รายงานสรุปการศึกษา วิจัย

โครงการศึกษาเอกลักษณ์พระพุทธรูปอู่ทองสำริด ทางวิทยาศาสตร์

จัดทำโดย

นายเสน่ห์ มหาผล

นักวิทยาศาสตร์เชี่ยวชาญ (วิทยาศาสตร์การอนุรักษ์)

สำนักพิพิธภัณฑสถานแห่งชาติ

กรมศิลปากร กระทรวงวัฒนธรรม

หลักการและเหตุผล

การศึกษารวบรวม องค์ความรู้ด้านศิลปกรรม ของพระพุทธรูปอู่ทองสำริด ซึ่งสามารถแบ่งแยกตามรูปแบบศิลปกรรมออกเป็นสามรุ่น รวมถึงมีการศึกษาช่วงเวลาการสร้างจากนักวิจัยหลากหลายท่าน ของพระพุทธรูปอู่ทองเน้นงานศึกษาด้านศิลปกรรมนั้น

เพื่อให้งานศึกษามีข้อมูลรอบด้าน โดยเฉพาะ ข้อมูลทางด้านวิทยาศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับองค์ประกอบของโลหะ องค์ประกอบดินใต้ฐาน หรือรูปแบบสามมิติของพระพุทธรูปอู่ทอง การสำรวจ เก็บข้อมูล และการวิเคราะห์องค์ประกอบของโลหะ และพารามิเตอร์ทางวิทยาศาสตร์ของ พระพุทธรูปอู่ทองสำริด ที่มีการแบ่งแยกตามรูปแบบศิลปกรรมที่แน่ชัดจะช่วยขยายองค์ความรู้พัฒนาการ การใช้โลหะหล่อพระพุทธรูปอู่ทอง แบ่งแยกหรือหาเอกลักษณ์ของแต่ละรุ่นได้ถูกต้องมากขึ้น และใช้เป็นหลักฐานในการเปรียบเทียบตีความกำหนดอายุศิลปกรรมที่ไม่ปรากฏหลักฐานการสร้างที่แน่นอนได้อย่างถูกต้องแม่นยำขึ้น อันจะเป็นประโยชน์ต่อการตรวจพิสูจน์เพื่อกำหนดอายุสมัย ประเมินคุณค่าของโบราณวัตถุ ศิลปวัตถุ ตามภารกิจและหน้าที่ประการหนึ่งของกรมศิลปากรต่อไป

พระพุทธรูปอู่ทอง

พระพุทธรูปศิลปะอู่ทองนี้กำหนดอายุครั้งแรกโดย ศ. ยอร์ช เซเดส์ และสมเด็จฯ กรมพระยาดำรงราชานุภาพ เมื่อ พ.ศ. 2471 ดังปรากฏในหนังสือ Les Collections Archeologiques Du Musee National de Bangkok เซเดส์ได้อธิบายว่าพระพุทธรูปศิลปะอู่ทองสะท้อนถึงอิทธิพลของศิลปะเขมรและสยามที่ผสมผสานกันสาเหตุที่ตั้งชื่อว่าพระพุทธรูปแบบสกุลช่างอู่ทองนี้ เพราะตามประวัติศาสตร์แล้ว พระเจ้าอู่ทองเป็นผู้สถาปนากรุงศรีอยุธยาขึ้น จึงถือเป็นประวัติศาสตร์ในช่วงเวลาก่อนอยุธยาถึงอยุธยาตอนต้น และเชื่อว่า(ด้วยองค์ความรู้ในเวลานั้น)พระเจ้าอู่ทองเสด็จมาจากเมืองอู่ทอง สำหรับพระพุทธรูปศิลปะอู่ทองนี้เซเดล์ได้แบ่งออกเป็น 2 'กลุ่ม' คือกลุ่มแรก เป็นกลุ่มที่ปรากฏอิทธิพลของสุโขทัย ดังเห็นได้จากรูปหน้าที่เรียวเป็นรูปไข่และมีพระรัศมีเป็นรูปเปลวเพลิง กลุ่มนี้พบมากในจังหวัดสุพรรณบุรีและจังหวัดพระนครศรีอยุธยา กลุ่มที่สอง เป็นกลุ่มที่ปรากฏอิทธิพลเขมรชัดเจน เช่นใบหน้ารูปสี่เหลี่ยม พบมากในจังหวัดลพบุรีและเมืองสรรคบุรี เซเดส์ไม่ได้กำหนดอายุที่ชัดเจนของพระพุทธรูปศิลปะอู่ทองบอกแต่เพียงว่าเป็นพระพุทธรูปในยุครอยต่อจากเขมรไปสู่ไทย หรือระหว่างคริสต์ศตวรรษที่ 12-16 จากนั้นในปี พ.ศ. 2494 เอ.บี. กริสโวลด์ นักประวัติศาสตร์ศิลปะ ได้เขียนหนังสือ Guide to the Art Exhibits in the National Museum ต่อมาได้รับการแปลโดยหลวงบริบาลบุรีภัณฑ์ เมื่อปี พ.ศ. 2494 ในชื่อศิลปวัตถุในพิพิธภัณฑ์สถานแห่งชาติ ซึ่งเป็นงานเขียนที่เกิดขึ้นเมื่อคราวที่มีการปรับปรุงพิพิธภัณฑ์สถานแห่งชาติพระนคร และจัดการจำแนกโบราณวัตถุสียดใหม่ กริสโวลด์ได้แบ่งพระพุทธรูปศิลปะอู่ทองนี้ออกเป็น 3 'หมวด' ใหญ่ด้วยกัน ดังนี้ หมวดที่ 1 พระเกตุมาลาทำเป็นรูปฝาชีหรือเป็นต่อมกลม พระพักตร์เหมือนกับสมัยทวารวดี แต่ก็ยากที่จะแยกศิลปะสมัยทวารวดีชั้นหลังกับศิลปะสมัยอู่ทองแบบนี้ออกจากกันได้ กำหนดให้มีอายุราวคริสต์ศตวรรษที่ 12-13 หมวดที่ 2 ทรวดทรงบางอย่างเป็นแบบทวารวดี แต่อิทธิพลเขมร (ขอม) เห็นประจักษ์อยู่ที่วเพลิงทำพระพักตร์เป็นสี่เหลี่ยม มีไรพระศกระหว่างเส้นพระเกศาและพระนลาฏ รัศมีเป็นรูปเปลวเพลิงมีอายุราวคริสต์ศตวรรษที่ 14 และหมวดที่ 3 พระพักตร์เป็นรูปไข่

เหมือนพระพักตร์พระพุทธรูปสุโขทัย มีไรพระศกระหว่างเส้นพระเกศาและพระนลาฏเหมือนกัน รัศมีเป็นรูปเปลวเพลิง มีอายุราวคริสต์ศตวรรษที่ 15

แนวทางการจัดหมวดหมู่และอายุสมัยข้างต้นต่อมาได้กลายมาเป็นต้นแบบให้กับ มจ.สุภัทรดิศ ดิศกุล ในการเขียนหนังสือเรื่อง ศิลปในประเทศไทย ซึ่งทำขึ้นกายหลังจากที่ท่านได้แสดงปาฐกถาให้แก่นักศึกษาคณะศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ เมื่อ พ.ศ. 2509 โดยพระพุทธรูปศิลปะอู่ทองได้ถูกแบ่งออกเป็น 3 แบบ ได้แก่แบบที่ 1 มีอิทธิพลของ 'ศิจปะทวารวดีและขอม' ผสมกัน อาจเกิดขึ้นระหว่างพุทธศตวรรษที่ 17-18 แบบ ที่ 2 มีอิทธิพลของ 'ศิลปะขอมหรือลพบุรี' มากยิ่งขึ้น พระรัศมีบนพระเกตุมาลาเป็นเปลว ลักษณะพระรัศมีเช่นนี้อาจเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นในศิลปะอู่ทองก่อนแล้วจึงให้อิทธิพลแก่ศิลปะสุโขทัยต่อไป มีอายุระหว่างพุทธศตวรรษที่ 18-19 แบบที่ 3 มีอิทธิพลของศิลปะสุโขทัยเป็นอย่างมาก มีพระพักตร์เป็นรูปไข่ คงเกิดขึ้นระหว่างพุทธศตวรรษที่ 19-20 มจ.สุภัทรดิศ ยังได้บรรยายด้วยว่า ลักษณะประจำของพระพุทธรูปศิลปะอู่ทองคือ มีไรพระศก ชายจีวรหรือสังฆาฏิตัดเป็นเส้นตรง ประทับขัดสมาธิราบ ปางมารวิชัย และฐานหน้ากระดานแอ่นเป็นร่องเข้าข้างใน

วิวัฒนาการของการผลิตโลหะ

เมื่อประมาณ 4,000 ปีก่อนคริสตศักราช ทองแดงถูกผลิตขึ้นครั้งแรกในแถบตะวันออกกลาง เพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ โดยเฉพาะในการดำรงชีวิต การผลิตทองแดงในช่วงต้น ๆ ได้จากการถลุงสินแร่ malachite(Cu2CO3(OH)2) ด้วย charcoal bed ในช่วงยุคนี้ทองแดงที่ผลิตได้มีความบริสุทธิ์ค่อนข้างสูงเพราะสินแร่ malachite ที่ถูกนำมาใช้เป็นสินแร่ที่ค่อนข้างบริสุทธิ์และขั้นตอนการถลุงสารประกอบคาร์บอเนตก็ไม่ซับซ้อนเหมือนกับสารประกอบอื่น ๆ เช่น ซัลไฟด์ เป็นต้น หลังจากที่ปริมาณสินแร่ malachite เหลือน้อยลงจึงได้มีการหาวัสดุอื่นขึ้นมาทดแทนในยุคสำริด (bronze age) ได้นำเอาทองแดงผสมกับสารหนู (arsenic) ซึ่งเรียกว่า arsenic bronze มาทำเป็นวัสดุใช้สอย แต่ภายหลังได้พบว่าสารหนูเป็นสารที่ไม่ปลอดภัยจึงได้มีการเปลี่ยนมาใช้ดีบุก (tin) แทนการใช้สารหนูวัสดุที่เกิดจากการผสมทองแดงกับดีบุกจะเรียกว่า tin bronze นอกจากการใช้สำริดดังได้กล่าวข้างต้นแล้ว ยังมีการนำทอง (gold) และเงิน(silver) มาใช้ในการตกแต่งสิ่งของเครื่องใช้และยังพบว่าในช่วงยุคสำริดได้มีการขึ้นรูปโลหะด้วยการหล่อในแม่พิมพ์ทราย (sand casting) ต่อมาในยุคเหล็ก (iron age) นอกจากมีการนำเอาเหล็กมาใช้อย่างแพร่หลายแล้วยังมีการนำเอาตะกั่ว (lead) มาใช้อีกด้วย โดยเฉพาะชาวโรมันได้นำเอาตะกั่วมาใช้กับอุปกรณ์และภาชนะประกอบอาหารและรวมถึงระบบทางเดินน้ำนอกจากนี้ชาวกรีกก็ได้ค้นพบปรอท (mercury)และได้นำมาประยุกต์ใช้ผสมกับโลหะอื่น ๆ หรือที่เรียกว่า amalgam นั่นเอง ในศตวรรษที่ 1 ได้มีการคิดค้นโละผสมทองเหลือง (brass) เพื่อใช้ในการตกแต่งสิ่งของเครื่องใช้ต่าง ๆ มากมาย ในศตวรรษที่ 18 ได้นำเอา coke มาใช้อย่างแพร่หลายเพื่อทำหน้าที่เป็นรีดิวเซอร์โดยเฉพาะเพื่อการแทนที่ coal นอกจากนี้ก็ยังได้มีการนำเอาก๊าซไฮโดรเจนมาใช้เป็นรีดิวเซอร์อีกด้วย ในศตวรรษที่ 19 ได้มีการนำเอาโลหะต่างๆมาใช้ประโยชน์มากขึ้นเนื่องจากมีความเข้าใจทฤษฎีและเทคโนโลยีทางด้านโลหะนอกกลุ่มเหล็ก (non ferrous metals) มากขึ้น

