การพัฒนาทองคำ 96.5% ความแข็งแรงสูงเพื่อการออกแบบผลิตภัณฑ์เครื่องประดับอย่างยั่งยืน

อนุรักษ์ บุญมาวงศ์* จักรพันธ์ สุวรรณวิจิตร ภูวดล วรรธนะชัยแสง มณฑิรา เสนีวงศ์ ณ อยุธยา และพิชญา อัครานุรักษ์กุล
สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน)
E-mail: banurak@git.or.th

รับเมื่อ: 11 มิถุนายน 2569
แก้ไขเมื่อ: 29 มิถุนายน 2569
ตอบรับเมื่อ: 30 มิถุนายน 2569

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาทองคำบริสุทธิ์ 96.5% ให้มีความแข็งและความทนทานสูงขึ้น เพื่อขยายศักยภาพในการออกแบบผลิตภัณฑ์เครื่องประดับร่วมสมัย โดยยังคงสมบัติด้านความบริสุทธิ์ สี และความงามของวัสดุ พร้อมทั้งสอดคล้องกับแนวคิดการออกแบบอย่างยั่งยืน กระบวนการวิจัยใช้การเติมโลหะเจือ ได้แก่ ผงเจอร์เมเนียม ผงไทเทเนียม และผงกราฟีนในอัตราส่วน 0.1% โดยน้ำหนัก ผ่านกระบวนการหลอมและแปรรูปเป็นแผ่นตัวอย่าง ก่อนทดสอบสมบัติทางกล ได้แก่ ความแข็งแบบวิกเกอร์สและความต้านทานแรงดึง รวมถึงวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและการกระจายตัวของโลหะเจือด้วยเทคนิค FESEM-EDS และทดสอบสมบัติทางแสงด้วยการวิเคราะห์ค่าพิกัดสีในระบบ CIELAB ผลการวิจัยพบว่า การเติมเจอร์เมเนียมให้ผลดีที่สุด โดยเพิ่มค่าความแข็งร้อยละ 11.43 และเพิ่มความต้านทานแรงดึงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม ผลการวิเคราะห์ด้วย FESEM-EDS พบว่าเจอร์เมเนียมกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเนื้อวัสดุ ส่งผลให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น ในขณะที่กราฟีนเกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน ทำให้ความแข็งลดลง การวิเคราะห์สีพบว่าการเติมโลหะเจือส่งผลต่อสีของทองคำในระดับเล็กน้อย (ΔE^* อยู่ระหว่าง 1.96-3.11) โดยยังคงโทนสีใกล้เคียงกับทองคำ 96.5% ทั่วไป ในด้านความยั่งยืน ได้มีการพัฒนาต้นแบบผลิตภัณฑ์แหวนทองคำ 96.5% และประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ตามหลักการประเมินวัฏจักรชีวิตผลิตภัณฑ์แบบ Cradle-to-Gate พบว่ามีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเพียง 1.4789 $kgCO_2e$ ซึ่งถือว่าอยู่ในระดับต่ำ องค์ความรู้จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงบทบาทของนวัตกรรมวัสดุในการสนับสนุนการออกแบบผลิตภัณฑ์เครื่องประดับที่มีความหลากหลาย ซับซ้อน และตอบสนองต่อการใช้งานร่วมสมัยได้มากขึ้น อีกทั้งยังเชื่อมโยงกระบวนการออกแบบเข้ากับแนวคิดความยั่งยืน ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานออกแบบผลิตภัณฑ์และอุตสาหกรรมเครื่องประดับในอนาคต

คำสำคัญ: เครื่องประดับทองคำ คาร์บอนฟุตพริ้นท์ โลหะเจือ และความยั่งยืน

Development of High-Strength 96.5% Gold for Sustainable Jewelry Product Design

Anurak Boonmawong, Jakraphan Suwanvijit, Bhuwadol Wanthanachaisaeng, Montira Seneewong Na Ayutthaya and Pichaya Akkaranurukkul

The Gem and Jewelry Institute of Thailand (Public Organization)

E-mail: banurak@git.or.th

Received 11 June 2026
Revised 29 June 2026
Accepted 30 June 2026

Abstract

This study aims to develop high-strength 96.5% pure gold with enhanced hardness and durability in order to expand its potential for contemporary jewelry product design, while maintaining its purity, color, and aesthetic qualities, in alignment with the concept of sustainable design. The experimental process involved the incorporation of alloying elements-germanium powder, titanium powder, and graphene powder-at 0.1 wt% into 96.5% gold through melting and subsequent fabrication into sheet samples. The materials were evaluated for mechanical properties, including Vickers hardness and tensile strength, as well as microstructural characterization and alloying element distribution using FESEM-EDS analysis, and optical properties through CIELAB color coordinate measurement. The results indicate that germanium provided the most significant improvement, increasing hardness by 11.43% and enhancing tensile strength compared to the control sample. FESEM-EDS analysis revealed that germanium was uniformly distributed throughout the material, contributing to improved mechanical properties, whereas graphene exhibited agglomeration, resulting in reduced hardness. Color analysis showed that the addition of alloying elements caused only minor color changes (ΔE^* ranging from 1.96 to 3.11), with the samples retaining color characteristics close to standard 96.5% gold. In terms of sustainability, a prototype 96.5% gold ring was developed and its carbon footprint was assessed following Cradle-to-Gate life cycle assessment principles, showing low greenhouse gas emissions of 1.4789 kgCO2e. The findings highlight the role of material innovation in supporting the design of more diverse, complex, and functional contemporary jewelry products, while demonstrating the integration of material development with sustainable design principles, offering practical applications for product design and the jewelry industry in the future.

Keywords: Gold jewelry, Carbon footprint, Alloying element, Sustainability

1. บทนำ

การออกแบบเครื่องประดับทองคำ 96.5% ซึ่งเป็นมาตรฐานของทองคำในประเทศไทย มีบทบาทสำคัญทั้งในเชิงวัฒนธรรม เศรษฐกิจ และอุตสาหกรรมสร้างสรรค์ โดยทองคำบริสุทธิ์ระดับนี้ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีมูลค่าสูง สีสันเป็นเอกลักษณ์ และเป็นที่ยอมรับในตลาดภายในประเทศ [1] อย่างไรก็ตาม ทองคำ 96.5% มีข้อจำกัดด้านสมบัติเชิงกล โดยเฉพาะความแข็งและความทนทานที่ค่อนข้างต่ำ ส่งผลให้เกิดข้อจำกัดในการออกแบบเครื่องประดับที่มีความซับซ้อน หรือต้องรองรับการใช้งานที่หลากหลาย [2,3]

ในบริบทของการออกแบบผลิตภัณฑ์ร่วมสมัย นักออกแบบมีความต้องการวัสดุที่สามารถตอบสนองทั้งด้านความงาม ความแข็งแรง และความยืดหยุ่นในการขึ้นรูป เพื่อให้สามารถสร้างสรรค์รูปแบบที่หลากหลายและตอบโจทย์ผู้บริโภคยุคใหม่ได้มากขึ้น ดังนั้น การพัฒนาวัสดุทองคำ 96.5% ให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น โดยไม่กระทบต่อความบริสุทธิ์และคุณลักษณะด้านสี จึงเป็นประเด็นสำคัญที่สามารถเชื่อมโยงระหว่างศาสตร์ด้านวัสดุและการออกแบบ [4,5]

นอกจากนี้ แนวโน้มของอุตสาหกรรมเครื่องประดับในปัจจุบันยังให้ความสำคัญกับการออกแบบอย่างยั่งยืน (sustainable design) ซึ่งครอบคลุมทั้งกระบวนการผลิต การใช้ทรัพยากร และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การนำแนวคิดดังกล่าวมาบูรณาการกับการพัฒนาวัสดุ จึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่ช่วยยกระดับคุณค่าและความสามารถในการแข่งขันของผลิตภัณฑ์เครื่องประดับทองคำ [6]

จากปัญหาและความสำคัญดังกล่าว งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาทองคำ 96.5% ให้มีความแข็งและความทนทานสูงขึ้น โดยใช้โลหะเจือในปริมาณต่ำ เพื่อรักษาสมบัติดั้งเดิมของทองคำ พร้อมทั้งศึกษาศักยภาพของวัสดุที่พัฒนาแล้วต่อการออกแบบผลิตภัณฑ์เครื่องประดับ และประเมินผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมผ่านแนวคิดคาร์บอนฟุตพริ้นท์ อันจะนำไปสู่การสร้างองค์ความรู้ด้านนวัตกรรมวัสดุที่สนับสนุนการออกแบบอย่างยั่งยืนในอุตสาหกรรมเครื่องประดับไทย

