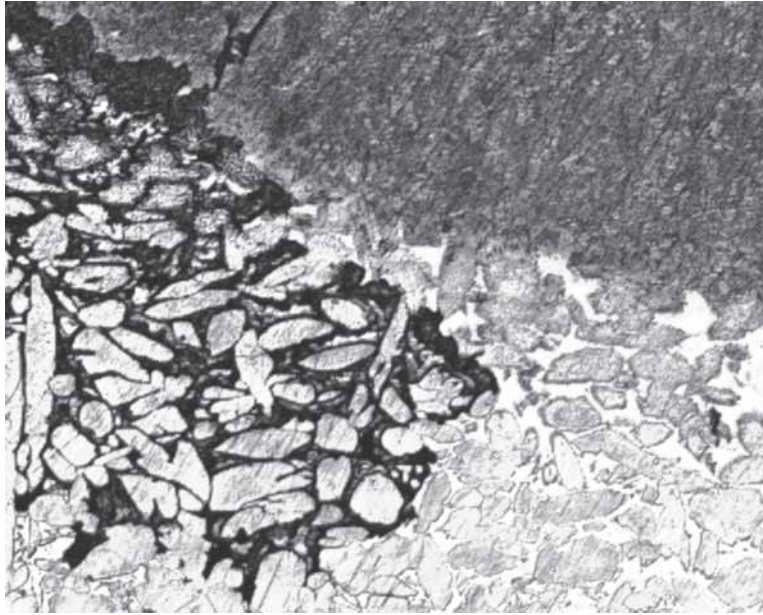


## การป้องกันการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากการเสียธาตุสังกะสีของโลหะทองเหลือง โดยวิธีการเติมธาตุผสม



เรือเอก ดร. เสวียง เกื่อนบุญ

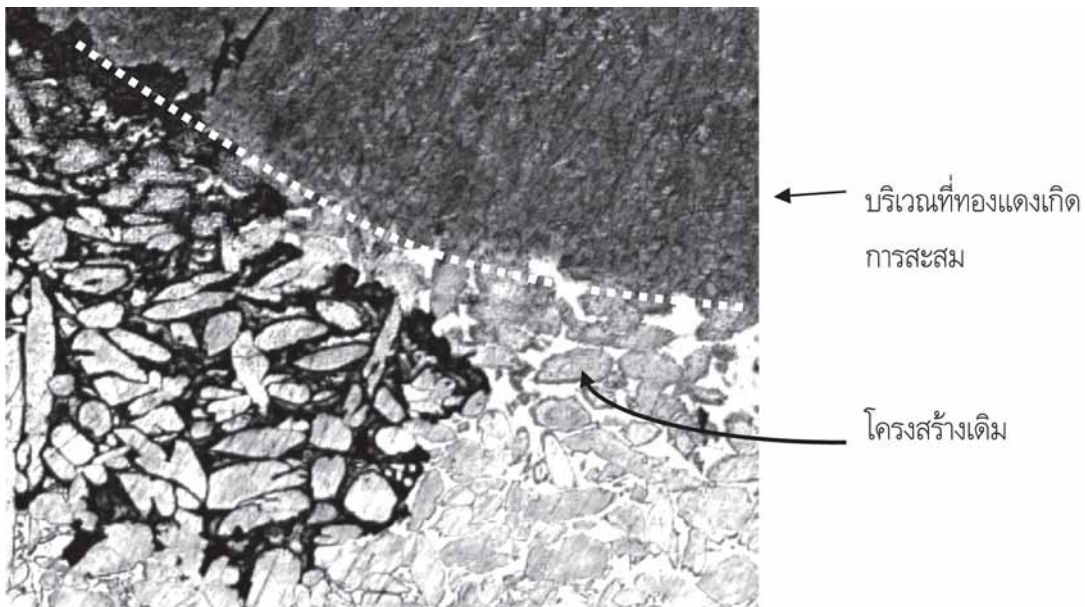
ประจำแผนกทดสอบเครื่องมือวัด กองควบคุมคุณภาพ กรมพัฒนาการช่าง กรมอุทกหารเรือ  
2 ถนนอรุณอมรินทร์ เขตบางกอกน้อย กรุงเทพฯ 10700  
โทร 0 2475 4014 โทรสาร 0 2475 4050 E-mail: swing.t@navy.mi.th