การเกิดสินแร่

โลหะที่ถูกนำมาใช้ในปัจจุบันอาจได้จากการผลิตโลหะจากแหล่งทุติยภูมิ (metal production from secondary source) เช่น การนำกลับมาใช้ใหม่ของเศษโลหะต่าง ๆ (recycle of metal scraps) ด้วยขั้นตอนทางโลหวิทยาแยกสกัด (extractive metallurgy) ที่เหมาะสม อย่างไรก็ตามในปัจจุบันโลหะส่วนมากมักผลิตมาจากแหล่งปฐมภูมิ (metal production from primary source) ซึ่งการผลิตดังกล่าวเริ่มจากการที่สินแร่ผ่านขั้นตอนการเตรียมสินแร่ (mineral ore preparation) และตามด้วยขั้นตอนทางโลหะวิทยาแยกสกัด นอกจากนี้สินแร่ที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตโลหะต่าง ๆ อาจได้มาจาก 1) การเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (natural occurrence) บนเปลือกโลก (earth's crust) หรือ2) จากเศษดาวตก (meteors) ที่หล่นมาพื้นผิวโลก แต่โดยทั่วไปแล้วสินแร่ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติจะมีปริมาณมากกว่าจากเศษดาวตกที่หล่นมายังพื้นผิวโลก ดังนั้นวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตโลหะจากแล่งปฐมภูมิจะเป็นสินแร่ที่ได้จากการเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติแร่ (minerals) ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติในเปลือกโลกนั้น เกิดขึ้นด้วยกระบวนการทับถมของแร่ (mineral deposition processes) ในสภาวะทางธรณีวิทยาที่เหมาะสม เพื่อทำให้แร่มีปริมาณความเข้มข้นมากขึ้นและคุ้มค่าต่อการผลิต โดยเรียกแร่ที่มีความเข้มข้นมากขึ้นด้วยสภาวะทางธรณีวิทยาว่า สินแร่ (mineral ore) ตัวอย่างสภาวะทางธรณีวิทยา (geological conditions) ที่ช่วยทำให้ปริมาณความเข้มข้นของสินแร่เพิ่มขึ้น เช่น การตกผลึกของชั้น magna (magna crystallization), กระบวนการปะทุใต้น้ำทะเล (submarine volcanic exhalative process) การตกสะสมจากสารละลายในน้ำร้อน (hydrothermal solution deposition) การผุพัง(weathering) การตกตะกอน (sedimentation) การตกตะกอนของดินทรายปนแร่(placer deposition) และการแปรสัมผัส (contact metasomatism) เป็นต้น สินแร่ที่พบในเปลือกโลกสามารถอยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์ เช่น rutile (TiO_2) และ bauxite ($Al_2O_3.xH_2O$) สารประกอบซัลไฟด์ เช่น galena (PbS) และstibnite (Sb_2S_3) สารประกอบคาร์บอเนต เช่นcalamine ($ZnCO_3$) และsiderite ($FeCO_3$) และสารประกอบแฮไลด์ เช่น fluorite (CaF_2) และ sylvite(KCl) ในปัจจุบันสินแร่ที่นำมาใช้ในการผลิตโลหะมักจะอยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์และซัลไฟด์เป็นส่วนใหญ่ [12] เช่นสินแร่ที่ใช้ในการผลิตทองแดงในปัจจุบันคือchalcopyrite ซึ่งก็คือสารประกอบซัลไฟด์ของทองแดงนั่นเอง ($FeCuS_2$: รูปที่ 2)โดยทั่วไปแล้วสินแร่ chalcopyrite มักจะมีสินแร่อื่นปะปนอยู่ด้วย และที่พบเห็นเป็นส่วนมาก ได้แก่ สินแร่ pyrite (FeS_2) และ pyrrhotite(FeS) การผลิตทองแดงจากสินแร่ chalcopyriteสามารถทำได้ 2 วิธีคือ

1) โลหวิทยาความร้อนสูง (pyrometallurgy หรือ high temperature process)

2) โลหวิทยาสารละลาย (hydrometallurgy)

การผลิตทองแดงโดยใช้โลหวิทยาความร้อนสูงนั้นจะใช้พลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิงผลิตทองแดงที่มีความบริสุทธิ์ถึง 99.99% (รูปที่3)ขั้นตอนการเตรียมสินแร่ประกอบไปด้วยกระบวนการหลัก ๆ ดังนี้ 1) การตัดย่อย (comminution) และ 2) การคัดแยก (separation)ในกระบวนการการตัดย่อยเป็นกระบวนการเริ่มต้นที่ทำให้สินแร่มีขนาดเล็กลงเพื่อให้เหมาะสมกับกระบวนการต่อไป กระบวนการตัดย่อยประกอบด้วย 3 กระบวนการใหญ่ๆ

คือ การบด(crushing) การบดละเอียด (grinding) และการคัดขนาด (screening) ถ้าสินแร่ที่ผ่านกระบวนการบดและการบดละเอียดมีขนาดเล็กจนเกินไปจำเป็นจะต้องมีการคัดขนาดเพื่อกำจัดสินแร่ที่มีขนาดเล็กจนเกินไปเพื่อป้องกันปัญหาที่จะเกิดขึ้นภายหลังโดยเฉพาะการเคลื่อนย้ายและการอุดตัน หลังจากนั้นก็จะนำสินแร่ที่ผ่านกระบวนการตัดย่อยแล้วไปผ่านกระบวนการคัดแยก ซึ่งเป็นการแยกเอาสินแร่ที่ต้องการ(wanted minerals) ออกจากสินแร่ที่ไม่ต้องการหรือกากแร่นั่นเอง (unwanted minerals หรือgangue minerals) ในกรณีการผลิตทองแดงนั้นสินแร่ที่ต้องการก็คือ chalcopyrite และสินแร่ที่ไม่ต้องการก็คือพวก quartz (SiO_2) และ calcite($CaCO_3$) กล่าวอีกนัยหนึ่งกระบวนการคัดแยกเป็นการเพิ่มความเข้มข้นของสินแร่ที่ต้องการโดยการกำจัดสินแร่ที่ไม่ต้องการออกไป เรียกสินแร่ที่ต้องการที่ได้จากกระบวนการคัดแยกว่า “หัวแร่” (concentrate) วิธีที่นิยมใช้สำหรับกระบวนการคัดแยกในปัจจุบันคือการลอยแร่ด้วยฟองอากาศ (froth flotation) ซึ่งหัวแร่ที่ได้จะมีปริมาณของทองแดงประมาณ 25-35%

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตสำริด

ต้นกำเนิดของสารประกอบของโลหะ เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของเปลือกโลกชั้นบนที่มีสภาวะกึ่งแข็งตัวเคลื่อนตัวได้บนส่วนของโลกชั้นกลางที่เป็นหินร้อนเหลว ชั้นเปลือกโลกประกอบด้วยธาตุต่างๆ มากกว่า ๘๐ ธาตุ และมีแร่ต่าง ๆ เกิดขึ้นประมาณ ๒,๐๐๐ ชนิด แร่เป็นสารอนินทรีย์ที่อาจเกิดเป็นธาตุเดี่ยว ๆ เช่น ทองคำ เงิน ทองแดง หรืออาจเป็นสารประกอบทางเคมีที่มีธาตุหลายชนิดประกอบกัน เช่น เหล็กออกไซด์ ทองแดงซัลไฟด์ ทองแดงคาร์บอเนต ดีบุกออกไซด์ ฯลฯ แร่บางชนิดรวมตัวเป็นแหล่งแร่ในชั้นหินในบริเวณที่มีการเคลื่อนตัวของเปลือกโลกหรือกระบวนการเกิดภูเขาไฟ แร่บางชนิดพบในบริเวณทับถมตัวของตะกอน เรียกว่า ลานแร่ ซึ่งมักเป็นแร่ที่มีน้ำหนัก มีความหนาแน่นสูง เกิดจากการผุพังสลายตัวของแร่ในหินต้นกำเนิดและถูกพัดพามาทับถม การที่บริเวณใดของเปลือกโลกจะมีแร่ธาตุชนิดใดอยู่มากเป็นพิเศษนั้น ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม ณ ที่นั้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุณหภูมิ ความดัน และองค์ประกอบของชั้นเปลือกโลก ซึ่งอาจเป็นหินอัคนี หินแปร หินตะกอน สายแร่ ฯลฯ กระบวนการก่อกำเนิดแร่มีหลายกระบวนการ เช่น การตกผลึกจากโลหะหลอมเหลว การระเหิด การตกตะกอนจากสารละลาย การแปรสภาพ และการผุพังอยู่กับที่ (weathering)

ช่างทำโลหะสมัยก่อนประวัติศาสตร์มีความสามารถในการแสวงหาวัตถุดิบที่นำมาใช้เผาไฟให้หล่อหลอมเป็นเครื่องมือเครื่องใช้และเครื่องประดับได้ โลหะที่พบในสภาพโลหะบริสุทธิ์โดยธรรมชาติ เป็นโลหะชนิดแรก ๆ ที่มนุษย์ก่อนประวัติศาสตร์นำมาใช้ จากนั้นจึงค้นพบแร่ของโลหะ พร้อมทั้งพัฒนาเตาเผาให้มีความร้อนสูงพอที่จะถลุงเอาโลหะออกมาใช้งาน วัตถุดิบสำคัญที่ใช้ในการผลิตสำริดได้แก่ แร่ทองแดง แร่ดีบุก และแร่ตะกั่ว

แหล่งแร่ทองแดง

หลักฐานทางโบราณคดีเท่าที่ค้นพบจากแหล่งโบราณคดีก่อนประวัติศาสตร์ในประเทศไทยในขณะนี้ ยังไม่แสดงขั้นตอนการพัฒนาด้านโลหกรรมที่ชัดเจนตั้งแต่ยุคเริ่มแรกของมนุษย์ก่อนประวัติศาสตร์ที่ตั้งถิ่นฐานอยู่ในประเทศไทยมาโดยลำดับ ขณะนี้ยังไม่พบหลักฐานที่แสดงว่าชุมชนโบราณแห่งใดแห่งหนึ่งเริ่มค้นพบโลหะทองแดง และนำมาใช้งานแล้ว วิวัฒนาการมาเป็นโลหะผสมของทองแดงมาเป็นลำดับขั้น การขุดค้นแหล่งโบราณคดีก่อน

ประวัติศาสตร์หลาย ๆ แหล่งพบเพียงหลักฐานที่แสดงการใช้สำริด และอุปกรณ์ที่ใช้ในการหล่อหลอมและถลุงแร่ทองแดงสำริดที่มีอายุเก่าที่สุดเท่าที่ค้นพบในขณะนี้ คือสำริดจากแหล่งวัฒนธรรมบ้านเชียง ซึ่งกำหนดอายุ ๔,๐๐๐ ปีมาแล้ว นักโบราณคดีหลายคนเชื่อว่าเทคโนโลยีในการใช้สำริดของแหล่งวัฒนธรรมบ้านเชียง น่าจะเป็นการรับเอาความรู้ความชำนาญด้านถลุงโลหะและหล่อโลหะจากที่อื่น เนื่องจากยังไม่พบหลักฐานเกี่ยวกับการใช้ทองแดงในชั้นดินที่เก่ากว่านี้เป็นที่น่าเสียดายที่แหล่งโบราณคดีส่วนใหญ่ในประเทศไทยไม่ค่อยพบหลักฐานทางโบราณคดีที่แสดงถึงชนิดของแร่ที่นำมาใช้ในการผลิตสำริด เนื่องจากแหล่งโบราณคดีก่อนประวัติศาสตร์ในประเทศไทยที่ได้ทำการขุดค้นตามหลักวิชาโบราณคดีส่วนใหญ่เป็นหลุมฝังศพ มิใช่บริเวณที่อยู่อาศัยหรือแหล่งที่มีการถลุงแร่ การศึกษาที่มาของแร่จึงต้องศึกษาจากแหล่งแร่ที่ยังคงหลงเหลืออยู่ในปัจจุบันและเปรียบเทียบกับวัตถุหลักฐานที่พบ ประกอบกับการศึกษาหลักฐานการทำเหมืองแร่และการถลุงแร่ที่ปรากฏให้เห็นในแหล่งแร่บางแห่ง ข้อมูลการสำรวจแหล่งแร่ทองแดงในประเทศไทยที่ดำเนินการโดยกรมทรัพยากรธรณี ทำให้ทราบว่าสามารถพบแร่ทองแดงได้ทั่วไปในประเทศไทย ทั้งที่อยู่ในสภาพโลหะบริสุทธิ์โดยธรรมชาติ (native copper) และในรูปของแร่ทองแดง แต่แหล่งแร่ทองแดงเหล่านั้นจัดเป็นแหล่งขนาดเล็ก พบกระจัดกระจาย ไม่พบเป็นแหล่งใหญ่ที่สามารถนำไปใช้ในระดับอุตสาหกรรม คาดว่าในยุคโลหะอาจมีแหล่งแร่ทองแดงกระจัดกระจายอยู่มากกว่าในปัจจุบัน โดยเฉพาะแร่ทุติยภูมิพวกออกไซด์และคาร์บอเนต ซึ่งพบได้ง่ายบนผิวดิน หรืออยู่ในรูปหินโผล่ แหล่งแร่ทองแดงเหล่านั้นมักมีทองแดงธรรมชาติปะปนอยู่ด้วยทองแดงที่พบในสภาพโลหะบริสุทธิ์โดยธรรมชาติ พบได้เพียงเล็กน้อยบนผิวโลกประกอบด้วยทองแดงเกือบร้อยเปอร์เซ็นต์ อาจพบในลักษณะเป็นผงหรือสะเก็ดเล็ก ๆ หรือเป็นก้อนขนาดต่าง ๆ ในหินทราย เมื่อมองดูด้วยกล้องจุลทรรศน์จะพบสิ่งเจือปนอื่น ๆ ปะปนอยู่ด้วยเล็กน้อย ทำให้ทองแดงธรรมชาติมีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ขนาดของเกรนใหญ่กว่าทองแดงที่ผ่านการหลอมเหลว โดยทั่วไปทองแดงธรรมชาติมักเกิดร่วมกับหินอัคนี โดยเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างสารละลายที่มีทองแดงกับแร่เหล็ก มักพบร่วมกับแร่อื่น ๆ เช่น คาลโคไซด์ บอร์ไนด์ เอพิโดต แคลไซต์ ฯลฯ และอาจมีโลหะเงินเกิดขึ้นอยู่ด้วยเล็กน้อย ทองแดงและแร่เหล่านี้อาจเกิดขึ้นภายในช่องว่างภายในลาวา ซึ่งมักมีรูปร่างกลมหรือรี หรืออาจพบอยู่ตรงรอยต่อระหว่างหินทรายและหินกรวดมน ทองแดงธรรมชาติอาจเข้าไปแทนที่เกรนของหินหรือก้อนกรวด หรือในสายแร่หรือทางแร่ที่ตัดผ่านหิน ทำให้บางแห่งอาจพบทองแดงธรรมชาติเป็นปริมาณมากได้ ขึ้นอยู่กับลักษณะทางธรณีวิทยาของแต่ละแหล่ง เช่น ในอเมริกาเหนือบริเวณใกล้ทะเลสาบสุพิเรีย (Superior lake) มีทองแดงธรรมชาติจำนวนมาก ซึ่งชาวพื้นเมืองใช้ทำเครื่องมือเครื่องใช้และเครื่องประดับมาอย่างต่อเนื่องเป็นเวลายาวนานหลายพันปี ในขณะที่บริเวณอื่น ๆ มีทองแดงธรรมชาติเกิดขึ้นน้อย และคงถูกใช้ไปในสมัยก่อนประวัติศาสตร์จนหมดแล้วการที่ทองแดงที่พบในสภาพโลหะบริสุทธิ์โดยธรรมชาติมีปริมาณน้อยมาก จึงทำให้เกิดการค้นพบวิธีการแยกโลหะทองแดงออกจากสารประกอบของทองแดงในเวลาต่อมา สารประกอบของทองแดงมีจำนวนมากกว่าโลหะบริสุทธิ์ตามธรรมชาติอย่างมากมาย โดยเกิดอยู่ตามธรรมชาติในรูปของสารประกอบออกไซด์ ซัลไฟด์ คาร์บอเนต ซัลเฟต ซิลิเกตของทองแดง ซึ่งมีสีต่าง ๆ สะดุดตา แตกต่างจากก้อนหินทั่ว ๆ ไป และมักเกิดอยู่ร่วมกับทองแดงธรรมชาติ สารประกอบของทองแดงที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติและสามารถนำมาถลุงเอาทองแดงออกมาใช้งานมีมากมายหลายชนิด แร่ทองแดงแบ่งออกเป็น ๒ กลุ่มที่สำคัญ ได้แก่

