
ทองสีม่วงกับมุมมองในอนาคต The Future Aspects of Purple Gold

ปราโมทย์ อธิปวิวัฒน์ และ ขจีพร วงศ์ปรีดี*

Pramote Thirathipviwat and Kageeporn Wongpreedee*

ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

บทคัดย่อ

ทองสีม่วงเป็นวัสดุแบบสารประกอบประเภทอินเทอร์เมทัลลิก (Intermetallic compound) ซึ่งมีความแข็งแรงสูง แต่มีข้อจำกัดเรื่องความเหนียว ทำให้เกิดปัญหาในขั้นตอนการขึ้นรูปซึ่งอาจทำให้เกิดการแตกหักได้ง่าย ในบทความนี้ได้เชื่อมโยงหลักการความเป็นไปได้ในการพัฒนาสารประกอบอินเทอร์เมทัลลิกเน้นทองสีม่วง และเทคนิคการพัฒนาทองสีม่วง ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1987 จนถึงปัจจุบัน ในรูปแบบเพื่อการทำเครื่องประดับรวมไปถึงการประดิษฐ์วัสดุเชื้อเพลิง ทั้งนี้สำหรับการตอบสนองความสวยงามกับความต้องการของผู้บริโภคและความสามารถในการเก็บไฟฟ้าตามลำดับ รวมถึงการเชื่อมโยงกับวิวัฒนาการการประดิษฐ์ในอนาคต

*Corresponding author. E-mail address: kageeporn@swu.ac.th

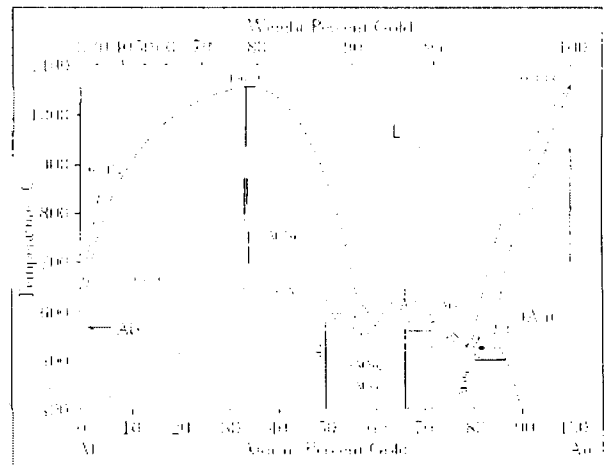
บทนำ

ทองสีม่วง (Purple gold หรือ Lavender gold) (ขจีพร วงศ์ปรีดี และสุพิชฌา สุพรรณสมบูรณ์, 2548) เป็นโลหะทองผสมซึ่งเป็นสารประกอบประเภทอินเทอร์เมทัลลิก (Intermetallic compound) ประกอบด้วยโลหะสองชนิดหรือมากกว่า โครงสร้างมีความแตกต่างจากโลหะทั่วไป คือ มีการเรียงตัวของอะตอมอย่างเป็นระเบียบ (Stoichiometric) และมีทิศทางในการเรียงตัวที่แน่นอน และมีความเป็นพันธะโควาเลนต์ (Covalent) ร่วมกับไอออนิก (Ionic) ระหว่างอะตอมในโครงสร้าง (Russell & Lee, 2005)

สมบัติทางกายภาพของสารประกอบอินเทอร์เมทัลลิกอยู่ระหว่างโลหะกับเซรามิกส์ คือมีความแข็งแรงและสามารถทนทานต่อการกัดกร่อนของโลหะที่อุณหภูมิสูง ในขณะเดียวกันลักษณะทางกายภาพของสารประกอบอินเทอร์เมทัลลิกมีความคล้ายคลึงกับโลหะ เช่น ความหนาแน่นสูง พื้นผิวมีความแวววาว เป็นต้น และบ่อยครั้งจะพบว่า มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนที่ดีกว่าโลหะ (ขจีพร วงศ์ปรีดี และสุพิชฌา สุพรรณสมบูรณ์, 2548) สมบัติของสารประกอบอินเทอร์เมทัลลิกมีความคล้ายคลึงกับสมบัติของเซรามิกส์นี้ คือ มีความแข็งแรงสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งสามารถทนต่อแรงกระแทกที่อุณหภูมิสูง แต่เปราะที่อุณหภูมิต่ำซึ่งทำให้เป็นปัญหาในการขึ้นรูปการผลิต