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาทองคำ 96.5% ให้มีความแข็งและความทนทานสูงขึ้น โดยใช้โลหะเจือ เพื่อเพิ่มศักยภาพในการนำไปใช้ในการออกแบบผลิตภัณฑ์เครื่องประดับ

2. เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพของทองคำ 96.5% ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ เพื่อประเมินความเหมาะสมต่อการใช้งานด้านการออกแบบ

3. เพื่อประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์ต้นแบบ และวิเคราะห์ศักยภาพของวัสดุในการสนับสนุนการออกแบบเครื่องประดับอย่างยั่งยืน

3. ขอบเขตของงานวิจัย

1. งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการพัฒนาทองคำบริสุทธิ์ 96.5% โดยการเติมโลหะเจือ ได้แก่ ผงเจอร์เมเนียม ผงไทเทเนียม และผงกราฟีน ในอัตราส่วน 0.1% โดยน้ำหนัก ผ่านกระบวนการหลอมและแปรรูปเป็นแผ่นตัวอย่าง

2. การศึกษาครอบคลุมการทดสอบสมบัติทางกล ความต้านทานแรงดึง ความแข็งแบบวิกเกอร์ส และสมบัติทางแสง ได้แก่ การทดสอบสี เพื่อประเมินประสิทธิภาพของวัสดุที่พัฒนา

3. งานวิจัยนี้จำกัดการนำวัสดุไปประยุกต์ใช้ในรูปแบบผลิตภัณฑ์เครื่องประดับต้นแบบ โดยเลือกกรณีศึกษาเป็นแหวนทองคำ 96.5% เพื่อแสดงศักยภาพในการออกแบบและการใช้งานจริง

4. การประเมินด้านความยั่งยืนครอบคลุมการวิเคราะห์คาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์ต้นแบบในระดับกระบวนการผลิต โดยไม่รวมการใช้งานหลังการผลิตและการจัดการเมื่อสิ้นสุดอายุการใช้งาน

4. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

4.1 ทองคำ 96.5% สำหรับงานเครื่องประดับ

ทองคำเป็นโลหะมีค่าที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมเครื่องประดับ เนื่องจากมีสมบัติเด่นด้านความงาม สี ความเงางาม ความต้านทานการกัดกร่อน และมูลค่าทางเศรษฐกิจสูง [1] โดยเฉพาะทองคำ 96.5% ซึ่งเป็นระดับความบริสุทธิ์ที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในประเทศไทย และมีบทบาทสำคัญต่ออุตสาหกรรมทองรูปพรรณไทย ทั้งในเชิงวัฒนธรรม เศรษฐกิจ และการออกแบบผลิตภัณฑ์

ในกระบวนการผลิตทองรูปพรรณไทย โดยเฉพาะชิ้นงานที่มีรูปทรงซับซ้อนหรือประกอบด้วยชิ้นส่วนหลายส่วน มักมีการใช้น้ำประสานทองในขั้นตอนการเชื่อมประกอบชิ้นงาน เพื่อช่วยให้ชิ้นส่วนต่าง ๆ สามารถยึดติดกันได้อย่างเหมาะสม ซึ่งสอดคล้องกับหลักการและกระบวนการผลิตเครื่องประดับทองคำที่ต้องอาศัยการหลอม การเชื่อม การขึ้นรูป และการตกแต่งผิวชิ้นงาน [7] อย่างไรก็ตาม การใช้น้ำประสานทองอาจส่งผลต่อค่าความบริสุทธิ์โดยรวมของชิ้นงานหลังการผลิตหรือหลังการหลอมรวม เนื่องจากน้ำประสานทองเป็นส่วนหนึ่งที่คงอยู่ในตัวชิ้นงานทองรูปพรรณ ดังนั้น สำนักงานคณะกรรมการคุ้มครองผู้บริโภค จึงมีข้อกำหนดเกี่ยวกับการแสดงฉลากทองรูปพรรณ อย่างกรณีทองรูปพรรณที่มีน้ำหนักตั้งแต่ 10 กรัมขึ้นไป ต้องแสดงข้อมูลความบริสุทธิ์ของทองคำหลังหลอมรวมน้ำประสานทองไม่น้อยกว่า 93.5% เพื่อให้ผู้บริโภคได้รับข้อมูลที่ถูกต้องและสามารถตรวจสอบคุณภาพของสินค้าได้

อย่างไรก็ตาม ทองคำที่มีความบริสุทธิ์สูงมีข้อจำกัดด้านสมบัติเชิงกล โดยเฉพาะความแข็ง ความต้านทานต่อการเสียรูป และความทนทานต่อการใช้งาน ส่งผลให้การนำไปใช้ในการออกแบบเครื่องประดับที่มีรายละเอียดซับซ้อน หรือมีชิ้นส่วนขนาดเล็กที่ต้องรับแรง เช่น ก้านแหวน ก้านต่างหู หรือส่วนยึดอัญมณี มีข้อจำกัดเมื่อเทียบกับโลหะผสมที่มีความแข็งสูงกว่า ดังนั้น การพัฒนาทองคำ 96.5% ให้มีความแข็งและความทนทานเพิ่มขึ้น โดยยังคงรักษาความบริสุทธิ์ สี และความงามของทองคำไว้ รวมถึงสอดคล้องกับข้อกำหนดด้านคุณภาพของทองรูปพรรณไทย จึงเป็นประเด็นสำคัญที่เชื่อมโยงระหว่างองค์ความรู้ด้านวัสดุศาสตร์ มาตรฐานผลิตภัณฑ์ และการออกแบบเครื่องประดับร่วมสมัย [1,2]

4.2 แนวคิดการพัฒนาโลหะผสมและการเสริมแรงในโลหะ

การพัฒนาโลหะผสมเป็นแนวทางสำคัญในการปรับปรุงสมบัติของโลหะให้เหมาะสมต่อการใช้งาน โดยการเติมธาตุหรือโลหะเจือในปริมาณที่เหมาะสมสามารถส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของวัสดุได้ กลไกการเพิ่มความแข็งแรงของโลหะโดยทั่วไปประกอบด้วย การเสริมแรงด้วยสารละลายของแข็ง การตกตะกอนของเฟสแข็ง การลดขนาดเกรน การเสริมแรงด้วยอนุภาคกระจายตัว และการเพิ่มความแข็งจากการแปรรูปเย็น กลไกเหล่านี้มีบทบาทในการขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของการแปรรูปถาวรในโลหะ [2] ในกรณีของทองคำความบริสุทธิ์สูง การเติมธาตุในระดับต่ำหรือการทำไมโครอัลลอยเป็นแนวทางที่ได้รับความสนใจ เนื่องจากสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของทองคำ โดยยังมุ่งรักษาสมบัติสำคัญของทองคำ เช่น สี ความเสถียรทางเคมี และความเหมาะสมต่อการใช้งานในผลิตภัณฑ์มูลค่าสูง [4] สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้ผงเจอร์เมเนียม ผงไทเทเนียม และผงกราฟีน เป็นโลหะเจือในทองคำ 96.5% เนื่องจากสารแต่ละชนิดมีศักยภาพในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลผ่านกลไกที่แตกต่างกัน ไทเทเนียมเป็นธาตุที่มีการศึกษาและนำมาใช้ในการพัฒนาโลหะผสมทองคำความบริสุทธิ์สูง เช่น ทองคำ 990 เพื่อเพิ่มความทนทานและสมบัติเชิงกลของวัสดุ โดยยังคงสีและคุณลักษณะของทองคำไว้ [8] ขณะที่เจอร์เมเนียมมีรายงานการศึกษาในกลุ่มโลหะผสมทองคำที่มีปริมาณทองคำสูงกว่า 90 wt.% โดยพิจารณาผลต่อความสามารถในการขึ้นรูปและการเพิ่มความแข็งของโลหะผสมทองคำ [9] ส่วนกราฟีนเป็นวัสดุคาร์บอนโครงสร้างสองมิติที่มีความแข็งแรงสูงและได้รับความสนใจในฐานะโลหะเจือสำหรับโลหะ