๑. แร่ทองแดงซัลไฟด์ เป็นสารประกอบของทองแดงกับกำมะถัน เป็นแร่ทองแดงปฐมภูมิ ซึ่งมักเกิดการเปลี่ยนแปลงจากการกระทำของน้ำ สารละลาย ลม ก๊าซต่างๆ กลายเป็นแร่ทองแดงออกไซด์ แร่ทองแดงซัลไฟด์ที่สำคัญได้แก่

๑.๑ คาลโคไซท์ (chalcocite : Cu S) เป็นแร่ทองแดงซัลไฟด์ มีสีเทา - ดำ มีความถ่วงจำเพาะ๕.๕-๕.๘ มีปริมาณทองแดง ๗๙.๙ % แร่คาลโคไซต์อาจเกิดเป็นแร่ปฐมภูมิในสายแร่ร่วมกับแร่บอร์ไนต์ คาลโคไพไรต์ และไพไรตหรือพบในลักษณะเป็นสายแร่หรือทางของแร่ที่แทรกอยู่ตามรอยเลื่อน หรือรอยแตกร้าวในหินเดิมหรือพบในหินเพกมาไทต์ซึ่งเป็นหินอัคนีเนื้อหยาบที่มีผลึกแร่โตๆ ประสานกันอยู่ หินดังกล่าวเกิดขึ้นในช่วงสุดท้ายของการเย็นตัวของหินหนืด มักพบแร่ที่มีค่าและแร่หายากปะปนอยู่ นอกจากนี้ยังอาจพบในตะกอนอีกด้วย เหล่งกำเนิดที่สำคัญคือเป็นแหล่งแร่ในเขตที่มีการชะละลาย (leaching) จนมีความสมบูรณ์สูง (enriched zone) ของแหล่งแร่ซัลไฟด์ ภายใต้สภาพที่ผิวพื้นดิน โดยแร่ทองแดงซัลไฟด์ปฐมภูมิจะถูกออกซิไดซ์ สารละลายซัลเฟตจะเคลื่อนลงต่ำทำปฏิกิริยากับแร่ปฐมภูมิเกิดเป็นแร่คาลโคไซต์ แร่คาลโคไซต์ มักเปลี่ยนไปเป็นโคเวลไลต์ มาลาไคต์ อะซูไรต์ บางครั้งพบร่วมกับทองแดงธรรมชาติและคิวไพรต์ ในประเทศไทยมีรายงานว่าพบที่จังหวัดเพชรบูรณ์ สุโขทัย เชียงราย ลำปาง โดยเกิดอยู่ในหินทรายร่วมกับแร่ทองแดงชนิดทุติยภูมิชนิดอื่น ๆ

๑.๒ คาลโคไพไรท์ (chalcopyrite : CuFeS) เป็นแร่ทองแดงซัลไฟด์ มีสีออกเหลือง ผิวมักหมอง เนื้อเปราะร่วน สีผงสีดำอมเขียว มีความถ่วงจำเพาะประมาณ ๔ มีปริมาณทองแดง ประมาณ ๓๕% คาลโคไพไรค์ที่มีเกรนขนาดเล็กจะมีสีเหลืองและมีความแวววาวคล้ายทอง จนมีผู้เข้าใจผิดว่าเป็นทองอยู่เสมอ ๆ จึงมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า "fool's gold"แร่ทองแดงชนิดนี้พบมากที่สุด เกิดขึ้นได้ในสภาะแวดล้อมต่าง ๆ กัน ส่วนใหญ่เกิดในแหล่งแร่แบบน้ำร้อน ที่มีสินแร่หรือแร่กากมาสะสมตัวในรอยแตก รอยเลื่อน หรือช่องว่าง โดยการแทนที่หรือการบรรจุในช่องว่าง หรือของเหลวที่มีอุณหภูมิระหว่าง ๕๐ – ๗๐๐ องศาเซลเซียส และมีความดันตั้งแต่ ๑ - ๓ กิโลบาร์ เป็นตัวนำแร่ธาตุมาสะสมตัว และอาจพบร่วมกับแร่ซัลไฟด์ที่เป็นแร่ปฐมภูมิอื่นๆ หรืออาจพบในสายแร่ที่ให้โลหะในหินอัคนี หรืออาจเกิดจากการแปรสภาพโดยการแทนที่ ซึ่งหมายถึงกระบวนการที่แร่ในหิน ถูกแทนที่โดยการแทรกซึมของสารจากต้นกำเนิดอื่นในรูปของสารละลาย หรือที่เป็นไอโดยเกิดกรรมวิธีทางเคมีอย่างรุนแรง แร่ใหม่อันมีส่วนประกอบทางเคมีบางส่วนหรือทั้งหมดเป็นอย่างอื่น ได้เข้าแทนที่แร่เดิมหรือกลุ่มแร่เดิมโดยไม่เปลี่ยนลักษณะเดิมแหล่งกำเนิดที่สำคัญในสมัยก่อนประวัติศาสตร์ น่าจะเป็นแหล่งแร่ในเขตที่มีการชะละลายจนมีความสูง (enriched zone) ของแหล่งแร่ซัลไฟด์ ภายใต้สภาพที่ผิวพื้นดิน แร่ทองแดงซัลไฟด์ปฐมภูมิจะถูกออกซิไดส์ สารละลายซัลเฟตจะเคลื่อนลงต่ำทำปฏิกิริยากับแร่ปฐมภูมิเกิดเป็นแร่คาลโคไซด์ เรียกว่าการเกิดในเขตที่มีการชะละลายของสินแร่ทองแดงจนมีความสมบูรณ์สูงแร่คาลโพไรต์จึงพบบ่อยในตะกอนที่เกิดจากกระบนนการผุสลายและพังทลายของหินต่างๆ บางกรณีสารประกอบทองแดงอาจละลายอยู่ในสารละลายและถูกชะล้างมาดูดซึมอยู่ในหินที่อยู่ใกล้เคียง แล้วตกผลึกหรือตกตะกอนอยู่ตามบริเวณที่สารละลายไหลไปรวมกัน เช่น ในที่ลุ่ม เพราะฉะนั้นอาจพบคาลโคไพไรต์ได้ในหินตะกอน เช่น หินทราย หินปูน บางครั้งพบคาลโคไพไรต์ในลักษณะเป็นผลึกเล็ก ๆ บนแร่สฟาเลอไรต์ กาลีนา โดโลไมต์ ฯลฯ ในแหล่งแร่ที่อยู่ลึกลงไปมากๆ และมีความร้อน ๓๐๐ - ๔๐๐ องศาเซลเซียส แร่คาลโคไพไรต์และไพไรต์จะเกิดร่วมกับทัวมาลีนหรือควอรตซ์แร่คาลโคไพไรค์มักเปลี่ยนไปเป็นคาลโคไซต์ โคเวล

ไลด์ คริโซคอลลา มาลาไคต์ และเหล็กออกไซด์กรมทรัพยากรธรณีรายงานว่า พบคาลโคไพไรต์ได้ที่แหล่งจันทึก จังหวัดนครราชสีมา แหล่งพนมสารคาม จังหวัดฉะเชิงเทรา และที่จังหวัดนครสวรรค์ อุทัยธานี เพชรบูรณ์ อุตรดิตถ์ พิษณุโลก เลย แพร่ และลำปาง และได้พบร่องรอยการทำเหมืองในสมัยก่อนประวัติศาสตร์ที่ภูโล้น จังหวัดเลย และที่เขาพระงาม จังหวัดลพบุรี

๑.๓ บอร์ไนต์ (bornite : Cu FeS) มีสีแดง - น้ำตาล แต่เปลี่ยนไปเป็นสีม่วงเหลือบ ๆ คล้ายสีขนนกยูง มีชื่อเรียกอีกอย่างว่า Peacock ore มีทองแดง ๕๕.๖ % พบได้ในสายแร่ร่วมกับแร่คาลโคไซต์ คาลโคไพไรต์ และไพไรต์ หรือในหินที่เกิดจากการเย็นตัวของหินหนืด (magmatic) หินเพกมาไทต์ หรือบริเวณที่เกิดการแปรสภาพโดยการแทนที่ ส่วนใหญ่พบในระดับลึก ในประเทศไทยพบเล็กน้อย ที่จังหวัดยะลา และเพชรบูรณ์

๑.๔ โคเวลไลต์ (covellite : Cus) มีสีน้ำเงินเข้ม มักมีสีเหลือบสีเหลืองและแดงเข้ม พบร่วมกับแร่ทองแดงซัลไฟด์อื่น ๆ เช่น คาลโคไพไรต์ คาลโคไซต์ บอร์ไนต์ ส่วนใหญ่พบในบริเวณที่เป็นแหล่งแร่ทุติยภูมิ โดยเปลี่ยนมาจากแร่ ซัลไฟด์ปฐมภูมิ โคเวลไลต์ที่เป็นแร่ปฐมภูมิมีพบบ้างแต่น้อย พบในสายแร่ ตะกอน หรือบริเวณที่มีการผุพังอยู่กับที่ เป็นแร่ที่อ่อนกว่าเอนนาร์ไจต์

๑.๕ เอนนาร์ไจต์ (enargite : 3Cu,S.As ,S) เป็นแร่ทองแดงที่มีอาร์ซีนิคผสมอยู่ ในรูปของอาร์ซีนิคซัลไฟด์ประมาณ ๕๒% เมื่อเผาจะได้กลิ่นคล้ายกระเทียมซึ่งเป็นกลิ่นซองอาร์ซีนิค แร่ชนิดนี้เป็นผลึกที่มีสีสวย สีเทา - ดำ เป็นแร่ที่มีเนื้ออ่อน สามารถตัดได้ด้วยมีด ไม่พบรายงานว่ามีแร่ชนิดนี้ในประเทศไทย

๒. แร่ทองแดงออกไซค์ คาร์บอเนต และซิลิเกต เป็นแร่ทุติยภูมิ มักพบกระจัดกระจายอยู่ในหินภูเขาไฟ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณที่อยู่ใกล้ผิวดินและบริเวณที่อยู่เหนือระดับน้ำดิน แร่ทองแดงกลุ่มนี้ ที่สำคัญได้แก่