ทองสีม่วงเป็นสารประกอบระหว่าง ทอง (Au) กับ อะลูมิเนียม (Al) ให้สีของโลหะเปลี่ยนจากสีทองเป็นสีม่วง ซึ่งอยู่ในเฟสของสารประกอบอินเทอร์เมทัลลิก สูตรทางเคมีคือ ทองกับอะลูมิเนียม 21% โดยน้ำหนัก (Au-21wt% Al) ซึ่งเป็นสารประกอบ AuAl_3 ดังแสดงในภาพที่ 1 โดยสารประกอบดังกล่าวมีจุดหลอมเหลวสูงกว่าที่องค์ประกอบทางเคมีในช่วงอื่น สีของโลหะทองสีม่วงนั้นเป็นสิ่งที่ดึงดูดในการนำมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอัญมณี และเครื่องประดับ แต่ด้วยสมบัติที่จำกัดของทองสีม่วงคือ มีความแข็งแรงสูงแต่เปราะ ทำให้ยากต่อการผลิตและ

แตกหักได้ง่ายระหว่างการขึ้นรูป ซึ่งเหตุผลนี้เป็นอุปสรรคสำคัญต่อการนำมาใช้ประยุกต์ในอุตสาหกรรมอัญมณี และเครื่องประดับในเชิงพาณิชย์ การวิจัยและพัฒนาปรับปรุงคุณสมบัติและกรรมวิธีการผลิตที่เหมาะสมต่อการผลิตทองสีม่วงให้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง เพื่อสร้างความแปลกใหม่และความสวยงามต่อเครื่องประดับในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ทั้งในอุตสาหกรรมเครื่องประดับและอุตสาหกรรมอื่นๆ ต่อไป



ภาพที่ 1 แผนภาพเฟสของระบบทองและอะลูมิเนียมให้สีทองเป็นสีม่วง แนวเส้นแสดงอินเทอร์เมทัลลิก (Massalski et al., 1986)

ประวัติและความเป็นมาของทองสีม่วง

ทองสีม่วงพบครั้งแรกในอุตสาหกรรมวงจรรวมอิเล็กทรอนิกส์ โดยเกิดขึ้นที่รอยเชื่อมต่อลวดทองกับฐานโลหะอะลูมิเนียม โดยเรียกวัสดุตรงรอยเชื่อมนี้ว่า "Purple plague" (George, 1997) ในบริเวณรอยเชื่อมที่แผงวงจรรวมอิเล็กทรอนิกส์ มีการแพร่ความร้อนเกิดขึ้น ทำให้เกิดพันธะระหว่างอะตอมของทองกับอะตอมของอะลูมิเนียมเกิดเป็นสารประกอบประเภทอินเทอร์เมทัลลิก ซึ่งทำให้พบรูพรุนที่เกิดจากการเคลื่อนแบบแพร่ของอะตอมส่งผลต่อคุณสมบัติแตกหักได้

จากการค้นพบทองสีม่วงในแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทำให้เกิดความสนใจในทองสีม่วงต่อนักวิจัยและผู้ประกอบการ ในวงการอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ระดับ หากแต่ว่าการใช้งานยังมีข้อจำกัดทางด้านคุณสมบัติความเปราะสูง จึงเป็นสาเหตุจูงใจให้มีการศึกษาค้นคว้ากระบวนการปรับปรุงคุณสมบัติของทองสีม่วงให้มีคุณสมบัติที่ดีตามลำดับดังนี้