### บทคัดย่อ

ทองเหลืองเป็นโลหะที่ถูกนำมาใช้อย่างหลากหลายในกองทัพเรือโดยเฉพาะการนำมาใช้เป็นวัสดุในการผลิตใบจักรเรือ แต่การใช้งานทองเหลืองมักจะประสบปัญหาการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากการสูญเสียธาตุผสมของโลหะทองเหลืองโดยเกิดการสูญเสียธาตุสังกะสีทำให้โครงสร้างภายหลังเกิดการสูญเสียธาตุผสมมีความอ่อนแอและเกิดความเสียหายในเวลาต่อมา สาเหตุของการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากการสูญเสียธาตุผสมมีได้หลายสาเหตุ การป้องกันก็สามารถกระทำได้หลายวิธีเช่นกัน ซึ่งสามารถใช้ร่วมกันได้เพื่อให้การป้องกันมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น การเติมธาตุผสมถือว่าเป็นการป้องกันที่ให้ผลดีและราคาถูกกว่าการป้องกันแบบอื่น ๆ จึงถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย อย่างไรก็ตามธาตุผสมแต่ละชนิดสามารถเพิ่มหรือลดการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากการสูญเสียธาตุผสมของโลหะทองเหลืองได้แตกต่างกัน นอกจากนี้ปริมาณธาตุผสมที่เติมลงไปก็มีส่วนในการเพิ่มหรือลดการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากการสูญเสียธาตุผสมของโลหะทองเหลืองได้เช่นกัน เพราะฉะนั้นจึงควรทำความเข้าใจกับอิทธิพลของธาตุแต่ละชนิดต่อการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากการสูญเสียธาตุผสมของโลหะทองเหลือง

## 1. บทนำ

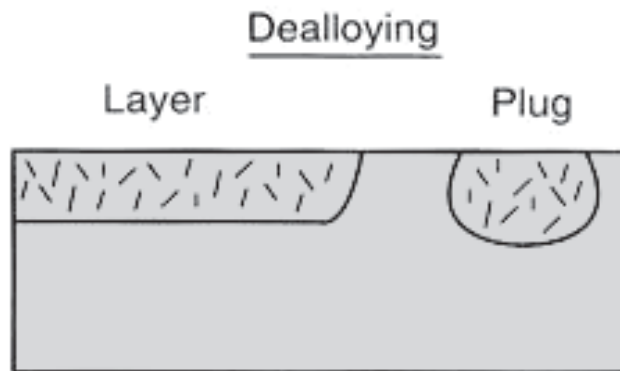
การกัดกร่อนอันเนื่องมาจากการเสียดสีผสมหรือ Dealloying เกิดขึ้นเนื่องจากส่วนผสมบางอย่างของโลหะผสมมีโอกาสที่จะเกิดการกัดกร่อนได้ไวกว่าส่วนผสมอื่น ๆ ที่เหลือ สำหรับธาตุที่มีโอกาสเกิดการกัดกร่อนแบบนี้จะได้แก่ธาตุที่มีความไวต่อปฏิกิริยาสูงและมีโอกาสเสียอิเล็กตรอนได้ง่ายเมื่อนำมารวมกับธาตุอื่น ๆ (Galvanic Contact) ตัวอย่างเช่น สังกะสี อะลูมิเนียม เป็นต้น การเกิดการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากการสูญเสียธาตุผสมของโลหะฐานทองแดงสามารถเกิดได้หลายแบบ ตัวอย่างเช่น การเสียดสีอะลูมิเนียมของอะลูมิเนียมบรอนซ์ (Dealuminification) การเสียดสีสังกะสีในแมงกานีสบรอนซ์ (Dezincification) รูปที่ 1. แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานอะลูมิเนียมบรอนซ์ ด้านบนของรูปแสดงการสะสมของทองแดงหลังจากที่ทองแดงและอะลูมิเนียมหลุดออกจากโครงสร้างแต่มีเพียงทองแดงเท่านั้นที่สามารถเกิดการสะสมที่โครงสร้างได้ใหม่ (Redeposit)



รูปที่ 1. โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานอะลูมิเนียมบรอนซ์ที่เกิดการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากการสูญเสียธาตุผสม

รูปด้านบนคือผิวของชิ้นงานด้านบนนอกแสดงถึงโครงสร้างของทองแดงที่เกิดการสะสมใหม่หลังจากที่ทองแดงหลุดออกจากโครงสร้างซึ่งจะสังเกตได้ว่าทองแดงที่สะสมใหม่นี้จะมีโครงสร้างแบบเข็ม ซึ่ง

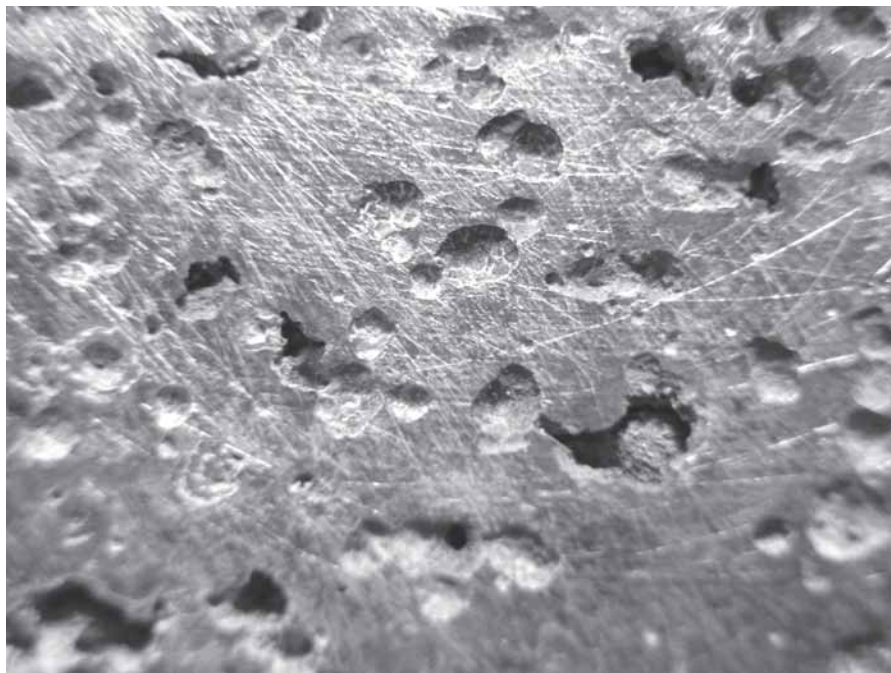
แตกต่างจากชิ้นงานดั้งเดิมซึ่งมีลักษณะเป็นวงรี การเกิดการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากการสูญเสียธาตุผสมสามารถแบ่งลักษณะการเกิดได้ 2 แบบ คือ 1. Layer 2. Plug ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.



รูปที่ 2. ลักษณะการเกิดการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากการสูญเสียธาตุผสม

การกัดกร่อนแบบ Plug จะเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดหลุมเพราะเมื่อชิ้นงานเกิดการสูญเสียธาตุผสมจะทำให้โครงสร้างของชิ้นงานมีความอ่อนแอและไม่สามารถรับแรงได้ดี เมื่อชิ้นงานต้องรับแรงโดยเฉพาะ

แบบคาบ (Cyclic Load) จะทำให้บริเวณที่สูญเสียธาตุผสมไม่สามารถรับแรงได้ดีและหลุดออกมาเกิดเป็นหลุม บริเวณหลุมเหล่านี้ก็จะเป็นจุดที่เกิดความเค้นชุมนุมและอาจจะทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกหัก ในเวลาต่อมา ในรูปที่ 3



รูปที่ 3. ชิ้นงานเกิดการกัดกร่อนแบบหลุมหลังจากโครงสร้างรับแรงแบบคาบจนเป็นเหตุให้บริเวณที่สูญเสียธาตุผสมหลุดออกมา บริเวณด้านในหลุมจะมีสีทองแดงเนื่องจากเกิดการสูญเสียธาตุผสม

การกักกร่อนอันเนื่องมาจากการเสียดาตุผสมสามารถเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ ซึ่งนักวิจัยได้พยายามศึกษาเรื่องนี้มาเป็นเวลานานและมีงานวิจัยออกมาจำนวนมาก ซึ่งสามารถแบ่งกลุ่มงานวิจัยได้เป็น 4 กลุ่มดังต่อไปนี้

1. การสังเกตพฤติกรรมของการเกิดการกักกร่อนอันเนื่องมาจากการสูญเสียธาตุผสมโดยใช้กระบวนการทำให้เกิดการเสียดาตุผสมหรือทดสอบการเสียดาตุผสมในสภาวะการใช้งานปกติ

2. การพัฒนากระบวนการทดสอบการกักกร่อนอันเนื่องมาจากการสูญเสียธาตุผสม

3. การศึกษาทฤษฎีการกักกร่อนอันเนื่องมาจากการเสียดาตุผสม

4. การศึกษาการยับยั้งการกักกร่อนอันเนื่องมาจากการเสียดาตุผสม

ซึ่งสาเหตุของการเกิดการกักกร่อนอันเนื่องมาจากการสูญเสียธาตุผสมมีอยู่หลายสาเหตุ ดังนี้

1. ออกซิเจน โดยเกิดความแตกต่างของปริมาณออกซิเจนในบริเวณขึ้นงาน (Diferential Aeration Cell) อันเนื่องมาจากการเกาะของสัตว์น้ำ เช่น เพรียง ซึ่งสัตว์น้ำเหล่านี้มีรูปร่างหลายแบบ เพรียงบางชนิดมีลักษณะเหมือนดอกเห็ดทำให้ออกซิเจนไหลเวียนได้น้อยบริเวณที่เพรียงเกาะบริเวณที่มีปริมาณออกซิเจนน้อยจะเป็นแอโนด ส่วนบริเวณที่มีออกซิเจนมากจะเป็นแคโทด ทำให้บริเวณที่มีออกซิเจนน้อยจะเกิดการกักกร่อน

2. ความเร็วของกระแสน้ำ ความเร็วของกระแสน้ำมีส่วนในการเกาะของเพรียงบนชิ้นงานตลอดจนการไหลเวียนของออกซิเจนบริเวณขึ้นงาน โดยบริเวณน้ำนิ่ง

จะเกิดการเสียดาตุผสมได้ง่ายกว่าบริเวณที่มีคลื่น เนื่องจากมีปริมาณออกซิเจนไหลเวียนน้อยและเกิดการสะสมของคอปเปอร์ไอออน

3. ความหนาแน่นของคอปเปอร์ไอออน การสะสมคอปเปอร์ไอออนจากสารละลายคอปเปอร์คลอไรด์มีส่วนช่วยให้ทำให้เกิดการเสียดาตุผสม