เมทริกซ์คอมโพสิต แม้ว่าการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมทองรูปพรรณยังไม่แพร่หลาย แต่มีศักยภาพในเชิงวิจัยสำหรับการเพิ่มสมบัติเชิงกลของวัสดุโลหะ [10,11]

การเติมโลหะเจือทั้งสามชนิดในอัตราส่วนร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก จัดอยู่ในระดับการเติมธาตุปริมาณต่ำหรือไมโครอัลลอย ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อให้เกิดผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของทองคำ โดยลดผลกระทบต่อสี ความงาม ความสามารถในการขึ้นรูป และค่าความบริสุทธิ์โดยรวมของทองคำให้น้อยที่สุด แนวคิดดังกล่าวสอดคล้องกับการพัฒนาโลหะผสมทองคำสำหรับเครื่องประดับ ซึ่งต้องพิจารณาสมดุลระหว่างความแข็งแรง สี และความสามารถในการผลิตจริง [3]

ในเชิงองค์ประกอบของโลหะผสม ทองคำ 96.5% หมายถึงวัสดุที่มีทองคำเป็นองค์ประกอบหลักในสัดส่วนประมาณร้อยละ 96.5 โดยน้ำหนัก ส่วนที่เหลือเป็นธาตุผสมหรือองค์ประกอบอื่นที่ใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติของวัสดุ ดังนั้น การเติมผงเจอร์เมเนียม ผงไทเทเนียม หรือผงกราฟีนในปริมาณต่ำมากที่ร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก สามารถพิจารณาได้ว่าเป็นการปรับองค์ประกอบภายในส่วนของธาตุผสมหรือโลหะเจือของทองคำ โดยยังคงเป้าหมายให้วัสดุมีปริมาณทองคำอยู่ในระดับทองคำ 96.5% อย่างไรก็ตาม การยืนยันความบริสุทธิ์ของวัสดุหลังการหลอมและขึ้นรูปควรดำเนินการด้วยวิธีวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีที่เหมาะสม เพื่อยืนยันว่าชิ้นงานยังคงเป็นไปตามเกณฑ์ความบริสุทธิ์ของทองคำ 96.5% และสอดคล้องกับข้อกำหนดของทองรูปพรรณไทย [2,4]

4.3 สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบเครื่องประดับ

สมบัติเชิงกลของวัสดุเป็นปัจจัยสำคัญในการประเมินความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ในการออกแบบและผลิตเครื่องประดับ โดยเฉพาะเครื่องประดับที่ต้องผ่านกระบวนการหลอม รีด ดึงลวด ดัด ขึ้นรูป ขัดเงา และฝังอัญมณี สมบัติที่เกี่ยวข้องโดยตรง ได้แก่ ความแข็ง ความต้านทานแรงดึง และการยืดตัวของวัสดุ [2,7]

ความแข็งแบบวิกเกอร์สเป็นวิธีการทดสอบที่ใช้ประเมินความสามารถของวัสดุในการต้านทานการกดหรือการเกิดรอยบนพื้นผิว โดยใช้หัวกดเพชรรูปพีระมิดฐานสี่เหลี่ยมกดลงบนผิวชิ้นงานภายใต้แรงกดที่กำหนด แล้วคำนวณค่าความแข็งจากขนาดรอยกด วิธีดังกล่าวเหมาะสำหรับการเปรียบเทียบความแข็งของโลหะและโลหะผสม โดยเฉพาะกรณีที่ต้องการประเมินผลของการเติมโลหะเจือต่อความแข็งของวัสดุ [2]

ความต้านทานแรงดึงเป็นสมบัติที่แสดงถึงความสามารถของวัสดุในการรับแรงดึงก่อนเกิดการขาดหรือแปรรูปถาวร ข้อมูลจากการทดสอบแรงดึงสามารถใช้ประเมินค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด ความเค้นคราก การยืดตัว และความเหนียวของวัสดุ ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการออกแบบชิ้นงานที่ต้องรับแรงหรือมีโครงสร้างขนาดเล็ก ในขณะเดียวกัน การเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุอาจทำให้ค่าการยืดตัวลดลง ส่งผลให้วัสดุมีแนวโน้มเปราะหรือขึ้นรูปได้ยากขึ้น ดังนั้น การพัฒนาทองคำความแข็งสูงสำหรับงานเครื่องประดับจึงต้องพิจารณาความสมดุลระหว่างความแข็งแรง ความเหนียว และความสามารถในการขึ้นรูป [2,3]

4.4 การขึ้นรูปเครื่องประดับและแนวคิดการออกแบบเพื่อการผลิต

กระบวนการผลิตเครื่องประดับทองคำประกอบด้วยหลายขั้นตอน เช่น การหลอม การรีดแผ่น การดึงลวด การขึ้นโครง การเชื่อม การทำความสะอาด การขัดเงา และการฝังอัญมณี วัสดุที่ใช้ต้องมีสมบัติเหมาะสมต่อกระบวนการผลิตดังกล่าว โดยต้องสามารถแปรรูปได้โดยไม่แตกร้าว คงรูปได้ดีหลังการขึ้นรูป และมีความแข็งแรงเพียงพอต่อการใช้งานจริง

แนวคิดการออกแบบเพื่อการผลิตมุ่งเน้นให้ผลิตภัณฑ์สามารถผลิตได้จริงอย่างมีประสิทธิภาพ โดยลดความซับซ้อนของกระบวนการ ลดการสูญเสียวัสดุ ลดต้นทุน และสอดคล้องกับศักยภาพของผู้ผลิต ในบริบทของอุตสาหกรรมเครื่องประดับไทย โดยเฉพาะผู้ประกอบการ

รายย่อย ชุมชนช่างทอง และวิสาหกิจชุมชน การพัฒนาวัสดุที่มีสมบัติเชิงกลดีขึ้นแต่ยังสามารถใช้กระบวนการผลิตเดิมได้ถือเป็นแนวทางที่มีความสำคัญต่อการถ่ายทอดองค์ความรู้จากงานวิจัยไปสู่การผลิตจริง [3,7]

4.5 แนวคิดการออกแบบอย่างยั่งยืนในอุตสาหกรรมเครื่องประดับ

การออกแบบอย่างยั่งยืนเป็นแนวคิดที่คำนึงถึงผลกระทบของผลิตภัณฑ์ต่อเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ ตั้งแต่การเลือกใช้วัสดุ การผลิต การใช้งาน ไปจนถึงการจัดการหลังสิ้นสุดอายุการใช้งาน ในอุตสาหกรรมเครื่องประดับ แนวคิดดังกล่าวมีความสำคัญเพิ่มขึ้น เนื่องจากการผลิตเครื่องประดับเกี่ยวข้องกับการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ พลังงาน สารเคมี และกระบวนการผลิตที่อาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม [5,6]

การพัฒนาวัสดุทองคำ 96.5% ให้มีความแข็งและความทนทานเพิ่มขึ้นสามารถเชื่อมโยงกับแนวคิดความยั่งยืนได้ในหลายมิติ เช่น การยืดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ การลดโอกาสการเสียรูปหรือชำรุด การลดความจำเป็นในการซ่อมแซมหรือผลิตทดแทน และการเพิ่มคุณค่าของผลิตภัณฑ์ในระยะยาว นอกจากนี้ หากวัสดุที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ร่วมกับกระบวนการผลิตเดิมได้ ย่อมช่วยลดความจำเป็นในการลงทุนด้านเครื่องมือหรือเทคโนโลยีใหม่ และสนับสนุนการผลิตที่เหมาะสมกับบริบทของผู้ประกอบการไทย

4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติวัสดุและรูปแบบการออกแบบเครื่องประดับ

การออกแบบเครื่องประดับร่วมสมัยมีแนวโน้มนำเสนอรูปทรงที่ซับซ้อน มีชิ้นส่วนขนาดเล็ก และต้องการความแม่นยำในการขึ้นรูปสูง วัสดุที่มีค่าความแข็งสูงขึ้นจะช่วยการออกแบบอย่างอิสระ (Design Freedom) ใน 3 มิติ ได้แก่ 1) ความละเอียดของรายละเอียด (Detail Resolution) - ชิ้นงานที่มีลวดลายละเอียดหรือก้านขนาดเล็กจะสามารถคงรูปได้ดีขึ้น 2) ความมั่นคงของโครงสร้าง (Structural Integrity) - ส่วนยึดอัญมณีและข้อต่อที่ต้องรับแรงจะมีความทนทานมากขึ้น และ 3) ความหลากหลายของรูปแบบ (Formal Diversity) - นักออกแบบสามารถสร้างรูปทรงที่ท้าทายขีดจำกัดของวัสดุเดิมได้มากขึ้น [2,3,7]