๒.๑ คิวไพรต์ (cuprite : Cu 0) เป็นแร่ทองแดงออกไซด์ที่มีสีแดงคล้ำ บางครั้งเกือบดำ มีปริมาณทองแดง ๘๙.๘% พบเป็นปริมาณไม่มากนัก โดยอาจเกิดในสายแร่ หรือในเขตสินแร่มีการออกซิไดซ์ หรือพบในตะกอน มักพบร่วมกับทองแดงธรรมชาติ มาลาไคต์ อะซูไรต์ คาลโคไซด์ เหล็กออกไซด์ ทองแดงออกไซด์ (enorie : CuO) ดินเหนียว ผลึกของคิวไพรต์คล้ายกับผลึกของทองแดงธรรมชาติ

๒.๒ มาลาไคด์ (malachite : CuCO,Cu(OH) เป็นสินแร่ทองแดงที่มีสีสันสวยงาม เป็นสีเขียวเข้มหรือเขียวสดเนื่องจากเป็นทองแดงคาร์บอเนต ผิวของแร่เป็นมันวาว เนื้อแน่น แข็งแรง มีปริมาณทองแดง ๕๘% เกิดเป็นแร่ทุติยภูมพบในเขตที่มีการเพิ่มออกซิเจน (oxidation) ในสายแร่ทองแดง มักเกิดร่วมกับอะไรค์ คิวไพรต์ ทองแดงธรรมชาติ และบนผิวด้านบนของแหล่งแร่ทองแดงที่มีกระบวนการออกซิเดชัน โดยเฉพาะในบริเวณที่มีหินปูนอยู่ร่วมด้วย มักพบร่วมกับไลมอไนต์ แคลไซต์ แคลซีโดนี คริโซคอลลา ปกติจะพบบ่อยในบริเวณที่มีสายแร่ทองแดงตัดผ่านในหินปูน ในประเทศไทยพบที่จังหวัดนครราชสีมา อุตรดิตถ์ และพบทั่วไปในแหล่งแร่ทองแคงอื่น ๆ

๒.๓ อะซูไรต์ (azurite : 2CuCO , Cu(OH) มีสีน้ำเงินสด-น้ำเงินเข้ม เนื้อโปร่งแสงถึงโปร่งใส มีความวาวคล้ายแก้ว มีทองแดงอยู่ ๕๕.๓ % พบอยู่บนผิวด้านบนของแหล่งแร่ทองแดงทีมีกระบวนการออกซิเดชันเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างน้ำที่มีเกลือคาร์บอเนตละลายอยู่กับแร่ทองแดง หรือเกิดจากปฏิกิริยาจะหว่างสารละลาย

ทองแดงซัลเฟตกับหินปูน มักเกิดร่วมกับมาลาไคต์ ไลมอไนต์ แคลไซต์ คาลโคไซต์ คริโซคอลลา ทองแดงออกไซด์ และแร่ทุติยภูมิของทองแดงชนิดอื่น ๆ บางครั้งพบเป็นผลึก พบในสายแร่ หรือในตะกอนที่มีสารละลายของทองแดงมาแทรกซึมอยู่ หรือในบริเวณที่มีการผุพังอยู่กับที่ ในประเทศไทยพบเป็นแร่ทุติยภูมิในจังหวัดตาก สงขลา อุตรดิตถ์ และพบทั่วไปในแหล่งแร่ทองแดง

๒.๔ คริโซคอลลา (chrysocolla : CuSiO, 2H O) เป็นแร่ทองแดงที่มีสีฟ้า หรือฟ้าอมเขียว หรือน้ำเงินอมเขียวคล้ายเทอร์คอยส์ มีผลึกรูปเข็ม ขนาดเล็กมาก จนเกือบไม่เป็นรูปผลึก อาจเกิดเป็นแบบพวงองุ่น (botryoidal) เนื้อสมานแน่น บางครั้งพบลักษณะคล้ายดิน จัดเป็นแร่ปฐมภูมิ มีทองแดงอยู่ ๒% จึงไม่ค่อยนำมาถลุงเพื่อประโยชน์ทางการค้า ส่วนใหญ่ใช้เป็นเครื่องประดับ พบได้ตามสายแร่ หรือในบริเวณที่มีกระบวนออกซิเดชันของแร่ทองแดงเกิดขึ้นและมีซิลิกาอยู่ด้วย หรือเกิดจากกระบวนการผุพังอยู่กับที่ มักเกิดร่วมกับแร่ทองแดงชนิดอื่น ๆ เช่น มาลาไคต์ อะซูไรต์ คิวไพรต์ และโลหะทองแดงธรรมชาติ

๒.๕ โบรแคนไทต์ (brochantite : Cu SO (OH)) เป็นสารประกอบของทองแดงที่มีสีเขียวสด - เขียวเข้มพบได้ในกลุ่มแร่ทุติยภูมิของแหล่งแร่ทองแดง มักพบร่วมกับมาลไคท์ ไลมอไนต์ คิวไพรต์ และคริโซคอลลา

๒.๖ อะทาคาไมต์ (atacamite : Cu Cl (OH) มีทองแดง ๑๔.๘๘% มีสีเขียว เกิดเป็นผลึก กลม ๆ เล็ก ๆ เกาะรวมกัน เป็นแร่ทุติยภูมิที่พบเล็กน้อย โดยพบบนชั้นบนๆ ของบริเวณที่มีแร่ทองแดง มักเกิดจากแร่มาลาไคต์และคิวไพรต์ที่เปลี่ยนสภาพ ในประเทศไทย พบได้ตามบริเวณที่มีแร่ทองแดง โดยเกิดอยู่ชั้นบน ๆ ของสายแร่ที่มีการผุพังอยู่กับที่ หรือเกิดในบริเวณส่วนชั้นที่มีสายแร่ผ่านในหินปูนและหินดินดาน ซึ่งมีการผุพังมาก แร่ทองแดงที่มีอยู่เดิมเปลี่ยนสภาพเป็นแร่อะทาคาไมท์นอกจากนี้ยังมีสารประกอบของทองแดงอื่น ๆ อีก ที่พบในธรรมชาติ ซึ่งหากมีโลหะปริมาณน้อย จะไม่เรียกแร่สารประกอบของทองแดงบางชนิดอาจเกิดร่วมกับสารประกอบของโลหะอื่น ๆจะเห็นได้ว่าแร่ทองแดงเหล่านี้ล้วนมีสีสันเจิดจ้า สวยงาม ดึงดูดสายตา มีลักษณะเด่นแตกต่างจากก้อนหินก้อนกรวดทั่ว ๆ ไป จึงเป็นเหตุผลหนึ่งที่ทำให้มนุษย์ก่อนประวัติศาสตร์ค้นพบการถลุงทองแดงเป็นโลหะชนิดแรก คาดว่าการค้นพบน่าจะเกิดจากความบังเอิญ แต่จะเริ่มต้นขึ้นอย่างไร เมื่อไร หรือรับเอาเทคนิคมาจากผู้ใด ยังคงเป็นปริศนาให้ศึกษาค้นคว้าหาคำตอบกันต่อไปมนุษย์ก่อนประวัติศาสตร์ยุคโลหะตอนต้นในประเทศไทย คงนำแร่ทุติยภูมิของทองแดงซึ่งพบได้ง่ายมาใช้งานก่อนที่จะใช้แร่ปฐมภูมิซึ่งอยู่ลึกลงไปในพื้นผิวโลก ซึ่งจะต้องขุดลึกลงไปในดิน แร่ทุติยภูมิของทองแดงจำพวกสารประกอบออกไซด์ คาร์บอเนต ของทองแดง ซึ่งมีสีแดง - เขียว เกิดจากกระบวนการออกซิเดชัน (หมายถึงกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่มีออกซิเจนเข้ามาเกี่ยวข้อง) หรือเกิดจากการชะละลายของแร่ที่ละลายน้ำได้ จึงเกิดอยู่ใกล้ผิวดิน ลงไปจนถึงระดับน้ำใต้ดิน แร่ทุติยภูมิพวกทองแดงซัลไฟด์ที่เกิดในเขตที่มีการชะละลายจนมีความสมบูรณ์สูง พบอยู่ใต้ระดับน้ำใต้ดิน ในขณะที่แร่ปฐมภูมิพวกทองแดงซัลไฟด์เกิดอยู่ในดินลึกลงไป ในบรรยากาศที่ไม่มีออกซิเจน เมื่อแร่ทุติยภูมิเหล่านี้ถูกชะล้างพัดพาลงมาตามแม่น้ำลำธาร คงมีผู้เก็บเอาไปสะสมไว้ ต่อมาพบว่าเมื่อนำก้อนสีสวยเหล่านี้ไปเผาไฟ อาจจะโดยบังเอิญ แล้วได้ของแข็งซึ่งมีความแข็งแรง ขึ้นรูปต่าง ๆ ได้ ส่วนแหล่งแร่ปฐมภูมิ ส่วนใหญ่เป็นแร่ทองแดงซัลไฟด์ ซึ่งมีเหล็กผสมอยู่ด้วย ในลักษณะสารประกอบเชิงซ้อน บางที่อาจพบในหินที่มีรูพรุนมาก เช่น หินทราย ซึ่งมีแร่ทองแดงเป็นก้อน ๆ อยู่ในรูปของ

มาลาไคต์ อะซูไรต์ และคิวไพรต์ ปนอยู่กับควอรตซ์และเหล็กเล็กน้อยนอกจากนี้ก็เป็นไปได้ว่าอาจมีการถลุง gossam ซึ่งเป็นสารประกอบของเหล็กออกไซด์ มีสีเหลืองหรือสีแดง ที่อยู่ชั้นบนของแร่ทองแดงซัลไฟด์ เกิดจากกระบวนการออกซิเดชันและการชะล้างของแร่ซัลไฟด์ เมื่อน้ำ gossam มาเผาจะได้ทองแดงออกมาใช้งานแหล่งแร่ทองแดงเหล่านี้น่าจะเป็นแหล่งแร่ทองแดงที่มนุษย์ก่อนประวัติศาสตร์ที่อาศัยอยู่บนผืนแผ่นดินไทยใช้ประโยชน์เมื่อ ๒,๐๐๐ - ๕,๐๐๐ ปีมาแล้ว คาดว่ามนุษย์ก่อนประวัติศาสตร์ระยะแรก ๆ คงใช้ประโยชน์จากแร่ที่พบอยู่นพื้นผิวดินเท่านั้น ไม่ได้มีกรขุดลึกเข้าไปในภูเขาหรือใต้พื้นดินในลักษณะของการทำเหมือง แหล่งแร่ที่ชุมชนโบราณนำมาใช้งานอาจเป็นแหล่งเล็ก ๆ เหมาะกับความต้องการใช้งานผลิตวัตถุขนาดเล็ก เป็นจำนวนไม่มากนัก เพียงพอต่อการใช้งานในชุมชนหรือแลกเปลี่ยนกับชุมชนใกล้เคียง ไม่ได้ใช้งานในระดับอุตสาหกรรม การถลุงและการหลอมหรือหล่อทุกขั้นตอนใช้มือและเตาผาขนาดเล็กแบบเตาถ่านธรรมดาเมื่อชุมชนมีความต้องการใช้ทองแดงมากขึ้น จึงมีการเสาะแสวงหาแหล่งแร่ และขุดแร่ออกมาใช้เป็นปริมาณมาก ผลการสำรวจทางโบราณคดีและธรณีวิทยา ได้พบร่องรอยการทำเหมืองแร่ทองแดงในสมัยก่อนประวัติศาสตร์ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคกลางของไทย เช่น อำเภอภูเวียง จังหวัดขอนแก่น พบแร่มาลาไคต์ และอะซูไรต์ ในจังหวัดเลย พบแหล่งแร่ทองแดงที่สำคัญหลายแห่ง ได้แก่ แหล่งแร่ทองแดงที่ภูโล้น อำเภอสังคม จังหวัดเลย ซึ่งตั้งอยู่ริมแม่น้ำโขง ลักษณะเป็นหินโผล่ ให้เห็นคราบทองแดงชนิดมาลาไคต์ปะปนอยู่กับหินสการ์น ซึ่งประกอบด้วยแร่การ์เน็ต และควอรตซ์ เป็นส่วนใหญ่ นักธรณีวิทยาเชื่อว่าแหล่งแร่นี้เกิดตรงรอยสัมผัสระหว่างหินชั้นซึ่งประกอบด้วยหินดินดานและหินปูน สัมผัสกับหินอัคนีแทรกซอนชนิดแกรโนไดออไรต์ แร่ทองแดงที่พบที่นี่ส่วนใหญ่เป็นทองแดงธรรมชาติ มาลาไคต์ คาลโคไพไรต์ บอร์ไนต์ และแมกนีไทต์แหล่งแร่ทองแดงที่ภูโล้นปรากฏหลักฐานสำคัญหลายรายการ เช่นถ่านจากพื้นที่บริเวณที่มีร่องรอยการเตรียมและแต่งแร่ ชั้นเศษหินปนแร่ทับถมเป็นชั้นหนากว่า ๑๐ เมตร มีอุโมงค์ที่เกิดจากการขุดแร่ และพบหลักฐานแสดงว่ามีการหล่อสำริดในบริเวณนี้ด้วย เนื่องจากพบเศษของเบ้าที่ใช้หล่อและหลอมสำริด และพบเศษชิ้นส่วนทองแดงธรรมชาติ สำริดและดีบุก ติดอยู่ที่เบ้าด้วย คาดว่าการทำเหมืองนี้อาจเริ่มขึ้นเมื่อประมาณเกือบ ๔,๐๐๐ ปีมาแล้ว และทำต่อเนื่องมาเป็นเวลานานแหล่งแร่ทองแดงที่สำคัญในจังหวัดเลยมีอีกหลายแห่งนอกจากภูโล้น ได้แก่ ภูหินเหล็กไฟ ภูทองแดง และอำเภอท่าลี่ ภูหินเหล็กไฟตั้งอยู่ที่บ้านห้วยม่วง อำเภอเมือง จังหวัดเลย เป็นที่สะสมตัวของแร่ซัลไฟด์ เกิดจากน้ำแร่ถูกนำขึ้นมาโดยกระบวนการน้ำแร่ร้อน ทำให้หินข้างเคียงซึ่งเป็นหินทราย หินดินดาน หินทรายแป้ง หินทัฟฟ์ หินไรโอไลต์ถูกแปรสภาพไป บริเวณที่มีการสะสมตัวของแร่ทองแดงฝังประอยู่ในเนื้อหิน เรียก porphyry copper ore บางแห่งพบเป็นสายแร่ทองแดง ซึ่งมีปริมาณทองแดงสูง แร่ทองแดงซัลไฟด์ที่พบเป็น คาลโคไพไรต์ คาลโคไซต์ บอร์ไนต์ และพบมาลาไคด์ อะซูไรต์อยู่ตอนบน นอกจากนี้ยังพบแร่สังกะสีและแร่ตะกั่วปะปนบ้างเล็กน้อยแร่ทองแดงที่พบที่ภูทองแดงซึ่งตั้งอยู่ทางทิศใต้ของจังหวัดเลย มีลักษณะคล้ายกับแร่ทองแดงที่พบที่ภูหินเหล็กไฟ มีทั้งสายแร่ และแร่ฝังประที่เกิดจากกระบวนการน้ำแร่ร้อนแทรกเข้ามาในหินยุคคาร์บอนิเฟอรัส แร่ที่พบส่วนใหญ่เป็นคาลโคไพไรด์ มาลาไคต์ ทองแดงธรรมชาติ และมีแร่เหล็กแมกนีไทต์ปะปนอำเภอท่าลี่มีแหล่งแร่ทองแดงหลายแห่ง แร่ทองแดงเหล่านี้มีความสัมพันธ์ทั้งทางตรงและทางอ้อมกับหินอัคนีพุและหินอัคนีแทรกซอนสัมผัสอยู่กับหินตะกอนข้างเคียง ได้แก่หินทรายและหินทรายแป้ง เกิดแบบน้ำแร่ร้อนแทรกเข้ามาในเนื้อหิน ลักษณะฝังประและเป็นสายแร่รวมกับสายควอรตซ์ แร่ทองแดงส่วนใหญ่เป็นทองแดง