4. คลอไรด์ เมื่อโลหะฐานทองแดงถูกใช้งานในน้ำทะเลจะเกิดการทำปฏิกิริยากับอากาศเกิดประกอบออกไซด์ของทองแดงอันได้แก่  $Cu_2O$  ซึ่งจะเป็นพิษกับสัตว์น้ำทำให้สัตว์น้ำไม่สามารถเกาะบนพื้นผิวของโลหะฐานทองแดงได้ แต่การใช้งานในบริเวณที่มีคลอไรด์จะช่วยให้เกิดการประกอบของออกไซด์ของคอปเปอร์อันได้แก่  $Cu_2(OH)_3Cl$  เคลือบบนผิวของ  $Cu_2O$  ซึ่ง  $Cu_2(OH)_3Cl$  ไม่เป็นพิษทำให้มีสัตว์น้ำมาเกาะที่ผิวของโลหะฐานทองแดงได้ แต่ฟิล์มของ  $Cu_2(OH)_3Cl$  ไม่แข็งแรงเหมือนของ  $Cu_2O$  และฟิล์มก็จะหลุดออกได้ง่ายทำให้เกิดการกักกร่อนแบบหลุม

5. อุณหภูมิ อุณหภูมิที่สูงมากเกินไปจะทำให้เกิดการเสียดาตุผสมได้ง่าย

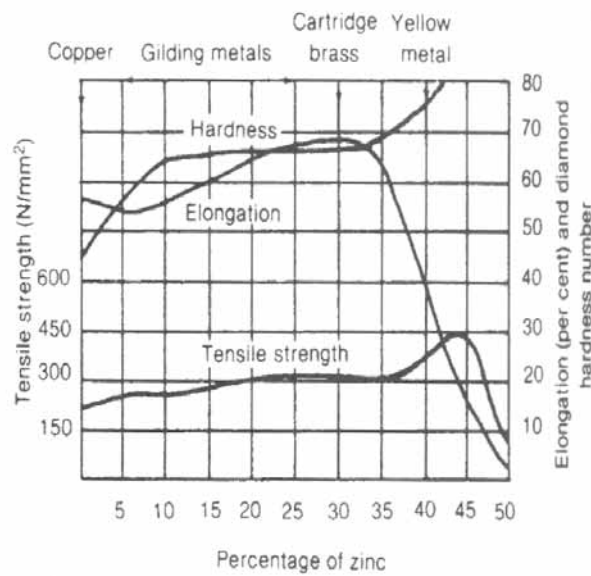
สำหรับปริมาณการเสียดาตุผสมของโลหะทองเหลืองมีความสัมพันธ์โดยตรงกับโครงสร้างของโลหะทองเหลือง ซึ่งสามารถควบคุมได้โดยการปรับแต่งส่วนผสมโครงสร้างของโลหะทองเหลืองสามารถแบ่งได้เป็น 1. แอลฟา 2. โครงสร้างผสม (แอลฟาและเบต้า) 3. เบต้า โดยอาจจะกล่าวได้ว่าความสามารถในการต้านทานการกักกร่อนของทองเหลืองจะเพิ่มสูงขึ้น หากโลหะทองเหลืองมีปริมาณส่วนผสมทองแดงมากขึ้นหรือมีแอลฟาเฟสเป็นองค์ประกอบหลักของโครงสร้าง ซึ่งโลหะฐานทองแดงที่มีสังกะสีสูงหรือมีเบต้าเฟสเป็นโครงสร้างหลัก

มีโอกาที่จะเกิดการกัดกร่อนโดยเสียธาตุสังกะสีสูงมาก เพราะฉะนั้นหลักสำคัญของการปรับปรุงประสิทธิภาพคือการปรับปรุงโครงสร้างจากโครงสร้างที่เป็นเบต้าทั้งหมดซึ่งมีความเสี่ยงสูงต่อการกัดกร่อนแบบเสียธาตุผสมไปสู่โครงสร้างแบบผสมหรือโครงสร้างแอลฟา หากไม่สามารถปรับเปลี่ยนโครงสร้างได้ก็จะใช้วิธีการทำให้โครงสร้างเบต้าเฟสมีขนาดเล็กและกระจายอยู่ทั่วไปไม่เกาะตัวกันเป็นกลุ่มก้อน เพื่อลดการเกิดการกัดกร่อนแบบเสียธาตุผสมชนิดหลุม (Plug Type) นั้นเอง จากการศึกษาพบว่าโลหะทองเหลืองซึ่งมีส่วนผสมของสังกะสีน้อยกว่า 15% มีโอกาสเป็นไปได้ยากที่จะเกิดการกัดกร่อนแบบเสียธาตุสังกะสีแต่อย่างไรก็ตามโลหะฐานทองแดงที่มีส่วนผสมของสังกะสีต่ำกว่า 15% หรือที่เรียกว่า “Red Brass” มีต้นทุนการผลิตสูงเพราะไม่สามารถขึ้นรูปด้วยวิธีการ Die Cast หรือ Forging จากหลักการที่โครงสร้างแอลฟามีความต้านทานการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากการสูญเสียธาตุสังกะสีได้ดี B.A.Weidon จึงทำการวิจัยและพัฒนาการสร้างผิวของแอลฟาเคลือบบนชิ้นงานที่เป็นโครงสร้างแบบผสม ซึ่งจากการทดสอบพบว่าวิธีการนี้สามารถต้านทานการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากการสูญเสียธาตุสังกะสีของโลหะทองเหลืองได้ดีแต่ในช่วงเวลาปี ค.ศ.1957 ขบวนการนี้มีราคาสูงจนไม่สามารถนำมาใช้งานจริงได้ ข้อดีของวิธีการนี้ไม่ต้องเติมธาตุผสมซึ่งอาจจะถูกนำมาทดลองใช้อีกในปัจจุบันเพราะเทคโนโลยีได้ถูกพัฒนาขึ้นมากนอกจากนี้ยังมีการทดลองผสมธาตุผสมบางอย่างมีส่วนอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของทองเหลืองโดยจะเปลี่ยนสัดส่วนของ แอลฟา หรือ เบต้า ที่มีอยู่ใน