4.7 คาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์

คาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์ หมายถึงปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์ โดยแสดงผลในหน่วยคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ช่วยให้สามารถระบุแหล่งกำเนิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการผลิต และนำข้อมูลดังกล่าวไปใช้ปรับปรุงกระบวนการผลิตให้มีประสิทธิภาพและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม [5]

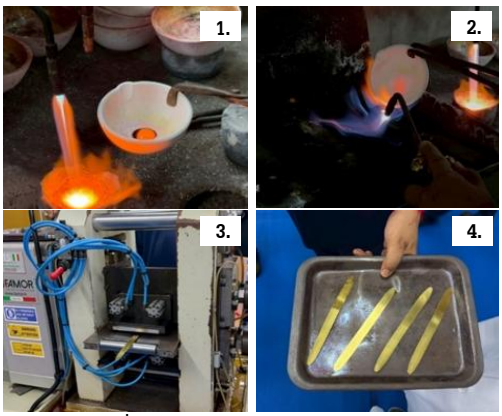
การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์ควรดำเนินการตามหลักการของการประเมินวัฏจักรชีวิต โดยกำหนดขอบเขตการศึกษา หน่วยหน้าที่ แหล่งข้อมูล ปัจจัยการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และวิธีการคำนวณอย่างชัดเจน สำหรับการผลิตเครื่องประดับทองคำ การประเมินอาจครอบคลุมกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการหลอม การรีด การดึงลวด การขึ้นรูป การทำความสะอาด การขัดเงา และการฝังอัญมณี [5,6,7]

5. วิธีดำเนินงานวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) โดยมุ่งเน้นการพัฒนาวัสดุทองคำ 96.5% ให้มีความแข็งและความทนทานสูงขึ้น เพื่อสนับสนุนการออกแบบผลิตภัณฑ์เครื่องประดับอย่างยั่งยืน กระบวนการดำเนินงานแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

5.1 การเตรียมวัสดุและการพัฒนาทองคำความแข็งสูง

นำทองคำบริสุทธิ์ 96.5% มาผสมกับโลหะเจือได้แก่ ผงเจอร์เมเนียม ผงไทเทเนียม และผงกราฟีน ในอัตราส่วน 0.1% โดยน้ำหนัก ผ่านกระบวนการหลอมภายใต้สภาวะควบคุม จากนั้นนำโลหะผสมที่ได้มาแปรรูปเป็นแผ่นด้วยกระบวนการรีด เพื่อใช้เป็นตัวอย่างในการทดสอบ



รูปที่ 1 การเตรียมวัสดุทองคำ 96.5%

5.2 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ

ตัวอย่างแผ่นทองคำที่เตรียมได้ถูกนำไปทดสอบสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความแข็งแบบวิกเกอร์ส (Vickers hardness) และความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) เพื่อประเมินความแข็งแรงของวัสดุ

5.2.1 การทดสอบความแข็งของวัสดุ (Hardness test)

การทดสอบความแข็งของวัสดุดำเนินการด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส รุ่น Zwick-3212 บริษัท ZwickRoell ประเทศเยอรมนี ตามมาตรฐาน ASTM E92-03 โดยใช้แรงกด 0.2 kgf หรือ HV0.2 และกำหนดเวลาในการกดค้าง 10.15 วินาที โดยการทดสอบ 5 ตำแหน่งและรายผลในรูปแบบค่าเฉลี่ย การทดสอบดำเนินการ ณ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 เครื่องทดสอบความแข็ง รุ่น Zwick-3212
ที่มา : ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.2.2 การทดสอบสมบัติทางกล (Universal testing machine)

การทดสอบสมบัติทางกลของตัวอย่างแผ่นทองคำดำเนินการด้วยเครื่องทดสอบแบบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine: UTM) รุ่น H10KM บริษัท Hounsfield ประเทศสหราชอาณาจักร ตามมาตรฐาน ASTM D3500 โดยทำการทดสอบเพื่อประเมินค่าความต้านทานแรงดึงและค่าการยืดตัวของวัสดุ ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบถูกนำมาวิเคราะห์ในรูปแบบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด (Stress-Strain Curve) ทำการทดสอบ 3 ซ้ำ และดำเนินการทดสอบดำเนินการ ณ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ดังแสดงในรูป 3



รูปที่ 3 เครื่องทดสอบ Universal testing machine รุ่น H10KM
ที่มา : ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.3 การทดสอบการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมี

การศึกษาโครงสร้างจุลภาคและการกระจายตัวของธาตุเจือในเนื้อวัสดุดำเนินการโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิชชั่น (Field Emission Scanning Electron Microscopy, FESEM) รุ่น JSM-IT800SHL บริษัท JEOL ประเทศญี่ปุ่น เชื่อมต่อกับระบบวิเคราะห์รังสีเอกซ์แบบกระจายพลังงาน (Energy

Dispersive X-ray Spectroscopy, EDS) รุ่น ULTIM MAX 65 บริษัท Oxford ประเทศสหราชอาณาจักร แสดงดังรูปที่ 3 โดยดำเนินการ ณ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภายใต้สภาวะการทดลองตามตารางที่ 1 การวิเคราะห์ด้วย FESEM ใช้หลักการยิงลำอิเล็กตรอนพลังงานสูงไปยังผิวตัวอย่าง เพื่อสร้างภาพความละเอียดสูงที่แสดงขอบเกรน ขนาดเกรน และโครงสร้างภายในของวัสดุ ส่วนระบบ EDS ใช้วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุเชิงปริมาณ ณ จุดที่สนใจ เพื่อยืนยันการมีอยู่และปริมาณของโลหะเจือ หลังกระบวนการหลอมผสม รวมถึงการทำ Element Mapping เพื่อแสดงการกระจายตัวของธาตุเจือในพื้นที่ต่าง ๆ ของตัวอย่าง ข้อมูลที่ได้จาก FESEM-EDS ใช้ประกอบการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาค การกระจายตัวของธาตุเจือ และสมบัติเชิงกลของวัสดุ

ตารางที่ 1 สภาวะในการทดลอง เครื่อง FESEM-EDS

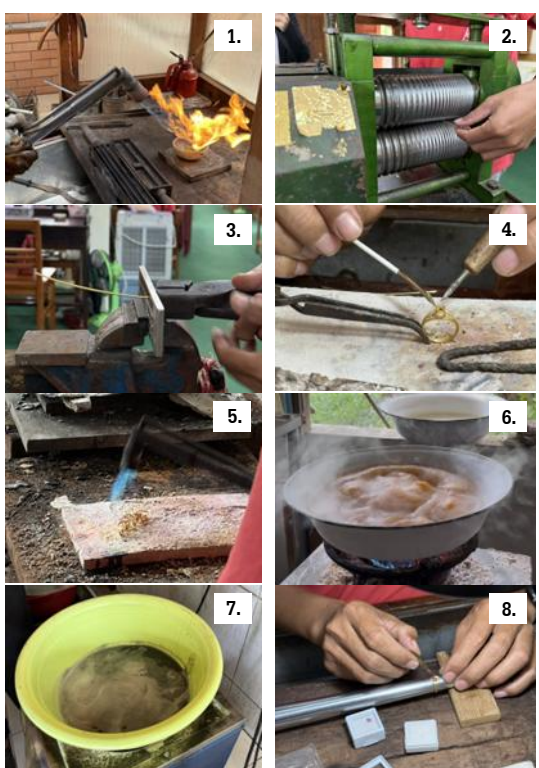
Model	JEOL JSM-IT800SHL
Country	Japan
Magnification	100X - 10,000X
Accelerating voltage	10 - 20 kV
Mode	Backscattered Electrons



รูปที่ 4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิชชั่นร่วมกับเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน
ที่มา : ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.4 การพัฒนาผลิตภัณฑ์ต้นแบบ