ธรรมชาติ คาลโคไพไรต์ คาลโคไซต์ และบอร์ไนต์แหล่งแร่ทองแดงอีกแห่งหนึ่งในภาคตะวันออกเฉียงเหนืออยู่ที่บ้านผาแบ่น ตำบลหนอง อำเภอสังคม จังหวัดหนองคาย พบแร่ทองแดงเกิดอยู่ใกล้หินอัคนีชนิดแกรโนไดออไรต์ ในจังหวัดนครราชสีมามีแหล่งแร่ทองแดงอยู่ที่ตำบลหมูสี ตำบลขนงพระ ตำบลหนองจับ อำเภอปากช่องแร่ทองแดงที่พบเป็นมาลาไคต์ คาลโคไพไรต์ อะซูไรต์ เกิดอยู่ใกล้ ๆ สายแร่ควอรตซ์ ตามรอยสัมผัสระหว่างหินแกรโนไดออไรต์กับหินแปรสัมผัส โดยเฉพาะพวกหินอ่อน และมักพบหินสการ์นเกิดร่วมด้วยเหมืองแร่ทองแดงที่สำคัญในภาคกลางอยู่ที่ภูเขา ๔ ลูกในพื้นที่ย่านเขางพระจันทร์ ซึ่งอยู่ใน อำเภอโคกสำโรงและอำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี ได้แก่ เขาทับควาย เขาพุคา เขาพระงาม เขาผาแดง และเขาพระบาทน้อย ร่องรอยการทำเหมืองที่พบที่เขาทับควาย เป็นร่องรอยของเหมืองปล่องที่มีลักษณะเป็นอุโมงค์ที่ขุดในแนวดิ่ง ลัดเลาะไปตามสายแร่ทองแดง และพบร่องรอยของหินพะเนินที่ใช้ในการทุบและขุดแร่ คาดว่าการทำเหมืองแร่ทองแดงที่เขาทับควายเริ่มตั้งแต่สมัยก่อนประวัติศาสตร์ยุคสำริดของภาคกลางซึ่งมีอายุราว ๒,๗๐๐- ๓,๕๐๐ ปีมาแล้ว และน่าจะเป็นทองแดงที่นำไปถลุงที่โนนป่าหวายซึ่งเป็นแหล่งถลุงทองแดงสมัยก่อนประวัติศาสตร์ เนื่องจากระยะทางระหว่างเขาทับควายและโนนป่าหวาย ประมาณ ๗ กิโลเมตร หลักฐานทางโบราณคดีจากโนนป่าหวาย แสดงให้เห็นชั้นของวัสดุเหลือทิ้งหรือขยะจากการถลุงทองแดงทับถมกันหนาประมาณ ๒ เมตร การวิเคราะห์ชั้นดิน แสดงให้เห็นว่าระยะแรกๆ ประมาณ ๓,๖๐๐ - ๔,๕๐๐ ปีมาแล้ว มีการถลุงทองแดงระดับย่อยๆ แต่ในระยะต่อมา ประมาณ ๒,๗๐๐ – ๓,๖๐๐ ปีมาแล้ว พบวัสดุเหลือทิ้งหรือขยะการถลุงทองแดงจำนวนมหาศาล ได้แก่ ตะกรันจากการถลุงทองแดง แม่พิมพ์ชนิดสองชิ้นประกบกัน ทำด้วยดินเผา แม่พิมพ์ดินเผารูปทรงถ้วยและทรงกรวยสำหรับหล่อก้อนโลหะทองแดง (copper ingots) ก้อนหินที่ใช้บดย่อยแร่และเศษเบ้าดินเผาสำหรับถลุงทองแดง แต่ไม่พบวัตถุโลหะเลย สันนิษฐานว่าโนนป่าหวายน่าจะเป็นแหล่งถลุงทองแดงและนำไปค้าขายแลกเปลี่ยนกับชุมชนอื่นเหมืองแร่ทองแดงที่เขาพุคา ซึ่งตั้งอยู่ในเขตศูนย์การบินทหารบก จังหวัดลพบุรี มีลักษณะเป็นอุโมงค์อย่างน้อย ๕ แห่ง และมีร่องรอยการทำเหมืองปิดลักษณะเป็นหลุมและเป็นร่องยาวตามแนวสายแร่อีกหลายแห่ง พบแร่มาลาไคต์และคริโซคอลลา แหล่งโบราณคดีที่ตั้งอยู่ใกล้เคียง คือโนนป่าหวาย โนนหมากลา อ่างเก็บน้ำนิลกำแหง พบร่องรอยการผลิตแร่ทองแดงและการหล่อหลอมทองแดงเหมืองแร่ทองแดงที่เขาพระงามและเขาผาแดงในอำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี มีลักษณะเป็นเหมืองเปิดส่วนที่เขาพระบาทน้อย พบทั้งเหมืองเปิดและร่องรอยการขุดแร่เป็นหลุมกว้างนอกจากนี้ยังพบว่าแหล่งแร่ทองแดงที่คาดว่ามนุษย์ก่อนประวัติศาสตร์นำมาใช้งานอยู่ที่อำเภอพนม จังหวัดฉะเชิงเทรา ซึ่งพบมาลาไคต์ อะซูไรด์ คิวไพรต์ คาลโคไพไรต์ และทองแดงธรรมชาติ

แหล่งแร่ดีบุก

มักมีคำถามว่าแหล่งแร่ดีบุกที่มนุษย์ก่อนประวัติศาสตร์นำมาใช้ในการผลิตสำริดอยู่ที่ใด ขณะนี้ยังไม่พบหลักฐานทางโบราณคดีที่จะให้คำตอบได้แน่นอน คงทำได้เพียงศึกษาแหล่งแร่ดีบุกที่มีอยู่ในประเทศและในประเทศใกล้เคียงเพื่อศึกษาความเป็นไปได้แหล่งแร่ดีบุกในประเทศไทยส่วนใหญ่พบด้านตะวันตกของประเทศติดกับชายแดนประเทศสหภาพเมียนมาร์ โดยพบในภาคใต้ทุกจังหวัด ภาคกลางพบที่ จังหวัดอุทัยธานี ชัยนาท สุพรรณบุรี กาญจนบุรี ราชบุรี เพชรบุรี ภาคเหนือพบที่ จังหวัดกำแพงเพชร ตาก เชียงใหม่ ลำปาง เชียงราย แม่ฮ่องสอน ส่วนภาคตะวันออกพบที่จังหวัดชลบุรี ระยองและจันทบุรี ส่วนในประเทศใกล้เคียง พบที่ใกล้กรุง

เวียงจันทน์ ประเทศสาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว น่าแปลกที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือซึ่งพบสำริดในแหล่งโบราณคดีก่อนประวัติศาสตร์จำนวนมาก แต่ไม่พบร่องรอยของแหล่งแร่ดีบุกอยู่เลย จึงเกิดข้อสันนิษฐานต่าง ๆ นานา บ้างก็สันนิษฐานว่าอาจนำแร่ดีบุกมาจากลาวหรือแหล่งอื่น ๆ ที่อยู่ใกลออกไปแร่ดีบุกที่พบในประเทศไทยมี ๒ ชนิด คือ แคสซิเทอไรต์ (cassiterite) ซึ่งมีสูตรเคมี SnO (stannous dioxide) มีดีบุก ๗๘% อีกชนิดหนึ่งคือ สแตนไนต์ (stannite : CuFesns) ซึ่งพบน้อยมาก แร่ดีบุกส่วนมากมีสีน้ำตาลดำ หรือดำ น้ำผึ้ง เหลือง แดง และม่วงคล้ายเปลือกมังคุดการกำเนิดแร่ตีบุกมีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับหินอัคนีแทรกซอนชนิดกรด โดยทั่วไปเกิดอยู่ในสายแร่แบบน้ำร้อนแทรกในหินแกรนิตหรือหินชั้นที่อยู่ข้างเคียง และอาจเกิดเป็นก้อนหรือผลึกเล็ก ๆ ฝังในหินเพกมาไทต์ หินสการ์น รวมถึงในหินแกรนิตที่อยู่ใกล้กับบริเวณสัมผัสกับหินข้างเคียงด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณที่หินแกรนิตแทรกดันขึ้นมาสัมผัสกับหินข้างเคียง ทำให้เกิดการเปลี่ยนสภาพของหิน และมีน้ำแร่หรือสายแร่เข้ามาประจุอยู่ตามรอยแตกของหินแกรนิตหรือหินท้องที่แร่ดีบุกมีความทนทานต่อการสึกกร่อนทางกายภาพสูง เมื่อหินต้นกำเนิดผุพัง จึงถูกนำพาไปสะสมตามเชิงเขาหรือแอ่งและที่ราบลุ่มต่าง ๆ เกิดเป็นแหล่งแร่ดีบุกแบบลานแร่ แร่ดีบุกที่พบในลักษณะเป็นก้อนกรวดในแหล่งลานแร่เรียกว่า ดีบุกตามลำน้ำ (stream tin) แหล่งแร่ดีบุกอาจเป็นชนิดกำเนิดเดิมและชนิดหลุดจากต้นกำเนิดเดิม ชนิดแรกพบอยู่ในหินต้นกำเนิดเดิมที่ยังไม่ผุพังทำลาย เช่น ฝังประในหินแกรนิต เพกมาไทต์ สายควอรตซ์ และแบบแปรสภาพโดยการแทนที่ ชนิดหลังเป็นแบบที่แร่ดีบุกหลุดออกมาเมื่อต้นกำเนิดผุพังแล้วถูกพัดพาไปโดยกระแสน้ำหรือพลังงานอย่างอื่นไปสะสมตัวอยู่ ณ ที่แห่งใหม่ อาจใกล้หรือไกลจากแหล่งกำเนิด ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม แหล่งแร่ดีบุกในภาคเหนือส่วนใหญ่มีต้นกำเนิดเดิมมาจากสายควอรตซ์ บางส่วนมีต้นกำเนิดจากสายเพกมาไทต์/แอไพลต์ มีรายงานว่าพบแร่ดีบุกบริเวณถ้ำขุนตาน และดอยอินทนนท์ จังหวัดเชียงใหม่ อำเภอแม่สะเรียง จังหวัดแม่ฮ่องสอน ในจังหวัดเชียงรายพบที่อำเภอเวียงป่าเป้า ในขณะที่แหล่งแร่ดีบุกในภาคกลาง ภาคใต้ และภาคตะวันออกพบตามแนวเทือกเขาหินแกรนิต แต่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือไม่พบแหล่งแร่ดีบุก ประเทศเพื่นบ้านมีแหล่งแร่ดีบุกอยู่มากมายโดยเฉพาะอย่างยิ่งประเทศสหภาพเมียนมาร์ ประเทศสาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว และมณฑลยูนนานในประเทศจีน คาดว่าในสมัยนั้นมนุษย์ก่อนประวัติศาสตร์คงพบแร่ดีบุกชนิดหลุดออกจากต้นกำเนิดเดิมปะปนอยู่กับกรวด ทรายในแม่น้ำ ลำธาร แล้วเก็บขึ้นมาใช้งาน ในระยะนั้นคงรู้จักใช้ดีบุกผสมกับทองแดงเพื่อผลิตสำริดเท่านั้น คงไม่ทราบว่าตัวดีบุกเองสามารถใช้งานในลักษณะโลหะดีบุกได้ด้วย เพราะยังไม่พบหลักฐานทางโบราณคดีที่แสดงว่ามีการนำดีบุกมาใช้งานแบบอื่น