โลหะทองเหลืองภายหลังการผสม และนักวิจัยบางท่านทำการพัฒนาโลหะทองเหลืองตัวใหม่ที่มีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากการสูญเสียธาตุสังกะสีโดยใช้กระบวนการขึ้นรูปร้อนซึ่งทำให้ได้ชิ้นงานที่สามารถกลึงไสได้ง่ายต่อการขึ้นรูป ซึ่งระหว่างการผลิตอาจจะมีโครงสร้างแบบผสมแต่ในขั้นตอนสุดท้ายจะใช้กระบวนการทำให้โครงสร้างเปลี่ยนเป็นแอลฟาทั้งหมด

แม้ว่าโครงสร้างแบบแอลฟาจะมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากการสูญเสียธาตุผสมได้ดีแต่ความสามารถในการรับแรงของโครงสร้างแอลฟาจะต่ำกว่าโครงสร้างแบบอื่น ๆ ซึ่งโลหะฐานทองแดงบางประเภทจำเป็นต้องใช้ในงานที่ต้องรับแรงสูง ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วโครงสร้างแบบผสมจะมีความสามารถในการรับแรงได้ดีกว่าโครงสร้างแบบแอลฟา ตัวอย่างเช่นแมงกานีสบรอนซ์ รูปที่ 4 แสดงคุณสมบัติทางกลของทองเหลืองซึ่งการเติมสังกะสีในแมงกานีสบรอนซ์มากกว่า 30% ทำให้เกิดโครงสร้างแบบผสมและได้คุณสมบัติทางกลที่ดี เพราะฉะนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาการป้องกันการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากการสูญเสียธาตุผสมสำหรับโลหะทองเหลืองที่สังกะสีสูงอยู่ต่อไป

สำหรับการป้องกันการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากการสูญเสียธาตุผสมสามารถกระทำได้หลายอย่าง เช่น การติดแอนโนดเพื่อให้เกิดการกัดกร่อนแทนชิ้นงาน การเติมธาตุผสม เป็นต้น เพื่อเป็นการป้องกันโลหะฐานทองแดงจากการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากการสูญเสียธาตุผสมการป้องกันอาจจะทำมากกว่าหนึ่งวิธี ซึ่งการเติมธาตุผสมถือว่าเป็นวิธีที่ง่ายและได้ถูกนำมาใช้ควบคู่กับ



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางกลและปริมาณสังกะสีของแมงกานีสบรอนซ์

วิธีการอื่น ๆ การศึกษาผลกระทบของธาตุที่มีอิทธิพลต่อการเกิดการกัดกร่อนแบบเสียดทานผสมได้มีการดำเนินการมาเป็นเวลานาน ดังนั้นในบทความนี้ จะได้กล่าวถึงอิทธิพลของธาตุต่าง ๆ ที่มีต่อการเกิดการกัดกร่อนแบบเสียดทานผสมโดยเน้นที่โลหะทองเหลืองซึ่งมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในกองทัพเรือ โดยทองเหลืองมีส่วนผสมหลักเป็นทองแดงกับสังกะสีและธาตุผสมอื่น ๆ เพื่อให้มีคุณสมบัติที่ต้องการ เช่น การเติมธาตุแมงกานีสในโลหะทองเหลืองซึ่งเรียกว่าแมงกานีสบรอนซ์ เป็นโลหะที่มีความแข็งแรงสูงจึงมีการนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางในกองทัพเรือตัวอย่างเช่น ใบจักร

## 2. อิทธิพลของธาตุผสมต่อการเกิดการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากการเสียดทานผสมของโลหะทองเหลือง

### 2.1 อาร์เซนิก, พลวง, ฟอสฟอรัส

การศึกษาในยุคแรก ๆ ของการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากการเสียดทาน

ผสมพบว่าการผสมธาตุ อาร์เซนิก, พลวง, ฟอสฟอรัส ในปริมาณเล็กน้อยให้ผลในการยับยั้งการสูญเสียธาตุสังกะสีได้เป็นอย่างดีสำหรับทองเหลืองที่มีโครงสร้างที่เป็นแอลฟาอย่างเดียว จากการค้นพบนี้ทำให้มีการเติมธาตุผสม อาร์เซนิก, พลวง, ฟอสฟอรัส กันอย่างกว้างขวาง

G.D.Bengough และ R. May ทำการศึกษาผลกระทบของการเติมธาตุผสมต่อการป้องกันการกัดกร่อน อันเนื่องมาจากการเสียดทานผสมของ 70-30 ทองเหลือง ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่า อาร์เซนิกให้ผลดีในการป้องกันการเสียดทานผสม แต่อย่างไรก็ตามการเติมธาตุ อาร์เซนิก, พลวง, ฟอสฟอรัส มีประสิทธิภาพที่ไม่ดีในการป้องกันโลหะทองเหลืองที่เป็นโครงสร้างผสมหรือเบต้า

C.T.Ming และ C.S.Ruon ทำการทดลองผลของการเติมธาตุ อาร์เซนิก ใน 70-30 ทองเหลือง ผลการทดลองของพวกเขาแสดงให้เห็นว่าอัตราการกัดกร่อนแบบ

สมำเสมอและการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากการสูญเสียธาตุสังกะสีลดลงอย่างมาก เมื่อทำการเติมธาตุ อาร์เซนิก ประมาณ 0.05% ซึ่งเป็นเหตุให้ทั้งทองแดงและสังกะสีเกิดการกัดกร่อนในอัตราส่วนที่เท่า ๆ กัน นอกจากนี้ผลการทดลองของพวกเขาายังแสดงให้เห็นว่า อาร์เซนิก ที่มีการจับตัวที่ผิวของชิ้นงานไม่ได้มีส่วนช่วยในการยับยั้งการสูญเสียธาตุสังกะสี แต่ อาร์เซนิก ที่ละลายอยู่ภายในเนื้อของ 70-30 ทองเหลือง เท่านั้นที่ช่วยในการยับยั้งการสูญเสียธาตุสังกะสี ผลการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากงานวิจัยในเวลาต่อมาของ E.E.Langenegger และ F.A.Robinson ซึ่งพวกเขาได้ทำการเติม  $As_2O_3$  หรือ  $Sb_2O_3$  ในสารละลาย  $HCl-CuCl_2$  แล้วจุ่มชิ้นงาน 70-30 ทองเหลืองในลงสารละลาย จากการศึกษาของพวกเขาแสดงให้เห็นว่าอัตราการเกิดการกัดกร่อนไม่ได้ลดลงแต่อย่างไร การศึกษาผลกระทบของ อาร์เซนิก ที่ความเข้มข้นสูงต่อการเกิดการสูญเสียธาตุผสมได้รับความสนใจเช่นเดียวกัน โดยจากการศึกษาของ R.W.Sullivan พบว่าการเติม อาร์เซนิก ที่ 0.25% ใน 60-40 ทองเหลือง ทำให้อัตราการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากการสูญเสียธาตุผสมเพิ่มสูงขึ้นถึง 3 เท่า นอกจากนี้การเติม อาร์เซนิก ใน 58.9 Cu-38.37Zn-1.69Pb ในปริมาณเท่ากัน ทำให้เกิดการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากการสูญเสียธาตุผสมเพิ่มขึ้น 30%

## 2.2 ดีบุก

B.A.Weidon ศึกษาผลของการเติมธาตุดีบุกในทองเหลืองที่มีโครงสร้างผสมและทองเหลืองเบต้าที่มีส่วนผสมของตะกั่ว 2.4% โดยทำการเติมดีบุกเป็นปริมาณ 1.2% ถึง 3.2% โดยเขาพบว่าการเติมดีบุกในปริมาณดังกล่าวไม่ได้ช่วยยับยั้งการเกิด

การกัดกร่อน อันเนื่องมาจากการสูญเสียธาตุผสมแต่อย่างไร

A.M.Becccaria พบว่าการเติมดีบุกพร้อมด้วยอะลูมิเนียมใน 70-30 ทองเหลืองช่วยในการเปลี่ยนคุณสมบัติของฟิล์มเมื่อชิ้นงานถูกจุ่มลงในน้ำทะเลและมีส่วนช่วยในการต้านทานการกัดกร่อนแบบสมำเสมอและการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากการสูญเสียธาตุสังกะสี

K.B.Pai ทำการทดลองแล้วพบว่า การเติมธาตุดีบุกให้ผลดีในการยับยั้งการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากการสูญเสียธาตุผสมของ 60-40 ทองเหลืองได้เป็นอย่างดี โดยปริมาณดีบุกที่เหมาะสมคือ 1% นอกจากนี้การเติมดีบุกได้ผลดีกับทองเหลืองชนิดทนแรงดึงสูง (59Cu-38.5Zn-1Fe-1Al-0.5Mn) ซึ่งมีโครงสร้างแบบผสม