ปี ค.ศ.1987 Miyama Shigeru นักวิจัยชาวญี่ปุ่น ได้วิจัยผลิตทองสีม่วงด้วยวิธีการขึ้นรูปวัสดุผง โดยผสมผงโลหะผสมของทอง กับอะลูมิเนียม กับสารเติมแต่ง ได้แก่ พงโลหะนิกเกิล (Ni) โคบอลต์ (Co) และพัลลาเดียม (Pd) ซึ่งอาจจะผสมสารเติมแต่งเพียงหนึ่งชนิดหรือมากกว่าก็ได้แต่ต้องเติมในปริมาณที่จำกัด โดยไม่ทำให้สีของทองสีม่วงเกิดการเปลี่ยนแปลง และมีคุณสมบัติทางกลที่ดีขึ้น (Shigeru, 1987)

ปี ค.ศ.1990 Samuel Steienmann ได้ค้นพบกระบวนการพัฒนาคุณสมบัติทางกลของทองสีม่วงโดยการปรับปรุงขนาดของเกรนของวัสดุให้มีขนาดเกรนที่ต่ำกว่า 50 ไมครอน ด้วยกรรมวิธีเริ่มต้นจากการขึ้นรูปวัสดุผงโลหะที่อุณหภูมิสูง หลังจากนั้นทำให้วัสดุเย็นตัวอย่างรวดเร็ว โดยเกิดเกรนที่มีขนาดเล็กนี้ทำให้ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติในด้านความแข็งแรงของทองสีม่วงได้ (Steienmann, 1988)

ปี ค.ศ.1992 Miyagawa Yukio นักวิจัยชาวญี่ปุ่นได้วิจัยการผลิตลวดโลหะทองสีม่วง โดยใช้วิธีการเคลือบโลหะทองบนผิวลวดอะลูมิเนียม หรือเคลือบโลหะอะลูมิเนียมบนผิวลวดทอง และนำมาให้ความร้อนและขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 450 ถึง 700 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศก๊าซอาร์กอน ระหว่างกระบวนการนั้นจะเกิดการแพร่ของอะตอม ซึ่งทำให้เกิดสารประกอบอินเทอร์เมทัลลิกของทองเกิดขึ้นที่ผิว โดยลวดที่ได้มีโครงสร้างแบบเส้นใยในทิศทางตามแนวยาว นักวิจัยกล่าวว่าสารผสมนี้ให้คุณสมบัติด้านความเหนียวและมีความยืดหยุ่นของเส้นลวดแตกต่างจากคุณสมบัติของทองสีม่วงทั่วไป (Yukio et al., 1992)

ปี ค.ศ.2000 Loh Peng Chum นักวิจัยชาวสิงคโปร์ ได้วิจัยพัฒนาทองสีม่วงให้คุณสมบัติทางกลที่ดีขึ้นในด้านของความแกร่ง (Toughness) ของวัสดุ โดยค้นพบว่าที่ส่วนผสม Au-16.5-21.5wt%Al และการเติมธาตุพัลลาเดียมกับนิกเกิลอยู่ในช่วง 1-4 wt% จะทำให้ทองสีม่วงมีความแกร่งเพิ่มขึ้นและสามารถนำไปประโยชน์ด้านพาณิชย์โดยภายใต้การผลิตของบริษัท Aspiat Cooperation ประเทศสิงคโปร์ และนำทองสีม่วงมาผลิตเป็นเครื่องประดับออกวางตลาดในปี ค.ศ. 2000 (Loh, 2005)

ปี ค.ศ.2003 Yamazaki Shigeyuki นักวิจัยชาวญี่ปุ่น ได้ผลิตทองสีม่วงด้วยวิธีการขึ้นรูปวัสดุผง (Powder Metallurgy Production) โดยผลิตโลหะผสมของทอง (Au-15-30wt%Al) ในรูปแบบของผงโลหะ ซึ่งผลิตผงโลหะโดยวิธีอะตอมไมเซชันแบบสุญญากาศ (Vacuum Atomization) และนำผงโลหะไปทำการอัดขึ้นรูป (Pressing) และอบเผา (Sintering) ซึ่งเป็นอีกหนึ่งวิธีในการขึ้นรูปทองสีม่วงนอกจากวิธีการหล่อ (Shigeyuki, 2003)