แหล่งแร่ตะกั่ว

หลักฐานทางโบราณคดีแสดงว่า มนุษย์ก่อนประวัติศาสตร์รู้จักใช้ตะกั่วมาเป็นเวลาประมาณ ๔,๐๐๐ ปี ในจีนและเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โดยนำมาผสมในสำริดเพื่อให้ได้โลหะผสมที่หล่อได้ง่าย คาดว่ามนุษย์ก่อนประวัติศาสตร์คงสนใจลักษณะแวววาวและน้ำหนักของแร่กาลีนา ที่โดดเด่นกว่าก้อนหินทั่วไป จึงเก็บมาและค้นพบโดยบังเอิญว่าเมื่อเผาไฟจะหลอมเหลว ได้โลหะที่มีลักษณะพิศษ เนื่องจากตะกั่วมีจุดหลอมเหลวต่ำ แต่ยังไม่พบหลักฐานทางโบราณคดีที่แสดงวิธีการขุดแร่และแหล่งแร่ที่มนุษย์ก่อนประวัติศาสตร์ในประเทศไทยนำมาใช้งาน อาจเป็นไปได้ว่าการขุดแร่หรือกิจกรรมของมนุษย์ในระยะหลัง ๆ เมื่อไม่นานมานี้ ได้ทำลายหลักฐานทางโบราณคดี

ไปหมดแล้วแต่ในแหล่งอารยธรรมอื่นๆ พบหลักฐานการใช้ตะกั่วเก่าแก่ใกล้เคียงกับทองแดง แหล่งโบราณคดีก่อนประวัติศาสตร์แห่งหนึ่งในอะนาโตเลีย กำหนดอายุประมาณ ๘,๕๐๐ ปีมาแล้ว พบลูกปัดตะกั่วอยู่ร่วมกับลูกปัดทองแดง อาจเป็นไปได้ว่าชุมชนโบราณแห่งนั้นรู้จักหลอมตะกั่วและนำมาใช้งานเนื่องจากตะกั่วมีจุดหลอมเหลวต่ำ ถลุงง่ายและแร่ตะกั่วหาได้ง่าย รูปร่างลักษณะเป็นที่สะดุดตา โดยมีผลึกสีเทาเข้มรูปลูกบาศก์ที่มีความมันวาว และมีน้ำหนักมาก แหล่งโบราณคดีก่อนประวัติศาสตร์หลายแห่งในอิรัก เช่น Yarim Tepe กำหนดอายุประมาณ ๘,๐๐๐ ปีมาแล้วและ Arpachiyeh ซึ่งกำหนดอายุประมาณ ๗,๐๐๐ ปีมาแล้ว พบโลหะตะกั่ว แหล่งโบราณคดีก่อนประวัติศาสตร์ในอิหร่าน เช่นที่ Anan และ HissarIII ซึ่งกำหนดอายุประมาณ ๖,๐๐๐ ปีมาแล้ว ก็พบโลหะตะกั่วด้วยเช่นกัน ในอียิปต์ก็พบโลหะตะกั่วแกะสลักเป็นรูปสลักเล็ก ๆ ที่แหล่งโบราณคดี Naqada ซึ่งกำหนดอายุประมาณ ๖,๐๐๐ ปีมาแล้วหลักฐานทางโบราณคดีที่แสดงว่ามีการใช้ตะกั่วในภูมิภาคต่าง ๆ ยังคงมีอย่างต่อเนื่อง แหล่งโบราณคดีหลายแห่งในเอเชียตะวันออกกลาง เช่น ปาเลสไตน์ เออร์ Ur และเมโสโปเตเมีย พบตุ้มถ่วงแห และเบ็ด แวสำหรับปั่นด้าย เส้นลวดที่ทำด้วยตะกั่ว ในแหล่งโบราณคดีที่กำหนดอายุประมาณ ๔,๐๐๐ - ๕,๐๐๐ ปีมาแล้ว นอกจากนี้ยังพบโลหะเงินปะปนในแหล่งโบราณคดีหล่านี้ด้วยเป็นไปได้ว่าโลหะเงินที่นำมาใช้ เป็นผลพลอยได้จากการทำให้ได้ตะกั่วบริสุทธิ์ เนื่องจากแร่ตะกั่วบางแห่งมักมีเงินเจือปนอยู่ด้วยแคว้นราชฐานในอินเดียพบหลักฐานทางโบราณคดีที่แสดงหลักฐานการทำเหมืองแร่ตะกั่วและสังกะสี ซึ่งชี้ให้เห็นว่าใช้วิธีการคล้ายกันกับการแยกแร่ทองแดง ในประเทศสหภาพเมียนมาร์ และมณฑลยูนนาน มีเอกสารโบราณที่บันทึกวิธีการขุดแร่ตะกั่วมาใช้งานในปริมาณน้อยๆ โดยการขุดอุโมงค์ในดินตามแนวนอน มีปล่องในแนวดิ่งเพื่อให้อากาศเข้าออกได้ อุโมงค์มีลักษณะคดเคี้ยวไปตามสายแร่ ภายในอุโมงค์ใช้ไม้ผ่าค้ำยัน ผนังและเพดาน เพื่อป้องกันการถล่ม อุโมงค์ที่ลึกใช้ไม้ค้ำยันมากขึ้น และพบว่ามีการใช้ไฟเผาภายในอุโมงค์ เพื่อให้แร่แตกออกเป็นก้อนเล็กลง เหมืองบางแห่งพบอุปกรณ์ในการยกหรือกว้านในการลำเลียงแร่ออกไป บางแห่งพบท่อระบายน้ำออกจากเหมืองกรมทรัพยากรธรณีได้สำรวจแหล่งแร่ตะกั่วในประเทศไทย พบว่ามีมากที่จังหวัดกาญจนบุรี ตาก เชียงใหม่แม่ฮ่องสอน ลำปาง ลำพูน แพร่ เพชรบูรณ์ เลย เพชรบุรี นครศรีธรรมราช พัทลุง และยะลา โดยพบตะกั่วอยู่ร่วมกับสังกะสี แร่ตะกั่วและแร่สังกะสีที่พบในประเทศไทย มักเกิดจากสภาพแวดล้อมทางธรณีวิทยาแบบเดียวกัน แร่ตะกั่วที่พบมีทั้งที่เป็นแร่ตะกั่วซัลไฟด์ คือ กาลีนา (galena : PbS) และตะกั่วคารับอนต คือแร่เซรัสไซต์ (cerussite : PbCO) ส่วนแร่สังกะสีมักพบแร่สฟาเลอไรต์ (sphalerite : ZnS) แร่เฮมิมอร์ไฟต์ (hemimorphite : Zn (SiO)(OH) .HO แร่ซิงค์ไคต์ (zincite : ZnO) และแร่สมิทซอไนต์ (smithsonite : ZnCO) แร่ตะกั่วเกือบไม่ละลายน้ำ ส่วนแร่สังกะสีละลายน้ำได้ดีจึงถูกน้ำชะละลายออกไป เหลือแต่แร่ตะกั่วในบริเวณที่มีการออกซิเดชันมาก เหนือระดับน้ำใต้ดิน แร่ตะกั่วบางแห่งเกิดร่วมกับเงิน ใช้เป็นแหล่งแร่เงินมาช้านาน แหล่งแร่ตะกั่วบางแห่งพบทองคำ พลวง แคดเมียม และเหล็กอยู่ด้วยการกำเนิดแหล่งแร่ตะกั่ว - สังกะสี มีทั้งแบบแหล่งแร่ปฐมภูมิและแหล่งแร่ทุติยภูมิ แหล่งแร่ปฐมภูมิส่วนใหญ่เป็นสารประกอบซัลไฟด์ ได้แก่แร่ตะกั่วกาลีนา (Pbs) และแร่สังกะสี สฟาเลอไรต์ (ZnS) ซึ่งพบได้หลายแบบได้แก่

๑. แร่สะสมตัวในชั้นหินอุ้มแร่ (stratabound massive sulfide deposit) แหล่งแร่ชนิดนี้ไม่มีความสัมพันธ์กับกระบวนการเกิดหินอัคนี แต่เกิดจากแอ่งหินดินดานหรือหินดินดานปนหินปูนที่มีตะกั่วปะปนสารละลายที่มีตะกั่วถูกแรงกดตามธรรมชาติบีบอัดให้เข้าไปแทรกตัวตกตะกอนอยู่ตามแนวชั้นหินปูน ได้แก่ แหล่งภูรวก

บ้านนาดินดำ อำเภอเมือง จังหวัดเลย พบแร่ตะกั่วแทรกอยู่ในหินปูนยุคเพอร์เมียน เป็นแร่สมิทซอไนต์ และพบที่บ้านสองท่อ อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี

๒. แหล่งแร่แบบสการ์น (skarn deposit) ซึ่งเกิดจากกระบวนการแปรสภาพโดยการแทนที่ ระหว่างหินอัคนีแทรกซอนกับหินคาร์บอเนต เกิดเป็นหินสการ์น ซึ่งเป็นหินซิลิกาปนปูนในรูปแบบต่างๆ โดยแร่ตะกั่ว - สังะสี จะสะสมตัวตามแนวสการ์นเหล่านี้ มักเกิดร่วมกับแร่ซัลไฟด์และออกไซด์ของโลหะชนิดอื่น ๆ เช่น แหล่งแร่ตะกั่ว - สังกะสี ที่แหล่งภูขุมที่ ๑ บ้านโคกมน อำเภอเมือง จังหวัดเลย แหล่งภูขุมที่ ๒ บ้านหนองหญ้าไซ อำเภอเมือง จังหวัดเลย บ้านเมืองกึ๊ด อำเภอแม่แตง จังหวัดเชียงใหม่ ถ้ำเขาทะลุ อำเภอบันนังสตาร์ จังหวัดยะลา

๓. แหล่งแร่แบบสายแร่ (vein-type deposit) เกิดในสายแร่ที่น้ำแร่แยกตัวออกจากหินอัคนี เช่น ที่ภูช้าง บ้านโคกใหญ่ อำเภอท่าลี่ จังหวัดเลย แหล่งห้วยชวก และแหล่งภูจ้าน ตำบลบุฮม อำเภอเชียงคาน จังหวัดเลย บ้านแม่กะใน บ้านดงหลวง อำเภอแม่สะเรียง จังหวัดแม่ฮ่องสอน แหล่งแร่ทุติยภูมิเกิดจากการแปรสภาพของแหล่งแร่ปฐมภูมิกลายเป็นสารประกอบของออกไซด์ คาร์บอเนต และซิลิเกต ปรากฏอยู่ใกล้ผิวดิน เช่น แหล่งแร่ตะกั่ว เซรัสไซต์ ที่บ้านบ่องาม อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี แร่เซรัสไซต์หรือตะกั่วขาว (White lead) มีสูตรเคมี PbCO เป็นแร่ตะกั่วที่เกิดแบบทุติยภูมิที่พบได้ทั่วไป เกิดจาปฏิกิริยาของน้ำคาร์บอเนตกับแร่กาลีนาในบริเวณส่วนชั้นบน ๆ ของสายแร่ตะกั่ว เกิดร่วมกับแร่กาลีนาและสฟาเลอไรต์ และแร่ทุติยภูมิอีกหลายชนิด