ในการศึกษาครั้งนี้ ได้คัดเลือกทองคำที่ผ่านการปรับปรุงด้วยโลหะเจือซึ่งให้ค่าความแข็งสูงสุด เพื่อนำไปทดสอบกระบวนการขึ้นรูปจริง ณ บ้านทองสมสมัย อำเภอศรีสัชนาลัย จังหวัดสุโขทัย ซึ่งเป็นผู้ประกอบการที่มีความเชี่ยวชาญด้านการผลิตเครื่องประดับทองคำรูปพรรณที่มีความบริสุทธิ์สูง การทดลองดำเนินการขึ้นรูปเป็นแหวนทองคำ เพื่อประเมินความเหมาะสมของวัสดุในการผลิตเครื่องประดับจริง โดยกระบวนการขึ้นรูปเครื่องประดับ แบ่งออกเป็น 8 ขั้นตอน ดังนี้ 1) หลอมทองคำที่ผ่านการปรับปรุงด้วยโลหะเจือ 2) รีดแผ่นทองคำ 3) ดึงลวดทองคำ 4) ขึ้นโครงเครื่องประดับ 5) ทำความสะอาดชิ้นงาน 6) ล้างชิ้นงานด้วยดินประสิว 7) ขัดเงาชิ้นงาน 8) ฝังอัญมณีในชิ้นงานเครื่องประดับ



รูปที่ 5 กระบวนการขึ้นรูปเครื่องประดับทองคำด้วยเทคนิคช่างทองโบราณศรีสัชนาลัย

5.5 การประเมินความยั่งยืนของผลิตภัณฑ์

การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์ทองคำ 96.5% ความแข็งสูงดำเนินการตามหลักการประเมินวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ (Life Cycle Assessment: LCA) ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ได้แก่ 1) การกำหนดเป้าหมายและขอบเขตการศึกษา 2) การวิเคราะห์บัญชีรายการด้านสิ่งแวดล้อม 3) การประเมินผลกระทบ 4) การแปลผล โดยกำหนดหน่วยวิเคราะห์เป็น แหวนทองคำ 96.5% น้ำหนักเฉลี่ย 2.3 กรัม และกำหนดขอบเขตระบบแบบ Cradle-to-Gate ครอบคลุมตั้งแต่วัตถุดิบจนถึงกระบวนการผลิตก่อนออกจากโรงงาน การคำนวณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกพิจารณา CO_2, CH_4 และ N_2O และประเมินดังสมการ

GHG Emissions = Activity data × Emission factor (1)

โดยที่ Activity data คือปริมาณการใช้พลังงานหรือวัตถุดิบ และ EF คือ ค่าความเข้มของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อหน่วยกิจกรรม และค่า Emission factor อ้างอิงจากฐานข้อมูลขององค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน)

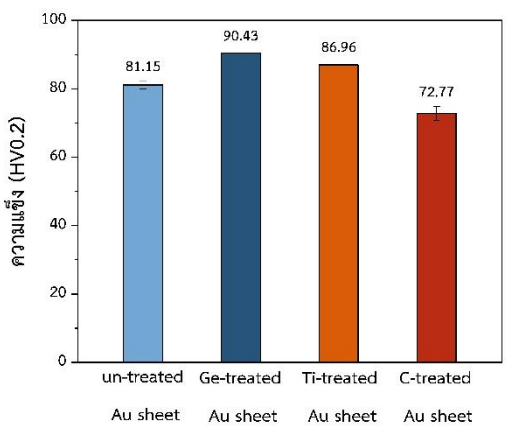
6. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

6.1 ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของทองคำความแข็งแรงสูง

ตัวอย่างในการทดสอบสมบัติทางกายภาพประกอบด้วย 1) Un-treated Au sheet คือ ตัวอย่างแผ่นทองคำ 96.5% ที่ไม่ผ่านกระบวนปรับปรุงด้วยโลหะเจือ 2) Ge-treated Au sheet คือ ตัวอย่างแผ่นทองคำ 96.5% ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยโลหะเจือผงเจอร์เมเนียม 3) Ti-Treated Au sheet คือ ตัวอย่างแผ่นทองคำ 96.5% ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยโลหะเจือผงไทเทเนียม และ 4) C-Treated Au sheet คือ ตัวอย่างแผ่นทองคำ 96.5% ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยโลหะเจือผงกราฟีน

6.1.1 ผลการทดสอบความแข็ง

ผลการทดสอบความแข็งของแผ่นทองคำบริสุทธิ์ 96.5% ที่เติมโลหะเจือร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก ได้แก่ เจอร์เมเนียม ไทเทเนียม และกราฟีน พบว่าโลหะเจือมีผลต่อค่าความแข็งของวัสดุอย่างชัดเจน โดยตัวอย่างที่เติมเจอร์เมเนียมให้ค่าความแข็งสูงที่สุดที่ 90.43 HV0.2 เพิ่มขึ้นประมาณ 11.43% เมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม รองลงมาคือตัวอย่างที่เติมไทเทเนียมซึ่งมีค่าความแข็ง 86.96 HV0.2 เพิ่มขึ้นประมาณ 7.1% ขณะที่ตัวอย่างที่เติมกราฟีนมีค่าความแข็งต่ำที่สุดที่ 72.77 HV0.2 ลดลงประมาณ 10.33% จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเจอร์เมเนียมเป็นโลหะเจือที่มีประสิทธิภาพในการเพิ่มความแข็งของทองคำ 96.5% เหมาะสำหรับการพัฒนาเครื่องประดับที่ต้องการความทนทานและคงทน



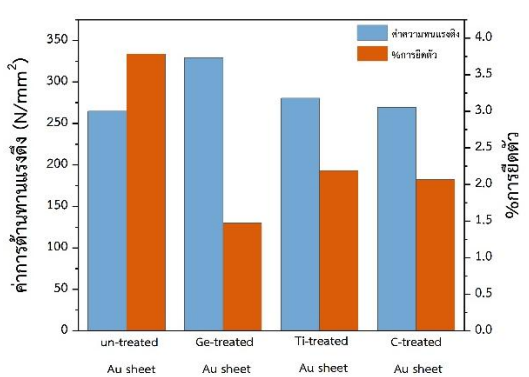
รูปที่ 6 ผลการทดสอบความแข็งของตัวอย่างแผ่นทองคำความแข็งสูง ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์

6.1.2 ผลการทดสอบสมบัติทางกล

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นทองคำบริสุทธิ์ 96.5% ที่ผ่านการเติมโลหะเจือ แสดงดังรูปที่ 7 พบว่าตัวอย่างที่เติมเจอร์เมเนียม ให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงที่สุดที่ 329.4 N/mm^2 เพิ่มขึ้นประมาณ ร้อยละ 24.5 เมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุมที่มีค่า 264.6 N/mm^2 รองลงมาคือการเติมไทเทเนียมและกราฟีนซึ่งมีค่าความต้านทานแรงดึง 280.4 N/mm^2 และ 269.6 N/mm^2 ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการใช้โลหะเจือในการยกระดับสมบัติเชิงกลของทองคำ 96.5% อย่างไรก็ตาม การเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุส่งผลให้ค่าการยืดตัว (%Elongation) ลดลง โดยตัวอย่าง

Ge-treated Au sheet มีค่าการยืดตัวต่ำที่สุดที่ 1.47% เมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุมที่ 3.78% สะท้อนถึงความเหนียวที่ลดลงและแนวโน้มความเปราะของวัสดุที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นข้อพิจารณาสำคัญในกระบวนการออกแบบผลิตภัณฑ์โดยเฉพาะในงานเครื่องประดับที่ต้องอาศัยทั้งความแข็งแรงและความสามารถในการขึ้นรูป

การเลือกใช้ธาตุเจือจึงสามารถนำมาใช้เป็นกลยุทธ์ในการกำหนดสมบัติของวัสดุให้สอดคล้องกับแนวคิดการออกแบบที่แตกต่างกัน กล่าวคือ Ge-treated Au sheet เหมาะสำหรับการออกแบบเครื่องประดับที่ต้องการโครงสร้างแข็งแรง ทนทาน และสามารถรองรับรูปทรงที่ซับซ้อนได้ เช่น แหวนหรือกำไล ในขณะที่ Ti-treated Au sheet และ C-treated Au sheet เหมาะสำหรับงานออกแบบที่ต้องการความสมดุลระหว่างความแข็งแรงและความยืดหยุ่นในการขึ้นรูป เนื่องจากมีค่าการยืดตัวสูงกว่าที่ 2.19% และ 2.07% ตามลำดับ