## 2.3 ซิลิคอน

B.A.Weidon ทดลองเติมซิลิคอนลงใน 58.4Cu-2.4Pb-Zn เป็นผลให้เกิดโครงสร้างแบบผสมซึ่งเขาพบว่าเป็นโครงสร้างที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดการกัดกร่อนแบบสูญเสียธาตุได้ง่าย นอกจากนี้เขายังพบอีกว่า ทองเหลืองที่มีส่วนผสมของอาร์เซนิก (0.04% As) สองชนิดอันได้แก่ 3.1Si-68.2Cu-2.3Pb-Zn และ 3.0Si-76.2Cu-2.0Pb-Zn มีโอกาสเกิดการสูญเสียธาตุผสมได้ง่ายโดยโลหะผสมทั้งสองชนิดมีการตกผลึกของซิลิคอนในโครงสร้างแอลฟาด้วย

K.Oishi ทำการวิจัยพบว่าการเติมธาตุซิลิคอนในปริมาณเล็กน้อย 0.5% ช่วยในการยับยั้งการสูญเสียธาตุสังกะสีใน 60-40 ทองเหลืองที่มีโครงสร้างผสมได้ แต่อย่างไรก็ตามหากโลหะฐานทองแดงมีโครงสร้างที่เป็นซิลิคอนตกผลึกในโครงสร้างแอลฟาอันเนื่องมาจากการเติมธาตุซิลิคอนเช่นกรณี

ของ 70-30 ทองเหลือง ก็จะทำให้เกิดการสูญเสียธาตุผสมได้ง่ายโดยเฉพาะบริเวณที่ซิลิคอนตกผลึก

2.4 เหล็ก, แมงกานีส, นิกเกิล, โคบอลต์

C.H.Desch และ S.Whyte ค้นพบว่ากรณีที่โลหะทองเหลืองเบต้า 4 ตัวอย่างซึ่งมีส่วนผสมของเหล็กจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการกัดกร่อนแบบเสียธาตุผสม ซึ่งต่อมา G.D.Bengough และ R.May ก็สังเกตเห็นว่าเหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการกัดกร่อนของ 70-30 ทองเหลือง ซึ่งพวกเขายังพบอีกว่าธาตุแมงกานีสก็ให้ผลในทำนองเดียวกับเหล็กแต่ในอัตราที่ต่ำกว่า

เป็นที่ทราบกันมานานแล้วว่าโลหะฐานทองแดงที่มีทองแดงมากกว่า 60% หรือมากกว่า หากมีการเติมธาตุนิกเกิลมากกว่า 4% จะทำให้มีความสามารถในการยับยั้งการเกิดการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากการสูญเสียธาตุผสมได้ดี G.D.Bengough และ R.May และ V.U.Kondrashin ทำการวิจัยเพิ่มเติมพบว่าการเติมนิกเกิลเป็นปริมาณ 0.5%-1% มีแนวโน้มที่จะยับยั้งการเกิดการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากการเสียธาตุผสมของทองเหลืองแอลฟาได้ ซึ่งผลการวิจัยนี้ก็ได้รับการยืนยันจากผลการทดลองของ K.Oishi ซึ่งระบุว่าการเติมนิกเกิลที่ 0.5% ใน 70-30 ทองเหลืองช่วยยับยั้งการเกิดการเสียธาตุผสมได้แต่ให้ผลดีเพียงเล็กน้อยกับ 60-40 ทองเหลืองซึ่งมีโครงสร้างผสม

R.W.Bailey พบว่าการเติม 1.4% โคบอลต์หรือ 0.8% โคบอลต์พร้อมด้วย 1.4% นิกเกิล ช่วยในการปรับปรุงโครงสร้างของทองเหลืองเบต้าให้มีความต้านทานต่อการเกิดการแตกตามขอบเกรน (Intercrystalline Cracking) แต่ในขณะที่

เดียวกันทำให้เกิดการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากการเสียธาตุผสมซึ่งเป็นเหตุให้โครงสร้างไม่แข็งแรงและเกิดการแตกร้าวในเวลาต่อมา

2.5 บิสมัท

W.B.Prince และ R.W.Bailey ทำการศึกษาอย่างละเอียดถึงอิทธิพลของการเติมบิสมัทในทองเหลืองแอลฟาและทองเหลืองซึ่งมีโครงสร้างแบบผสม พวกเขาคาดหมายว่าการเติมบิสมัทน่าจะให้ผลในการยับยั้งการเกิดการสูญเสียธาตุผสมเช่นเดียวกันกับการเติม อาร์เซนิก, พลวง, ฟอสฟอรัส เนื่องจากเป็นธาตุในกลุ่ม VB เหมือนกัน อย่างไรก็ตามผลการทดลองที่ได้กลับให้ผลในทางตรงกันข้ามกล่าวคือการเติมบิสมัทไม่ได้ช่วยยับยั้งการเกิดการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากการเสียธาตุผสมและยังเป็นตัวเร่งให้เกิดการกัดกร่อนเร็วขึ้นอีกด้วย