องค์ประกอบของสำริด

ความหมายที่แท้จริง สำริด คือ โลระผสมที่มีทองแดงเป็นหลัก องค์ประกอบอื่น ๆ คือดีบุกและตะกั่ว อาจมีเหล็ก อาร์ซีนิค สังกะสี เจือปนอยู่ด้วยเล็กน้อย แต่ในปัจจุบันความหมายของสำริดเปลี่ยนไป สำริดปัจจุบันหมายถึงโลหะผสมที่มีทองแดงเป็นหลัก องค์ประกอบอื่น ๆ ได้แก่ ดีบุก สังกะสี เหล็ก ตะกั่ว ฟอสฟอรัส ซิลิคอน อาร์ซีนิค (สารหนู) บิสมัท อะลูมิเนียม ซึ่งนำไปใช้งานหลากหลายรูปแบบ ชนิดและปริมาณของโลหะอื่น ๆ ที่ผสมในโลหะผสมของทองแดงส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของโลหะผสมนั้น ๆ อย่างมากมายทองแดงบริสุทธิ์มีสีชมพูคล้ายเนื้อปลาแซลมอน ลักษณะเป็นมันวาว สามารถดึงยืดหรือตีแผ่เป็นแผ่นบางได้ดี ไม่ทนทานต่อการกัดกร่อน ส่วนดีบุกเป็นโลหะที่มีสีขาว คล้ายเงิน ไม่ค่อยแข็ง แต่มีความด้านทานต่อการกัดกร่อนสูง และมีคุณสมบัติด้านหล่อลื่น สามารถดึงยืดหรือรีดเป็นแผ่นบางได้ดี

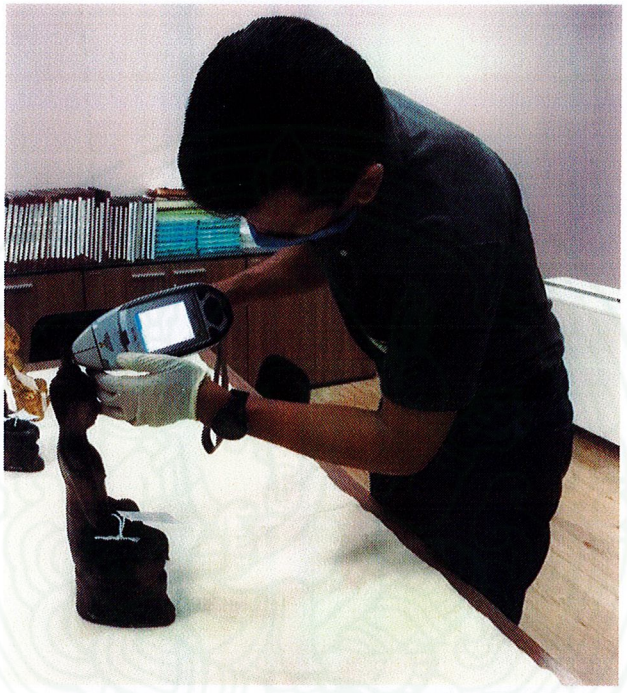
วัตถุประสงค์

๒.๑ เพื่อรวบรวมศึกษาหาเอกลักษณ์ องค์ประกอบของโลหะของพระพุทธรูปอู่ทอง ข้อมูลการใช้โลหะผสมที่มีการแบ่งแยกรูปแบบทางศิลปกรรมการสร้างที่ชัดเจน โดยเครื่องมือวิทยาศาสตร์

๒.๒ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการตรวจพิสูจน์ แบ่งแยก กำหนดอายุโบราณวัตถุ ศิลปวัตถุ ประเภทพระพุทธรูปอู่ทอง

วิธีการเก็บตัวอย่าง

๑. วิเคราะห์ข้อมูลองค์ประกอบโลหะด้วย เครื่องมือวิทยาศาสตร์ใช้เทคนิคการตรวจสอบด้วยวิธีการที่ไม่ทำลายตัวอย่าง (Non destructive technics) ด้วยเครื่อง X-ray fluorescence spectrometer แบบพกพา (pXRF) ยี่ห้อ Thermo Scientific รุ่น Niton XL3t วิเคราะห์ในโหมด General metal ระยะเวลาในการวัดแต่ละตำแหน่งประมาณ ๖๐ วินาที บนพื้นที่วงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ๓ มิลลิเมตรจำนวนจุดวิเคราะห์มากกว่า ๒๐ จุดต่อองค์



๒. วิเคราะห์ข้อมูล เศษชิ้นส่วน ดินใต้ฐาน สนิมโลหะ ที่หลุดร่วง ด้วยเครื่องมือ MicroXRF M4 Spectometer ยี่ห้อ Bruker

- Rectangular chamber design which accommodates large samples of up to 200 x 160 x 120 mm(WxDxH)
- Pump down <2min allowing detection to Na
- Three cameras assist with sample view and positioning
- Fast 100 mm/s stage with and 4 µm resolution, mouse-controlled and autofocus
- Capillary optics < 20 µm spot size at Mo Kα and high excitation intensity
- Dual SDD in 30 or 60 mm² with < 145 eV @ Mn Kα

และกล้องแบบส่องกราดกำลังขยายสูง Scanning Electron Microscope

ABSOTEC

VEGA 3

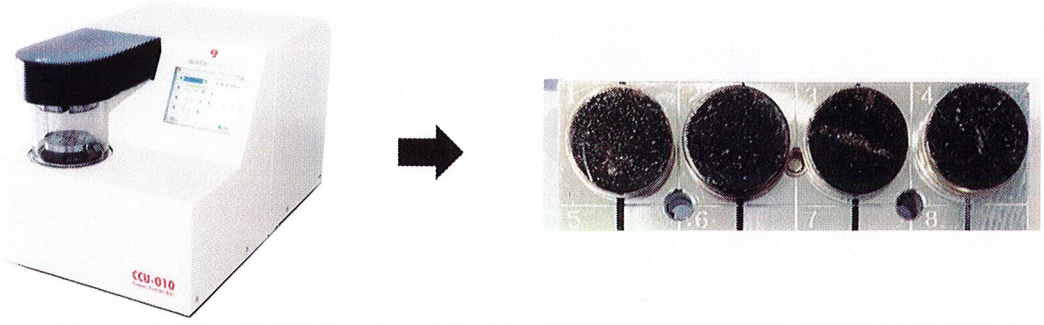
SEM Tungsten

- **Brand: TESCAN, Czech republic**
- **Model: VEGA3**
- **Tungsten heated cathode** (Resolution 3 nm at 30 kV)
- Fully automated electron column set-up
- Unique TESCAN Four-lens **Wide Field Optics™** design
- **In-Flight Beam Tracing™**
- **Variable Pressure Range: 3-500 Pa**

Sample preparation:

- **Sample stick on carbon.**
- **Carbon Coating**

The thickness of the Carbon 10 nm.



๓. วิเคราะห์ข้อมูล สร้างภาพข้อมูลสามมิติ ด้วยวิธีทางสถิติ ด้วยโปรแกมวิเคราะห์ origin 8

Welcome to the Origin Reference v8

Please use the Contents tab to select the topic of interest or the Index and Search tabs to search for topics by keyword.

Note that the X-Function Reference is integrated into this help file.

For a quick introduction to Origin 8, please review the Introductory Tutorials Chapter.

แหล่งข้อมูลที่ศึกษา

๑.พระพุทธรูปอู่ทอง พิพิธภัณฑสถานแห่งชาติพระนคร

๒.พระพุทธรูปอู่ทอง พิพิธภัณฑสถานแห่งชาติเจ้าสามพระยา

๓.พระพุทธรูปอู่ทอง พิพิธภัณฑสถานแห่งชาติสุพรรณบุรี

๔.พระพุทธรูปอู่ทอง พิพิธภัณฑสถานแห่งชาติชัยนาทมุนี

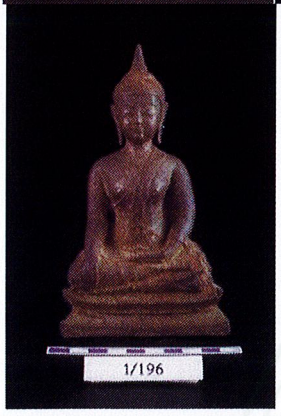
๕.พระพุทธรูปอู่ทอง คลังกลาง

ตัวอย่างพระพุทธรูปที่ศึกษาส่วนหนึ่ง

พระพุทธรูปอู่ทอง ๑

พระพุทธรูปอู่ทอง ๒

พระพุทธรูปอู่ทอง ๓



ผลการวิเคราะห์

องค์ประกอบของโลหะผสมที่พบในพระพุทธรูปศิลปะอู่ทอง พบธาตุต่างๆที่มีปริมาณมากน้อยต่างกันโดยที่โลหะหลัก คือ ทองแดง(Cu), ตะกั่ว(Pb) และดีบุก(Sn) ขณะที่โลหะหรือธาตุที่ปนเปื้อน เช่น พลวง (Sb),เซอร์โคเนียม (Zr),บิตมัส (Bi),นิเกิล (Ni),วาเนเดียม (V),สังกะสี (Zn),เหล็ก (Fe),โคบอลต์ (Co),อลูมิเนียม (Al),ซิลิคอน (Si),ไททาเนียม (Ti),ทองคำ (Au),เงิน (Ag),วุลแฟรม (W),แมงกานีส (Mn),ฟอสฟอรัส (P),ซัลเฟอร์ (S) โลหะที่ปนเปื้อนมาอาจมาจากที่ติดมากับแร่ต้นทางที่ใช้ และหรือปนเปื้อนมากับดินที่อยู่ในหลุมขุดค้นหรือบางตัวอาจเป็นโลหะที่ใส่ไปเพื่อปรับปรุงคุณภาพ (Additive) ในการศึกษานี้ยังไม่สามารถระบุได้ ต้องใช้เทคนิคที่ทำลายตัวอย่าง

พระพุทธรูปอู่ทอง ๑

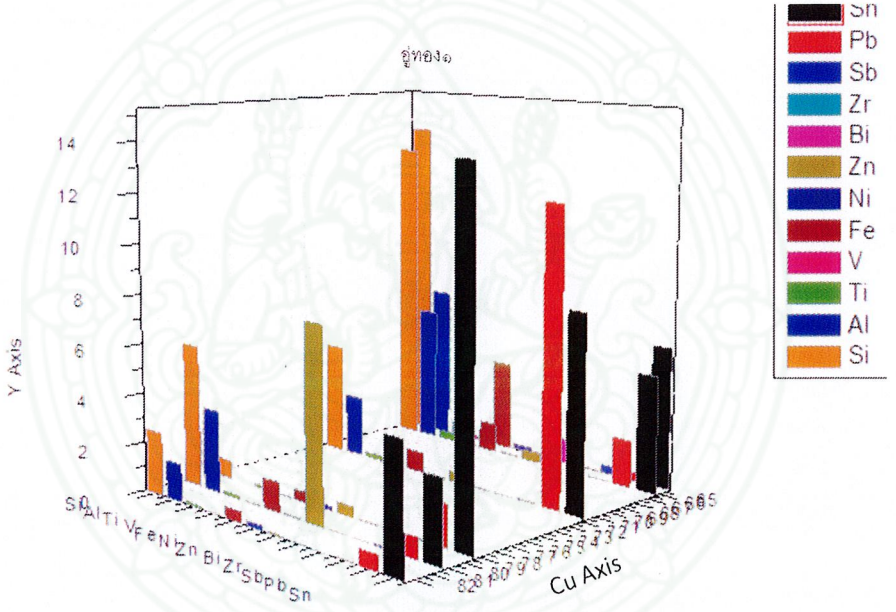
ข้อมูล XRF

	Sb	Sn	Zr	Bi	Pb	Zn	Cu	Ni	Co	Fe	V	Ti	Al	Si	Mn	P	Au	W	Ag	S
๔๘	0.07457	7.97271	0.01129	0.0414	11.9529	0.38743	70.6803	0.046	0.022	0.82771	0.04771	0.17457	2.49471	4.512						
๒๕๔	0.04643	5.01085	0.00746	0.03973	0.64171	0.08907	82.4913	0.22057		0.47354	0.03164	0.12238	1.5236	2.54608		2.671	6.51943			
๒๘๘	0.0522	14.1315	0.0042	0.03233	1.6882	0.4517	78.2621	0.1776	0.0303	0.4193	0.034	0.1008		0.72233	0.0246		0.0853			
๑/๑๖	0.33845	5.78573	0.05322	0.97333	0.38713	0.114	64.0978	0.248	0.25263	3.70745	0.14927	0.47627	6.3702	13.5883	2.3875	1.7131				0.88043
๑๖/๑๖	0.026	4.7871	0.0113	0.03525	1.9354	0.4041	65.1599	0.045		1.1942	0.0703	0.3046	5.59933	12.7167	0.03571	7.95622	3.27925			1.41386
๖/๘๖	0.0685	3.26264	0.00592	0.03586	0.83214	7.745	80.1889	0.06057		1.20871	0.02807	0.12193	3.31614	5.74021	0.02667	0.33814	0.1075			0.92715
๘๘๗																				