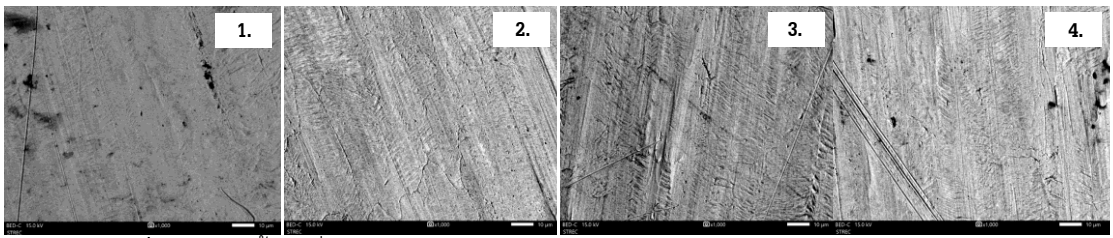


รูปที่ 7 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นทองคำความแข็งสูง ด้วยเครื่อง UTM

6.2 ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุเจือในแผ่นทองคำความแข็งแรงสูง ด้วยเทคนิค FESEM-EDS

การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและการกระจายตัวของธาตุเจือในแผ่นทองคำดำเนินการด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิชชั่น ร่วมกับระบบวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานที่กำลังขยาย 1,000 เท่า ทั้งในโหมดการวิเคราะห์แบบจุด (point analysis) และแบบแผนที่การกระจายตัวธาตุ (mapping analysis)

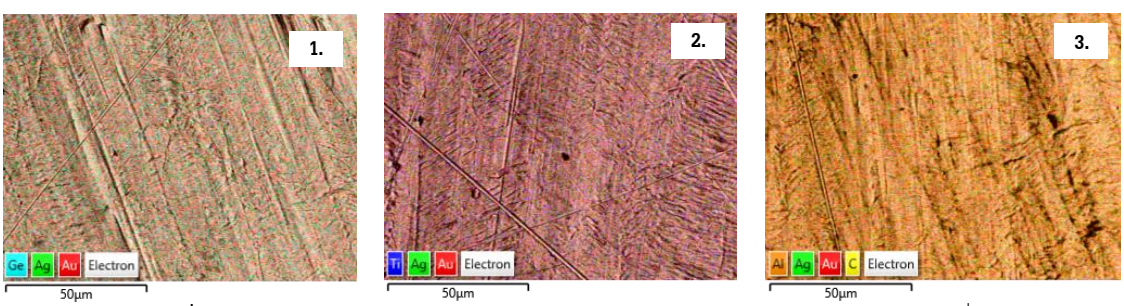
รูปที่ 8 1) แสดงพื้นผิวตัวอย่าง Un-treated Au sheet พบว่าพื้นผิวโดยรวมค่อนข้างเรียบ มีรอยขีดข่วนขนาดเล็กในแนวเดียวกันอันเป็นผลจากกระบวนการรีด ผลการวิเคราะห์ EDS แบบจุดยืนยันองค์ประกอบหลักเป็นทองคำ 96.33 wt% และเงิน 3.67 wt% ซึ่งสอดคล้องกับมาตรฐานทองคำ 96.5% และเป็นตัวอย่างสำหรับเปรียบเทียบ รูปที่ 8 2) แสดงพื้นผิวของ Ge-treated Au sheet ซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับตัวอย่างควบคุม โดยตรวจพบเจอร์เมเนียมอยู่ที่ 0.07 wt% จากการวิเคราะห์แบบจุด และ 0.06 wt% จากการวิเคราะห์แบบแผนที่ ในขณะที่ปริมาณทองคำยังคงอยู่ในช่วง 96.16-96.42 wt% ผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของโลหะเจือในโหมดแผนที่แสดงดังรูปที่ 9 1) แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของเจอร์เมเนียมอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งเนื้อวัสดุ ซึ่งสอดคล้องกับค่าความแข็งและความต้านทานแรงดึงสูงสุดที่พบในกลุ่มตัวอย่างนี้ รูปที่ 8 3) แสดงพื้นผิวของ Ti-treated Au sheet โดยพบรอยรีดและ slip bands บนพื้นผิว การวิเคราะห์ด้วย EDS ตรวจพบไทเทเนียมอยู่ที่ 0.06 wt% จากการวิเคราะห์แบบจุด และ 0.02 wt% จากการวิเคราะห์แบบแผนที่ ซึ่งผลการวิเคราะห์การกระจายตัวในโหมดแผนที่ยืนยันการกระจายตัวของไทเทเนียมภายในเนื้อวัสดุ อย่างไรก็ตาม ปริมาณไทเทเนียมที่ตรวจพบได้มีค่าต่ำกว่าปริมาณที่เติมลงไปในระหว่างกระบวนการผลิต (0.1 wt%) ซึ่งอาจเป็นผลจากการสูญเสียของธาตุดังกล่าวในระหว่างกระบวนการหลอมและรูปที่ 8 4) แสดงพื้นผิวของ C-treated Au sheet ซึ่งปรากฏรอยรีดและ slip bands ในลักษณะเดียวกัน การวิเคราะห์ด้วย EDS ตรวจพบคาร์บอนที่ความเข้มข้น 0.12 wt% จากการวิเคราะห์แบบจุด และ 0.09 wt% จากการวิเคราะห์แบบแผนที่ การวิเคราะห์การกระจายตัวของโลหะเจือในโหมดแผนที่แสดงดังรูปที่ 9 3) พบการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน (agglomeration) ของอนุภาคกราฟีน ส่งผลให้การกระจายตัวภายในเนื้อวัสดุไม่สม่ำเสมอ ซึ่งสอดคล้องกับค่าความแข็งที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างกลุ่มอื่น



รูปที่ 8 ลักษณะพื้นผิวที่ได้จากเทคนิค FESEM กำลังขยาย 1,000 เท่า 1) Un-treated Au sheet 2) Ge-treated Au sheet 3) Ti-treated Au sheet และ 4) C-treated Au sheet

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแผ่นทองคำ 96.5% ด้วยเทคนิค FESEM-EDS

ตัวอย่าง	Au (wt%)	Ag (wt%)	โลหะเจือ	Point (wt%)	Mapping (wt%)
Un-treated Au sheet	96.33	3.67	-	-	-
Ge-treated Au sheet	96.16-96.42	3.48-3.52	Ge	0.07	0.06
Ti-treated Au sheet	96.15-96.43	3.49-3.55	Ti	0.06	0.02
C-treated Au sheet	96.31-96.36	3.21-3.33	C	0.12	0.09



รูปที่ 9 การกระจายตัวของโลหะเจือของแผ่นทองคำ ด้วยเทค FESEM-EDS ในโหมดแผนที่

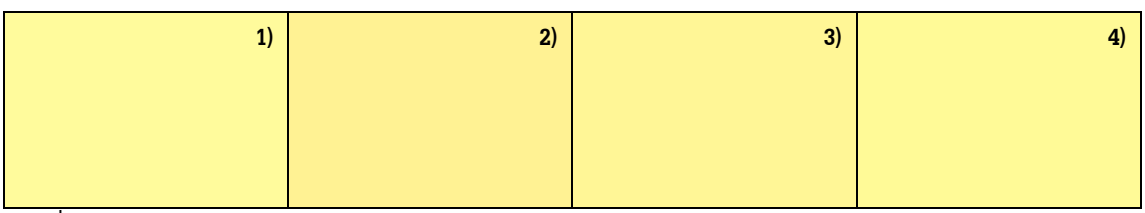
6.3 ผลการวิเคราะห์สีแผ่นทองคำ

การวิเคราะห์สีของแผ่นทองคำ 96.5% ดำเนินการเพื่อประเมินผลกระทบของการเติมโลหะเจือต่อคุณลักษณะด้านสี ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการออกแบบเครื่องประดับทองคำ โดยเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างที่ไม่ผ่านการเติมโลหะเจือ หรือ Un-treated Au sheet กับตัวอย่างที่เติมโลหะเจือ ได้แก่ Ge-treated Au sheet, Ti-treated Au sheet และ C-treated Au sheet ผลการวิเคราะห์พิกัดสีในระบบ CIELAB (L*, a*, b*) แสดงดังรูปที่ 10 พบว่าตัวอย่างที่เติมโลหะเจือยังคงมีโทนสีใกล้เคียงกับทองคำ 96.5% โดยอยู่ในช่วงสีเหลือง-แดง ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของทองคำ เมื่อพิจารณาค่าความแตกต่างของสีรวม (ΔE^*) พบว่ามีค่าอยู่ ระหว่าง 1.96-3.11 แสดงให้เห็นว่าการเติมโลหะเจือส่งผลต่อสีของทองคำในระดับเล็กน้อยถึงระดับที่สามารถสังเกตเห็นได้บางส่วนตัวอย่าง Ti-treated Au sheet มีค่า ΔE^* ต่ำที่สุด คือ 1.96 ซึ่งเป็นระดับที่ความแตกต่างของสีสังเกตได้โดยผู้มีประสบการณ์ ขณะที่ Ge-treated Au sheet และ C-treated Au sheet มีค่า ΔE^* เท่ากับ 3.11 และ 2.04 ตามลำดับ ซึ่งผู้สังเกตทั่วไปอาจรับรู้ความแตกต่างของสีได้บ้าง อย่างไรก็ตามความแตกต่างดังกล่าวยังไม่ทำให้ภาพลักษณ์โดยรวมของทองคำเปลี่ยนไป