ในเวลาต่อมามีการวิจัยการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากการเสียธาตุของชิ้นงานทองเหลืองที่มีบิสมัทเป็นส่วนผสมที่เรียกว่าทองเหลืองแบริง (Bismuth Bearing Brass) โดยมีส่วนผสมคือ 61.5Cu-2Bi-Zn และ 62Cu-1Bi-0.1As-Zn ซึ่งผลการศึกษาพบว่าการเติมบิสมัทไม่มีผลใด ๆ กับชิ้นงานทองเหลืองทั้งแบบโครงสร้างผสมและแบบแอลฟา

2.6 กลุ่มธาตุหายาก (Rare Earth)

R.W.Sullivan ทำการเติมธาตุอิตเทรียมลงใน 60-40 ทองเหลือง และได้ผลว่าการเติมธาตุดังกล่าวทำให้อัตราการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากการสูญเสียธาตุผสมเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้เขายังทำการทดลองโดยเติม Mischmetal ซึ่งมีส่วนประกอบทางเคมีคือ Ce 50%, La 25%, Nd 18%, Pr 5% และโลหะแลนทานอยด์อื่น ๆ 2% ลงใน 60-40 ทองเหลือง



โดยผลที่ได้คือการเติม 0.1% Mischmetal ให้ผลดีในการยับยั้งการกัดกร่อน อันเนื่องมาจากการสูญเสียธาตุผสม

N.Verma ทำการทดลองโดยจุ่มอะลูมิเนียมบรอนซ์ซึ่งมีการเติม 0.05% แลนทานัม ซีเรียม นีโอดีเนียม ในสารละลายกรดกำมะถันเจือจาง ซึ่งผลการ

ทดลองแสดงให้เห็นว่าการเติมธาตุดังกล่าวให้ผลดี ในการป้องกันการกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ ผลการทดลองนี้ก็เป็นที่ไปในทางเดียวกันกับผลการทดลองของ R.N.Singh ซึ่งทำการทดลองในแบบเดียวกันแต่ใช้กรดไนตริกเจือจาง

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

การยับยั้งการเสียดูดสังกะสีของทองเหลืองซึ่งมีโครงสร้างเป็นแบบแอลฟา โดยการเติม อาร์เซนิก, พลวง, หรือฟอสฟอรัส เป็นที่ยอมรับกันว่าได้ผลดี อย่างไรก็ตามพลวงและฟอสฟอรัสมีผลให้เกิดการเปราะของโลหะฐานทองแดง จึงควรจะควบคุมปริมาณธาตุที่เติมไม่ให้เกินกำหนด ผลการวิจัยทางด้านอิทธิพลของการเติมธาตุแสดงให้เห็นว่าการเติมธาตุอาร์เซนิก, พลวง, หรือฟอสฟอรัสดังกล่าว อาจจะช่วยลดปริมาณการเสียดูดผสมแต่ไม่ได้ช่วยป้องกันการสูญเสียธาตุผสมของทองเหลืองที่มีโครงสร้างแบบผสม อย่างไรก็ตามงานวิจัยของ R.W.Sullivan แสดงให้เห็นว่าธาตุอาร์เซนิกภายใต้สภาวะการทดสอบบางอย่างอาจจะเป็นตัวเร่งให้เกิดการสูญเสียธาตุผสมเร็วขึ้นได้

นอกจากนี้ธาตุอื่น ๆ ซึ่งมีแนวโน้มที่จะช่วยยับยั้งการสูญเสียธาตุสังกะสีในโลหะทองเหลืองบางประเภท ได้แก่ ดีบุก นิกเกิล และซิลิคอน ธาตุที่เป็นตัวเร่งให้เกิดการสูญเสียธาตุสังกะสีได้แก่ เหล็ก แมงกานีส โคบอลต์ ธาตุในกลุ่มของธาตุหายากสามารถยับยั้งการเสียดูดสังกะสีได้ในบางสภาวะแต่ในบางสภาวะการเติมธาตุในกลุ่มธาตุหายากกลับให้ผลในทางตรงกันข้าม

### บรรณานุกรม

- Davies, D. "A Note on the Dezincification of Brass and the Inhibiting Effect of Element Additions" 1993, P 1-9.
- Ferara, R. and Caton, T. "Review of Dealloying of Cast Bronze and Nickel-Aluminum Bronze in Sea Water Service" 1982, P 30-34.
- Heidersbach, R. "Clarification of the Mechanism of the Dealloying Phenomenon" Corrosion Science. 1968, vol.24, P 38-44.
- Jones, D. Principles and Prevention of Corrosion. Englewood Cliffs, Prentice Hall, 1996.
- Schussler, A. and Exner, H. "The Corrosion of Nickel-Aluminium Bronzes in Seawater" Corrosion Science. 1993, vol.34, P 1793-1802.
- Zanis, C. and Ferara, R. "Dealloying of Cast Nickel Aluminum Bronze" 1972, vol.80.