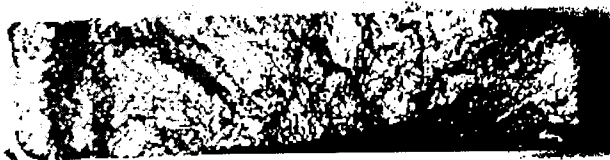
ทองสีม่วงจัดอยู่ในกลุ่มโลหะที่มีค่า และคุณสมบัติทางกายภาพมีสิ่งที่ดึงดูดความสนใจต่อการนำไปใช้ในการผลิตเครื่องประดับ การศึกษาค้นคว้าพัฒนากระบวนการผลิตทองสีม่วงให้มีสมบัติทางกลที่ดีโดยเฉพาะในด้านความแข็งแรงของวัสดุ เมื่อประมาณ 20 ปีที่ผ่านมา และในปัจจุบันทองสีม่วงยังไม่ค่อยได้รับความนิยมในเชิงพาณิชย์มากเท่าที่ควร เนื่องมาจากยากต่อการผลิตหรือขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ ซึ่งกรรมวิธีพัฒนาดังที่กล่าวมาข้างต้น อาจช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุได้แต่มีต้นทุนในการผลิตค่อนข้างสูง จึงไม่เหมาะสมสำหรับการลงทุนทางพาณิชย์ หรือบางกรรมวิธีอาจทำให้สีของทองม่วงเกิดการเปลี่ยนแปลงสีและจางลงหากใช้ในระยะเวลานานึง ทำให้ลดคุณค่าทางพาณิชย์ของวัสดุได้

เทคนิคการหล่อทองสีม่วงสำหรับเครื่องประดับ

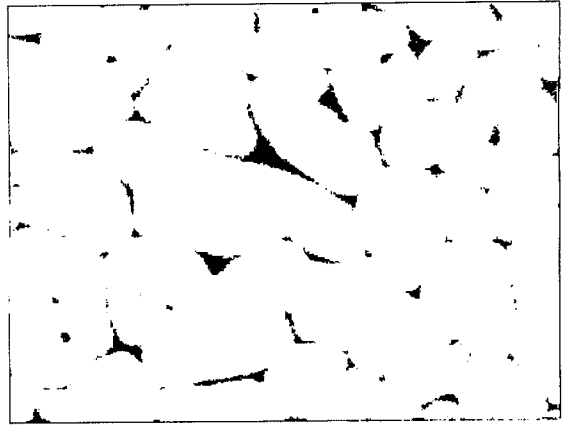
สถาบัน Mintek ประเทศแอฟริกาใต้ ซึ่งเป็นสถาบันสนับสนุนและวิจัยโลหะมีค่า ได้หล่อทองสีม่วงเพื่อศึกษาโครงสร้างและการรวมตัวของอินเทอร์เมทัลลิก โดยได้ผลคือ ก้อนโลหะทองสีม่วงดังแสดงในภาพที่ 2 ซึ่งนำมาใช้เป็นจี้ เนื่องจากสมบัติของผลิตภัณฑ์นี้แข็งและเปราะ จึงได้ถูกพัฒนาเป็นเสมือนอัญมณีมีค่า (Gemslake) และ ภาพที่ 3 แสดงการแตกหักจากการรีดทองสีม่วง ภาพที่ 4 แสดงโครงสร้างจุลภาคของทองสีม่วง ภาพตัดขวางของขนาดเกรนที่เล็กประมาณ 50 ไมครอน



ภาพที่ 2 จี้ที่ทำมาจากทองสีม่วง (Gainsbury, 1984)

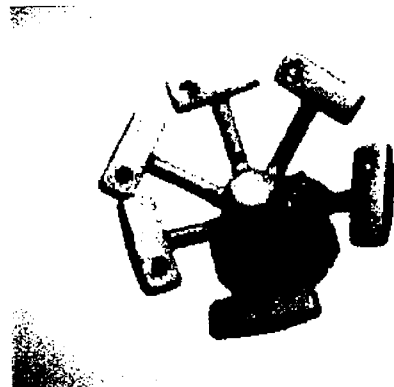


ภาพที่ 3 การแตกหักจากการรีดของทองสีม่วง Au-25wt%Al (Cretu & Van Der Lingen, 2000)



