ่น ความเครียดคราก และการลดพื้นที่หน้าตัด) ของขึ้นทสดอบทองแดง โดยลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางกลคล้ายกับที่เกิดขึ้นในกระบวนการปรับปรุงสมบัติของโลหะโดยใช้กรรมวิธีทางความร้อนที่เรียกว่า การอบคืนตัว ซึ่งโลหะจะมีความแข็งแรงลดลงแต่มีความเหนียวเพิ่มขึ้น (Pandey et al., 2017) กล่าวคือโมดูลัสความยืดหยุ่นลดลง ความเครียดครากและการลดพื้นที่หน้าตัดเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาในการจุ่มแช่ในโมลาสที่อุณหภูมิต่าง ๆ มีค่าเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเพื่อให้เห็นผลที่ชัดเจนยิ่งขึ้นควรมีการทดสอบโดยใช้ระยะเวลาในการจุ่มแช่ให้นานขึ้น สอดคล้องกับผลวิจัยก่อนหน้าที่พบว่าระยะเวลาในการใช้งานท่อเทอร์โมโซโฟนในสภาวะแตกต่างกันมีผลต่อสมบัติทางกลและทางความร้อนของท่อเทอร์โมโซโฟน (Booddachan et al., 2003; Kamonpet et al., 2003; Weon, 2010)

จากการจุ่มแช่ขึ้นทสดอบในโมลาสเป็นระยะเวลา 2,160 ชั่วโมง ปริมาณ Cu ที่ลดลงส่งผลทำให้ขึ้นทสดอบมีความแข็งแรงลดลงแต่มีความเหนียวเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับรายงานในงานวิจัยก่อนหน้า (Zeren, 2005) ส่วนปริมาณ C ที่เพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการจุ่มแช่ในโมลาส จะส่งผลทำให้โลหะแข็งขึ้น แต่เนื่องจาก C เป็นธาตุเจือปน ซึ่งมีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณ Cu ดังนั้น Cu จึงมีอิทธิพลต่อสมบัติทางกลมากกว่า

ทองแดงเป็นวัสดุที่มีสมบัติโดดเด่นในด้านการนำความร้อนและการดึงยึดเป็นเส้นได้ดี ดังนั้นหากเลือกใช้ทองแดงในการสร้างท่อเทอร์โมโซโฟนเพื่อนำไปใช้แลกเปลี่ยนความร้อนในถังกักเก็บโมลาส นอกจากสมบัติทางความร้อนแล้ว ควรพิจารณาถึงสมบัติทางกลด้วย ในการใช้งานจริง ความเค้นที่เกิดขึ้นจากการรับแรงของท่อเทอร์โมโซโฟนที่ทำจากทองแดงควรมีค่า

ไม่เกินค่าความเค้นคราก ซึ่งในงานวิจัยนี้พบว่าอุณหภูมิโมลาสและระยะเวลาในการจุ่มแช่ไม่มีผลต่อความเค้นครากอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 1 และตารางที่ 3 ตามลำดับ)

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการจุ่มแช่ที่มีต่อสมบัติทางกลและทางเคมีกายภาพของวัสดุท่อเทอร์โมโซโฟนชนิดทองแดงที่จุ่มแช่ในโมลาส สมบัติทางกลสามารถวิเคราะห์ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของชิ้นทดสอบทองแดงขนาดตามมาตรฐาน ASTM E8M โดยพบว่าอุณหภูมิและระยะเวลาในการจุ่มแช่มีผลต่อสมบัติทางกล เช่น โมดูลัสความยืดหยุ่น ความเครียดคราก และการลดพื้นที่หน้าตัด และจากการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีกายภาพจากเทคนิค SEM-EDS พบว่าระยะเวลาในการจุ่มแช่มีผลต่อปริมาณธาตุองค์ประกอบของชิ้นทดสอบ ได้แก่ Cu และ C ซึ่งปริมาณธาตุ Cu ที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นสาเหตุทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของชิ้นทดสอบ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

เอกสารอ้างอิง

- ASTM. (2003). E8M Standard test methods of tension testing of metallic materials Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials (Vol. 3.01). USA.
- Booddachan, K., Kamonpet, P., Terdtoon, P., Sutjaritakul, T., & Kobayashi, Y. (2003). Tensile strength of HDPE thermosyphon, *The 7th International Heat Pipe Symposium* (pp. 147-150). Jeju: Korea.
- Garbatov, Y., Guedes Soares, C., Parunov, J., & Kodvanj, J. (2014). Tensile strength assessment of corroded small scale specimens. *Corrosion Science*, 85, 296-303.

- Kamonpet, P., Booddachan, K., Terdtoon, P., Preechawuttipong, I., & Kobayashi, Y. (2003). Creep behavior of HDPE thermosyphon under long term operation. Paper, *The 7th International Heat Pipe Symposium* (pp. 137-140). Jeju: Korea.
- Martínez, C., Briones, F., Villarroel, M., & Vera, R. (2018). Effect of atmospheric corrosion on the mechanical properties of SAE 1020 structural steel. *Materials (Basel, Switzerland)*, 11(4), 591.
- Pandey, C., Mahapatra, M. M., Kumar, P., & Saini, N. (2017). Effect of normalization and tempering on microstructure and mechanical properties of V-groove and narrow-groove P91 pipe weldments. *Materials Science and Engineering: A*, 685, 39-49.
- Pant, D., & Adholeya, A. (2007). Biological approaches for treatment of distillery wastewater: A review. *Bioresource Technology*, 98, 2321-2334.
- Sheng, J., & Xia, J. (2017). Effect of simulated pitting corrosion on the tensile properties of steel. *Construction and Building Materials*, 131, 90-100.
- Silalertruksa, T., Gheewala, S., & Pongpat, P. (2015). Sustainability assessment of sugarcane biorefinery and molasses ethanol production in Thailand using eco-efficiency indicator. *Applied Energy*, 160, 603-609.
- Weon, J.-I. (2010). Effects of thermal ageing on mechanical and thermal behaviors of linear low density polyethylene pipe. *Polymer Degradation and Stability*, 95(1), 14-20.
- Zeren, M. (2005). Effect of copper and silicon content on mechanical properties in Al-Cu-Si-Mg alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 169(2), 292-298.