จากโทนสีทองเดิมอย่างชัดเจน โดยสรุป การเติมโลหะเจือเพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกลของทองคำ 96.5% ส่งผลต่อสีของวัสดุเพียงเล็กน้อย โดยแผ่นทองคำที่พัฒนาขึ้นยังคงลักษณะสีใกล้เคียงกับทองคำทั่วไปจึงมีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ในการออกแบบความงามของวัสดุ อีกทั้งยังช่วยลดข้อจำกัดด้านการยอมรับของผู้บริโภคที่ให้ความสำคัญกับสีทองดั้งเดิม

ตารางที่ 3 ผลวิเคราะห์สีด้วยเครื่อง UltraScan VIS Spectrophotometer ของตัวอย่างแผ่นทองคำความแข็งสูง

ตัวอย่าง	L*	a*	b*	dL*	da*	db*	dE*
Un-treated Au sheet	101.606	7.468	52.238	-	-	-	-
Ge-treated Au sheet	98.606	8.024	52.84	3.000	0.556	0.602	3.11
Ti-treated Au sheet	99.958	7.544	53.288	1.648	0.076	1.050	1.96
C-treated Au sheet	101.372	7.850	54.232	0.234	0.382	1.994	2.04



รูปที่ 10 ค่าพิกัดสีแผ่นทองคำในระบบ CIELAB (L*, a*, b*) ของตัวอย่าง 1) Un-treated Au sheet 2) Ge-treated Au sheet, 3) Ti-treated Au sheet และ 4) C-treated Au sheet

6.4 ผลการขึ้นรูปเครื่องประดับ

การทดลองขึ้นรูปเครื่องประดับจากทองคำ 96.5% ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยผงเจอร์เมเนียม ในรูปแบบแหวนและต่างหู โดยช่างผู้เชี่ยวชาญ พบว่ากระบวนการผลิตสามารถดำเนินการได้ใกล้เคียงกับทองคำทั่วไป และไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในด้านความยาก-ง่ายของการขึ้นรูป สะท้อนให้เห็นว่าวัสดุที่พัฒนาขึ้นสามารถรองรับกระบวนการผลิตเดิมได้โดยไม่จำเป็นต้องปรับเปลี่ยนเทคนิค หรือเครื่องมือ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการนำไปใช้จริงในบริบทอุตสาหกรรมในเชิงการออกแบบ ชิ้นงานที่ผลิตจาก Ge-treated Au sheet แสดงให้เห็นถึงศักยภาพด้านโครงสร้างที่ดีกว่า โดยเฉพาะในส่วนที่ต้องรับแรง เช่น ก้านต่างหูและบริเวณยึดอัญมณี ซึ่งสามารถคงรูปและยึดเกาะเครื่องประดับที่ต้องการทั้งความแข็งแรง ความทนทาน และทองคำทั่วไปจึงมีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ในการออกแบบทองคำทั่วไปจึงมีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ในการออกแบบอัญมณีได้อย่างมั่นคงมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับทองคำที่ไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพซึ่งมีแนวโน้มเกิดการโค้งงอในบางขั้นตอนของการผลิต ผลลัพธ์ดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าการพัฒนาวัสดุสามารถขยายขอบเขตของการออกแบบให้รองรับรูปแบบที่มีโครงสร้างซับซ้อนรายละเอียดขนาดเล็ก หรือชิ้นส่วนที่ต้องการความแข็งแรงสูงได้มากขึ้น นอกจากนี้ การที่วัสดุสามารถคงกระบวนการผลิตเดิมไว้ได้ ยังเอื้อต่อแนวคิด “Design for Production” ซึ่งช่วยลดข้อจำกัดในการถ่ายทอดแนวคิดการออกแบบไปสู่การผลิตจริง โดยเฉพาะในกลุ่มผู้ประกอบการ SMEs และวิสาหกิจชุมชนที่มีข้อจำกัดด้านเทคโนโลยี ผลการศึกษานี้จึงแสดงให้เห็นถึงบทบาทของนวัตกรรมวัสดุในฐานะตัวกลางที่เชื่อมโยงระหว่างการออกแบบ การผลิต และการใช้งานจริง อันนำไปสู่การยกระดับคุณภาพและมูลค่าของผลิตภัณฑ์เครื่องประดับในอุตสาหกรรมสร้างสรรค์ร่วมสมัย



รูปที่ 11 แหวนและต่างหูที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปจากทองคำที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยผงเจอร์เมเนียม

6.5 ผลการประเมินคาร์บอนฟรุตพริ้นต์ ต้นแบบผลิตภัณฑ์

การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของผลิตภัณฑ์ต้นแบบดำเนินการกับแหวนทองคำ 96.5% น้ำหนักเฉลี่ย 2.3 กรัม ซึ่งผลิตจากแผ่นทองคำที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยผงเจอร์เมเนียม หรือ Ge-treated Au sheet โดยพิจารณาการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในกระบวนการผลิต ตั้งแต่การเตรียมวัตถุดิบ การหลอม การดึงลวด การขึ้นรูปและตกแต่ง การทำความสะอาด การทำสี และการขัดเงาชิ้นงาน

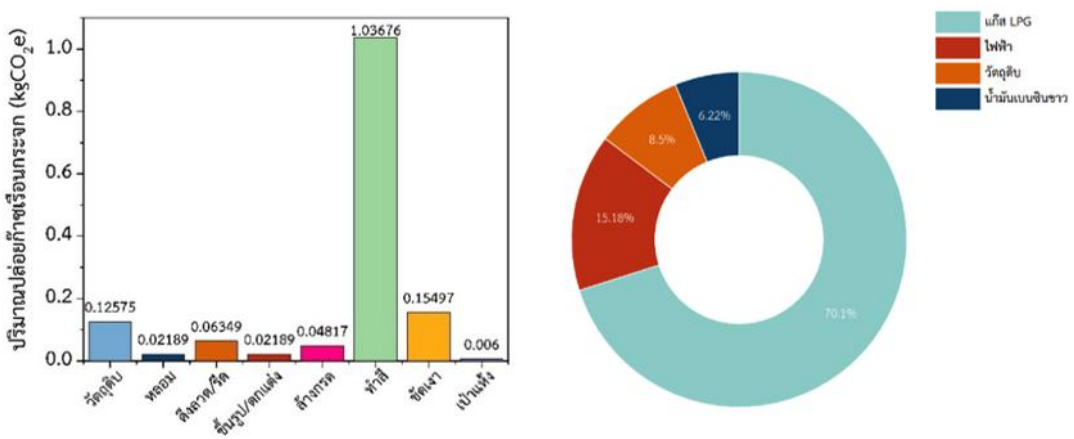
ผลการประเมินคาร์บอนฟรุตพริ้นต์ แสดงดังตารางที่ 4 และรูปที่ 12 พบว่า กระบวนการที่ก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสูงที่สุดคือขั้นตอนการทำสีของชิ้นงาน รองลงมาคือขั้นตอนการขัดเงา ซึ่งเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการใช้พลังงานและความร้อนโดยตรง ขณะที่กระบวนการอื่น ๆ เช่น การเป่าแห้ง การหลอม การขึ้นรูปและตกแต่ง และการล้างกรด มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในระดับต่ำกว่า เมื่อพิจารณาแหล่งกำเนิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยรวม พบว่าแก๊ส LPG เป็นแหล่งพลังงานหลักที่มีสัดส่วนการปล่อยสูงที่สุด คิดเป็นร้อยละ 70.10 รองลงมาคือไฟฟ้า ร้อยละ 15.18 วัตถุดิบ ร้อยละ 8.50 และน้ำมันเบนซินขาว ร้อยละ 6.22 ผลดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่า การออกแบบผลิตภัณฑ์เครื่องประดับอย่างยั่งยืนไม่ควรพิจารณาเฉพาะรูปลักษณ์ ความแข็งแรง หรือความงามของวัสดุเท่านั้น แต่ควรคำนึงถึงกระบวนการผลิตที่เกี่ยวข้องกับการใช้พลังงานร่วมด้วย โดยเฉพาะขั้นตอนที่ใช้ความร้อนและเชื้อเพลิงเป็นหลัก เนื่องจากเป็นจุดสำคัญที่ส่งผลต่อปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของผลิตภัณฑ์ ในเชิงการออกแบบและการผลิต ผลการประเมินนี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการผลิตเครื่องประดับทองคำ 96.5% ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น เช่น การควบคุมการใช้แก๊ส LPG ในขั้นตอนการทำสี การปรับปรุงกระบวนการขัดเงาให้ใช้พลังงานอย่างเหมาะสม และการลดการสูญเสียวัสดุในแต่ละขั้นตอน ซึ่งจะช่วยลดต้นทุน ลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และสนับสนุนแนวคิดการออกแบบผลิตภัณฑ์เครื่องประดับอย่างยั่งยืน การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของแหวนทองคำ 96.5% ต้นแบบแสดงให้เห็นว่าวัสดุที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วยเจอร์เมเนียมสามารถนำไปผลิตเป็นเครื่องประดับได้จริง และข้อมูลด้านสิ่งแวดล้อมที่ได้จากการประเมินสามารถใช้เป็นฐานในการพัฒนาทั้งกระบวนการออกแบบและกระบวนการผลิตให้สอดคล้องกับแนวทางความยั่งยืนในอุตสาหกรรมเครื่องประดับไทย