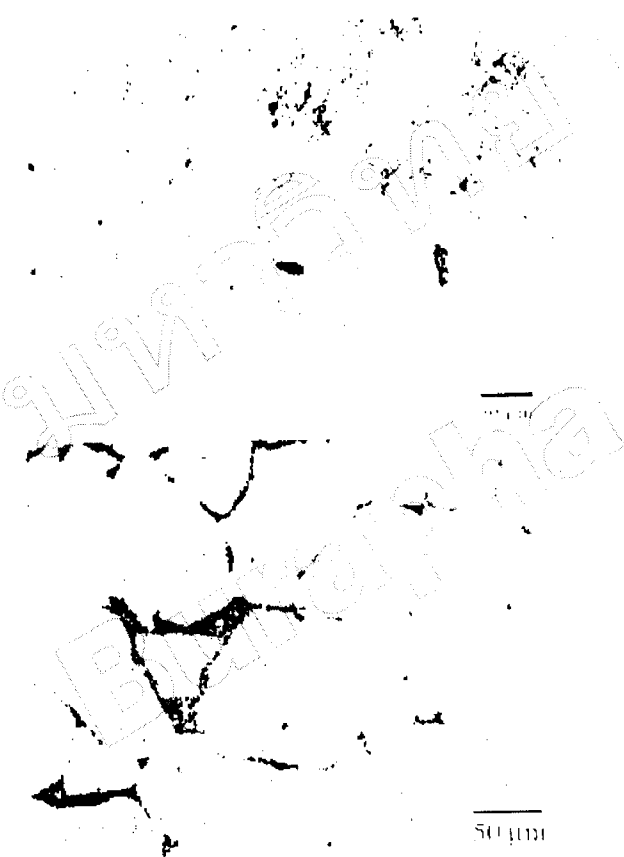
ภาพที่ 4 โครงสร้างจุลภาคของ Au-25wt%Al (Cretu & Van Der Lingen, 2000)

การค้นพบวิธีการผลิตทองสีม่วงเพื่อปรับปรุงสมบัติทางกลของทองสีม่วงให้มีความเหนียวเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสามารถแก้ปัญหาเรื่องการแตกหักง่ายในขั้นตอนการขึ้นรูปต่างๆ ได้ดี นักวิจัยชาวไทยและนักวิจัยชาวอิตาลีได้ศึกษาเทคนิคการปรับปรุงกระบวนการผลิตทองสีม่วง ด้วยการหล่อทองสีม่วงโดยวิธีการหล่อเหวี่ยงแบบสูญญากาศ ซึ่งทำให้โลหะผสมที่ได้จะเป็นเนื้อเดียว (Homogeneous Alloy) (Wongpreedee et al., 2006)



ภาพที่ 5 ชิ้นงานที่ได้จากการหล่อทองสีม่วง

โดยใช้ต้นแบบการหล่อรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ได้คุณภาพของงานหล่อที่ดี แสดงในภาพที่ 5 โครงสร้างจุลภาคแสดงในภาพที่ 6 (ก) พบว่า ขนาดเกรนของทองสีม่วง Au-25wt%Al มีขนาดเล็กในระดับ ที่ใกล้เคียงกับงานของการหล่อจาก สถาบัน Mintek เมื่อเติม 2wt%Si ในโลหะผสมเป็น Au-23wt%Al -2wt%Si ทำให้เกิดการเชื่อมต่อน้อยของยูเทคติก ของ Al-Si ระหว่างขอบเกรน ทำให้เกิดความยืดหยุ่นระหว่างเกรน ดังภาพที่ 6 (ข) ดังนั้น ทำให้มีความเป็นไปได้ในการเพิ่มคุณสมบัติด้านความเหนียวของทองสีม่วงเพิ่มขึ้น จากการทดลองพบว่า Au 25wt%Al มีความแข็งที่ 303.4 ± 13.3 (HV) ส่วนทองสีม่วง Au 23wt%Al ที่เติม Si นั้นมีความแข็ง 240.3 ± 8.0 (HV)



ก) Au-25wt%Al

ข) Au 23wt%Al-2wt%Si

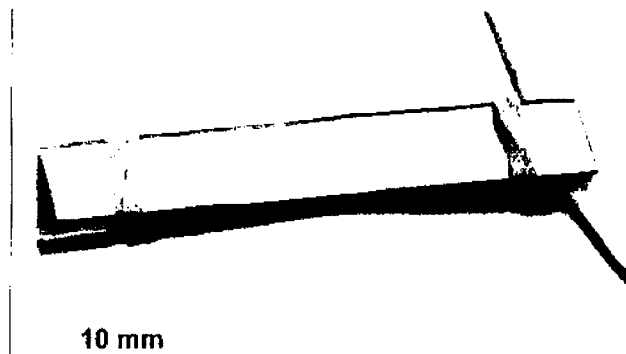
ภาพที่ 6 โครงสร้างจุลภาคของโลหะทองผสม

สมบัติของทองสีม่วงจะมีความเหนียวต่ำหรือเปราะทำให้มีข้อจำกัดของการนำไปใช้งานในด้านต่างๆ รวมถึงการนำไปใช้ผลิตเป็นเครื่องประดับ เพราะการผลิตและการขึ้นรูปทางกลของวัสดุ (เช่น การทุบ การตี การรีด) จะมีผลทำให้วัสดุหรือทองสีม่วงเกิดการแตกหักได้ง่าย อย่างไรก็ตามในอนาคตจำเป็นต้องทำการทดสอบการเติมธาตุผสมต่างๆ เพื่อให้สามารถนำไปหล่อให้ชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนต่อไป โดยให้มีต้นทุนที่ต่ำ และการผลิตในปริมาณที่รวดเร็ว

เทคนิคการเคลือบทองสีม่วงและการใช้ประโยชน์ของทองสีม่วงด้านอื่นๆ

นอกจากนี้ มีการนำทองสีม่วงยังสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอื่นๆ อีกด้วยโดยในปี ค.ศ.2004 C. Mitterer (Mitterer et al., 2004) ได้ศึกษาลักษณะของผิวเคลือบของโลหะผสม Al Au เรื่องสมบัติด้าน ไทรโบโลยี (tribology) ที่เกี่ยวกับศาสตร์และเทคโนโลยีที่เกี่ยวกับการศึกษาเกี่ยวกับอันตรกิริยาที่พื้นผิว อันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ต่างๆ และที่เกิดขึ้นจริงในทางปฏิบัติ รวมถึงแรงเสียดทาน สารหล่อลื่น และการสึกกร่อน ซึ่งได้ค้นพบว่าผิวเคลือบให้สมบัติด้านการหล่อลื่นด้วยตัวเอง (Self lubricating)

ในปี ค.ศ.2005 Michael B. Cortie ศาสตราจารย์จากมหาวิทยาลัยในออสเตรเลีย (Cortie et al., 2005) ได้ศึกษาลักษณะและสมบัติของทองสีม่วง (AuAl) ที่อยู่ในรูปแบบของ Mesoporous metals ซึ่งวัสดุมีลักษณะเป็นรูพรุน โดยวัสดุประเภทนี้มีสมบัติเด่นในด้านการกระตุ้นการเปลี่ยนแปลงทางเคมี และมีความสามารถในการเก็บจุไฟฟ้าสูง ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นขั้วไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cells) และตัวเก็บประจุแบบบาง (Ultra Capacitor) หรือใช้ประโยชน์ทางการแพทย์โดยนำไปเป็นส่วนประกอบของระบบเซนเซอร์ (sensors) ที่ใช้สำหรับฝังในร่างกายมนุษย์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแพทย์