ตารางที่ 4 ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกตลอดกระบวนการ

กระบวนการ	วัสดุหรือพลังงานที่ใช้	ปริมาณ	หน่วย	Emission factor ($KgCO_2e$/หน่วย)	ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ($KgCO_2e$/หน่วย)
วัตถุดิบ	ทอง	0.00222	kg	53	0.11766
	เงิน	0.00008	kg	14.5	0.00116
	เจอร์เมเนียม	0.0000012	kg	5771	0.0069252
หลอม	น้ำมันเบนซินขาว	0.01	kg	2.1894	0.021894

ตารางที่ 4 (ต่อ)

กระบวนการ	วัสดุหรือพลังงานที่ใช้	ปริมาณ	หน่วย	Emission factor ($KgCO_2e$/หน่วย)	ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ($KgCO_2e$/หน่วย)
ดึงรวด/รีด	ไฟฟ้า	0.127	kWh	0.4999	0.0634873
ขึ้นรูป/ตกแต่ง	น้ำมันเบนซิน	0.01	kg	2.1894	0.021894
ล้างกรด	น้ำมันเบนซิน	0.022	kg	2.1894	0.0481668
ทำสี	แก๊ส LPG	0.333	kg	3.1134	1.0367622
ขัดเงา	ไฟฟ้า	0.31	kWh	0.4999	0.154969
เป่าแห้ง	ไฟฟ้า	0.012	kWh	0.4999	0.0059988



รูปที่ 12 (ซ้าย) ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และ (ขวา) พลังงานที่ใช้ในการผลิตแหวนทอง 96.5% ตลอดกระบวนการ

7. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาทองคำ 96.5% ให้มีความแข็งและความทนทานสูงขึ้น เพื่อเพิ่มศักยภาพในการออกแบบผลิตภัณฑ์เครื่องประดับร่วมสมัย โดยใช้โลหะเจือ ได้แก่ เจอร์เมเนียม ไทเทเนียม และกราฟีน ในอัตราส่วนร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก ผลการทดลองพบว่า ตัวอย่างที่เติมเจอร์เมเนียมให้ค่าความแข็งสูงที่สุด 90.43 HV0.2 เพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 11.43 เมื่อเทียบกับทองคำที่ไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ และให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงที่สุด แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุ ผลการวิเคราะห์สีพบว่า การเติมโลหะเจือส่งผลต่อสีของทองคำเพียงเล็กน้อย โดยยังคงโทนสีใกล้เคียงกับทองคำ 96.5% ทั่วไป เมื่อนำวัสดุที่เติมเจอร์เมเนียมไปทดลองขึ้นรูปเป็นแหวนและต่างหู พบว่าสามารถผลิตได้ด้วยกระบวนการใกล้เคียงกับทองคำทั่วไป โดยไม่จำเป็นต้องปรับเปลี่ยนเครื่องมือหรือเทคนิคการผลิตเดิม อีกทั้งยังช่วยเพิ่มความมั่นคงของโครงสร้างชิ้นงานในบริเวณที่ต้องรับแรง เช่น ก้านต่างหูและส่วนยึดอัญมณี การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ของแหวนทองคำ 96.5% ต้นแบบ น้ำหนักเฉลี่ย 2.3 กรัม พบว่ามีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกรวม 1.4789 $kgCO_2e$ ผลการวิจัยจึงแสดงให้เห็นว่าการเติมเจอร์เมเนียมสามารถพัฒนาทองคำ 96.5% ให้มีความเหมาะสมต่อการออกแบบและผลิตเครื่องประดับที่มีความแข็งแรง สวยงาม และสอดคล้องกับแนวคิดความยั่งยืนได้

8. ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาสมบัติด้านการใช้งานจริงเพิ่มเติม เช่น ความต้านทานการสึกหรอ การขีดข่วน การดัดงอ และความแข็งแรงของส่วนยึดอัญมณี เพื่อประเมินความเหมาะสมของวัสดุต่อการใช้งานในระยะยาว

2. ควรวิเคราะห์ผลกระทบของโลหะเจือต่อคุณลักษณะด้านสุนทรียภาพเพิ่มเติม เช่น สี ความเงางาม ผิวสัมผัส และการยอมรับของผู้บริโภค เนื่องจากคุณค่าด้านความงามเป็นปัจจัยสำคัญของเครื่องประดับทองคำ 96.5%

3. ควรนำผลการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นต์ไปใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการผลิต โดยเฉพาะขั้นตอนที่ใช้พลังงานสูง เช่น การทำสีและการขัดเงา เพื่อลดการใช้พลังงาน ลดต้นทุน และสนับสนุนการผลิตเครื่องประดับที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

9. กิตติกรรมประกาศ

ได้รับทุนอุดหนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ประจำปีงบประมาณ 2568

เอกสารอ้างอิง

[1] Drost, D. E., & Haujjelt, D. J. (1992). Uses of gold in jewellery. Interdisciplinary Science Reviews, 17(3), 271-280.

[2] Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). Materials science and engineering: An introduction (10th ed.). John Wiley & Sons.

[3] Süss, R. (2004). 18 carat yellow gold alloys with increased hardness. Gold Bulletin, 37(3-4), 196-207

[4] Li, J., Yan, Z., Wang, X., & Acoff, V. L. (2017). Influences of 1.0 wt.% additives on the microstructures and mechanical properties of gold. Journal of Alloys and Compounds, 721, 615-621.

[5] Jiang, A., Huan, M., Choi, D.-O., & Kang, Y. (2025). Optimizing eco-friendly jewelry design through an integrated eco-innovation approach using artificial neural networks. Scientific Reports, 15, 6441

[6] Tenuta, L., Testa, S., Antinarelli Freitas, F., & Cappellieri, A. (2024). Sustainable materials for jewelry: Scenarios from a design perspective. Sustainability, 16(3), 1309.

[7] Brepohl, E. (2001). The theory and practice of goldsmithing (C. Brepohl, Trans.). Brynmorgen Press.

[8] Gafner, G. (1989). The development of 990 gold-titanium: Its production, use and properties. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 89(6), 173-181.

[9] Cretu, C., van der Lingen, E., & Glaner, L. (2002). Hard gold alloys. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy.

[10] Yang, S., Li, Y., Li, W., & Wang, J. (2023). Metal/graphene composites: A review on the simulation of fabrication and mechanical properties. Materials, 16(1), 202.

[11] Zhang, X., Shi, C., Li, E., He, F., & Ma, L. (2023). Graphene-reinforced metal matrix composites: Fabrication, properties, and applications. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 124, 3271-3295.