ภาพที่ 7 Prototype ultra-capacitor ที่เคลือบด้วย AuAl_2 บนแผ่นแก้ว

สรุปและวิจารณ์

ในปัจจุบันแม้มีการผลิตเครื่องประดับที่ทำจากทองสีม่วงในเชิงพาณิชย์ แต่ยังไม่เป็นที่นิยมอย่างกว้างขวางและยังมีราคาที่สูงเมื่อเทียบกับโลหะทองทั่วไป ดังนั้นการพัฒนาระบบการผลิตในอนาคตต้องพัฒนาเทคนิคการผลิตให้มีต้นทุนที่ต่ำ รวมถึงการเติมธาตุผสมเพื่อให้มีสมบัติทางกลของทองสีม่วงที่ให้ความเหนียวเพิ่มขึ้นและไม่เกิดการแตกหักในระหว่างขั้นตอนการผลิต เพื่อใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์ในอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ และทองสีม่วงยังความน่าสนใจต่ออุตสาหกรรมอื่นๆ ด้วยเพราะคุณสมบัติพิเศษของทองสีม่วงที่ได้กล่าวมาแล้ว ดังนั้นทองสีม่วงควรมีการพัฒนาและวิจัยเพื่อปรับปรุงและศึกษาคุณสมบัติให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้นเพื่อเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

บทความทางวิชาการนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษาประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2550 (สอ.111/2550)

เอกสารอ้างอิง

- ขจีพร วงศ์ปรีดี และสุพิชฌา สุพรรณสมบูรณ์. (2548). นวัตกรรมการผลิตโลหะมีค่า ทางด้านอัญมณีและเครื่องประดับ. *วารสารวิทยาศาสตร์ มศว*, 23(1), 121-126.
- Cortie, C. W. (2006). Blue, black and purple! the special colours of gold. In *Oral presented at the conference on the International Jewellery Symposium, USA*.
- Cortie, M. B., Maaroo, A., & Smith, G. B. (2005). Electrochemical Capacitance of Mesoporous Gold. *Gold Bulletin*, 38, 14-22.
- Cortie, M. B., Maaroo, A., Smith, G. B., & Ngoepe, P. (2005). Nanoscale coating of AuAl_x and PtAl_x and their mesoporous elemental derivatives. *Current Applied Physics*, 6, 440-443.
- Cretu, C., & Van Der Lingen, E. (2000). Coloured Gold Alloys. *Gold Technology*, 30, 31-40.
- Gainsbury, P. (1984). Colour in Gold alloys. *Aurum*, 20, 40-41.
- George, H. (1997). *Wire Bonding in Microelectronics Materials, Processes, Reliability and Yield*. (2nd ed.). New York: McGraw-Hill.
- Loh, P.C. (2005). Jewelry alloy compositions. *US6929776*.
- Massalski, T., Murray, J., Lawrence, B., & Hugh, B. (1986). *Binary Alloy Phase Diagram*. Ohio: American Society for Metals.
- Mitterer, C., Lenhart, H., Mayrhofer, P. H., & Kathrein, M. (2004). Sputter-deposited Al-Au coatings. *Intermetallics*, 12(5), 579-587.

- Russell, A. M., & Lee, K. L. (2005). *Structure-Property Relations in Nonferrous Metal*. New York: Wiley.
- Shigeru, M. (1987). Purple sintered gold alloy for ornamentation. *JP62240729*.
- Shigeyuki, Y., Nobuo, I., & Keisuke (2003). Nobel metal ornament member and its production method and ornament part and accessory part. *JP2003183710*.
- Steinemann, S. (1988). Intermetallic compound, method for producing the compound, and use of the compound. *EP284699*.
- Wongpreedee, K., Tansakul, T., Schuster, H. J., & Chookruvon, K. (2006). Purple gold: Past, present and future to ductile intermetallics. In *Oral presented at the conference on Gold 2006: International Conference on the Science, Technology, and Industrial Applications, Ireland*. (pp 163).
- Yukio, M., Ikuo, I., Akitada, S., Yukio, N., Zenzo, K., & Maki, O. (1992). Purple gold alloy wire and its manufacture. *JP04176829*.