ค่าเฉลี่ยของแต่ละธาตุ

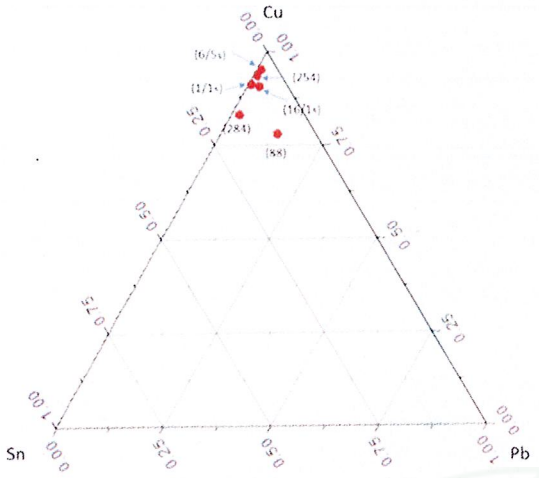
Variable	Observations	Obs. with missing	Obs. without	Minimum	Maximum	Mean	Std. deviation
Sb	6	0	6	0.026	0.338	0.101	0.118
Sn	6	0	6	3.263	14.132	6.825	3.897
Pb	6	0	6	0.387	11.953	2.906	4.473
Zn	6	0	6	0.089	7.745	1.532	3.048
Cu	6	0	6	64.098	82.491	73.480	7.927
Fe	6	0	6	0.419	3.707	1.305	1.224
Al	6	0	6	0.070	6.370	3.229	2.405
Si	6	0	6	0.722	13.588	6.638	5.335

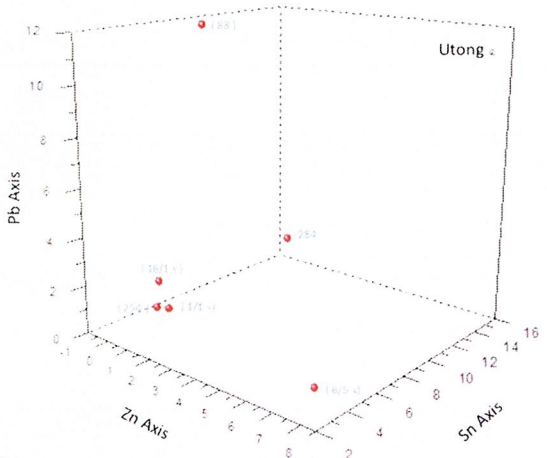
กราฟแท่งสามมิติแสดงปริมาณธาตุต่างๆ



ข้อมูลองค์ประกอบโลหะของพระพุทธรูปอู่ทอง ๑ จากตัวอย่าง ๖ ตัวอย่าง มีความหลากหลายไม่มีลักษณะที่เป็นแบบแผนเดียวกัน ประกอบด้วย กลุ่มที่มีสัดส่วนทองแดงในองค์ประกอบสูง และมีองค์ประกอบทองแดงต่ำ ทองแดงสูงสุดที่ ๘๒.๔๙% ต่ำสุดที่ ๖๔.๐๙% ดีบุก สูงสุด ๑๔.๑๓% ต่ำสุด ๓.๒๖% ตะกั่ว สูงสุด ๑๑.๙๕% ต่ำสุด ๐.๓๙ %

กราฟสามเหลี่ยมและกราฟสามิติแสดงสัดส่วนผสมของธาตุหลัก





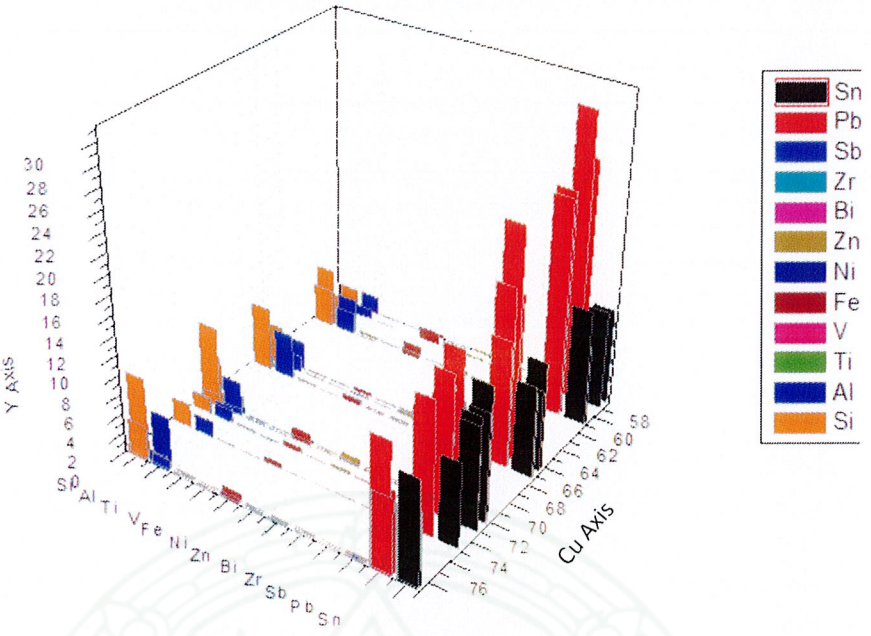
จากสัดส่วนขององค์ประกอบโลหะที่เป็นโลหะหลักพบว่า พระพุทธรูปอู่ทอง ๑ ใช้โลหะแบบสองชนิดผสมกัน (Binary metal compound) และแบบสามชนิดผสมกัน(Ternary metal compound) โดยแบบที่ใช้โลหะสองชนิดประกอบด้วยทองแดง และดีบุก ซึ่งเรียกว่าสำริด (Bronze) ขณะที่กลุ่มที่ใช้โลหะสามชนิดผสมมีสองแบบ คือแบบที่ประกอบด้วย ทองแดง ดีบุก และตะกั่ว เรียกว่า สำริดแบบมีตะกั่ว (Lead-Tin Bronze) และอีกแบบประกอบด้วย ทองแดง ดีบุก และสังกะสี ซึ่งเป็นสำริดอีกประเภทที่เรียกว่า Gunmetal หรือ Red Brass จากข้อมูลจำนวนหกตัวอย่างจึงมีความหลากหลายของการใช้โลหะผสม ถ้าพิจารณาจากพระพุทธรูปที่มาชัดเจนจากกรุวัดราชบูรณะสามองค์ คือ ๘๘,๒๘๔,๒๕๔ มีลักษณะที่ใช้โลหะแบบที่เรียกว่า Bronze และ Lead-Tin Bronzeไม่ปรากฏการใช้สังกะสีเข้ามาเกี่ยวข้อง

พระพุทธรูปอู่ทอง ๒

ข้อมูล XRF

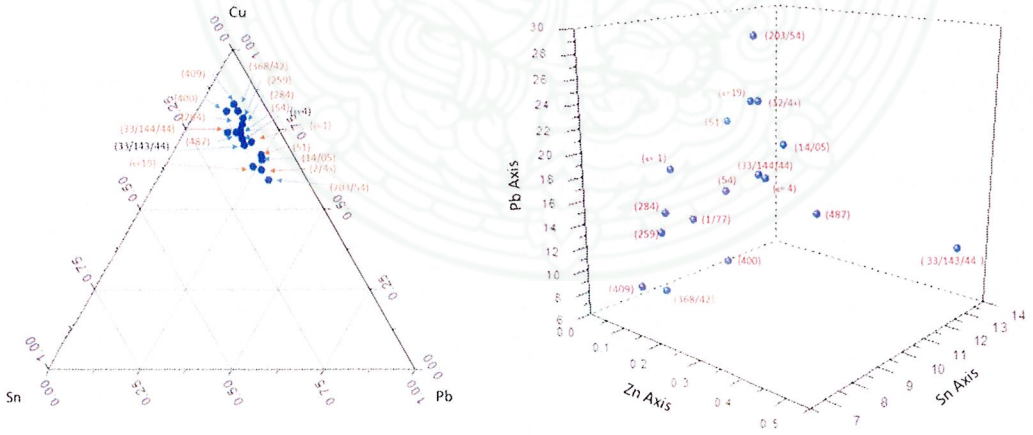
	Sb	Sn	Zr	Bi	Pb	Zn	Cu	Ni	Co	Fe	V	Ti	Al	Si	Mn	P	Au	W	Ag	S
487	0.20008	11.4768	0.00954	0.05427	13.442	0.26854	71.0411	0.04256		0.34738	0.05146	0.13977	1.59754	1.56727						
77	0.13575	9.2915	0.01225	0.08925	12.8728	0.07675	65.2998	0.031		0.5675	0.04325	0.1705	4.58825	6.535		0.58				
1405	0.1594	8.0746	0.0186	0.0655	22.5832	0.3936	58.7496	0.04933		1.0622	0.0798	0.2536	3.47425	5.86			1.3205			
24	0.15386	9.78929	0.01457	0.10014	23.9776	0.22329	56.1813	0.0372		0.36257	0.069	0.09583	1.86217	1.7896		6.0996	2.2555	1.03367		
51	0.176	8.24243	0.01386	0.07667	23.3081	0.248	64.4703	0.032		0.19386	0.04586	0.105	1.65717	1.652		1.308				
54	0.25622	10.5329	0.01167	0.05888	14.5636	0.07933	71.0833	0.07111	0.017	0.54067	0.04544	0.113	1.30522	1.48338						
259	0.11043	7.72814	0.01114	0.0416	13.2911	0.10914	76.8166	0.0795	0.01667	0.226	0.039	0.077	1.48933	1.03225			0.073			
284	0.1436	8.6734	0.0138	0.06371	13.6151	0.04433	72.8695	0.05113	0.01667	0.5083	0.0439	0.1114	1.65989	2.353						
400	0.198	10.6927	0.00767	0.06567	7.653	0.072	76.644	0.06833	0.0165	0.362	0.028	0.08367	0.966	3.383						
409	0.15125	7.53606	0.01838	0.05254	8.19675	0.06567	76.4675	0.04129	0.012	0.76244	0.04919	0.14831	5.1935	8.13922						
36842	0.09175	7.07713	0.01775	0.0525	9.62538	0.17167	70.2289			1.26438	0.04488	0.137	3.52033	8.29863	0.26067		0.0367			
33143	0.0525	13.4868	0.01	0.03	10.977	0.50575	69.9943	0.122	0.11425	0.33675	0.0525	0.1505	1.832	5.035		3.205	0.087			
33144	0.1826	10.7744	0.0068	0.0486	16.5828	0.1588	64.14	0.0424		0.3614	0.1088	0.1952	2.9178	3.6128		0.8496				
1	0.21208	8.51931	0.01362	0.091	17.9115	0.07546	65.1121	0.02446		0.41123		0.01	0.37869	1.44246	0.1	1.01654	4.53992		0.08362	
4	0.1821	11.0414	0.0052	0.0419	16.0649	0.1596	70.1899	0.0449		0.3713		0.02	0.6467	1.1173						
19	0.12592	11.8386	0.01067	0.09183	22.0876	0.0665	59.0137			0.53967		0.05	2.27625	3.87992						
20354	0.085	10.1402	0.0104	0.0138	29.0308	0.189	56.921	0.0634	0.0094	1.2616		0.018	1.0362	1.1086	0.0052					

กราฟแท่งสามมิติแสดงปริมาณธาตุต่างๆ



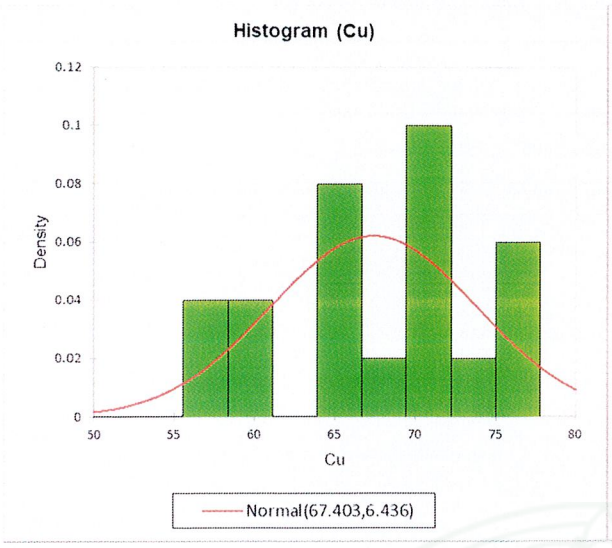
จากกราฟปริมาณโลหะต่างๆที่อยู่ในเนื้อโลหะผสมของพระพุทธรูปศิลปะอู่ทอง ๒ ตัวอย่าง ที่ตรวจด้วยเทคนิควิเคราะห์ไม่ทำลายตัวอย่าง (XRF) พบว่าแบ่งกลุ่มตามปริมาณทองแดงอย่างคร่าวๆได้ ๔ กลุ่ม ตามปริมาณโลหะหลักคือทองแดง กลุ่มที่มีทองแดงต่ำกว่า 61% ,65-67%,71-75% และมากกว่า 76% ตามลำดับ

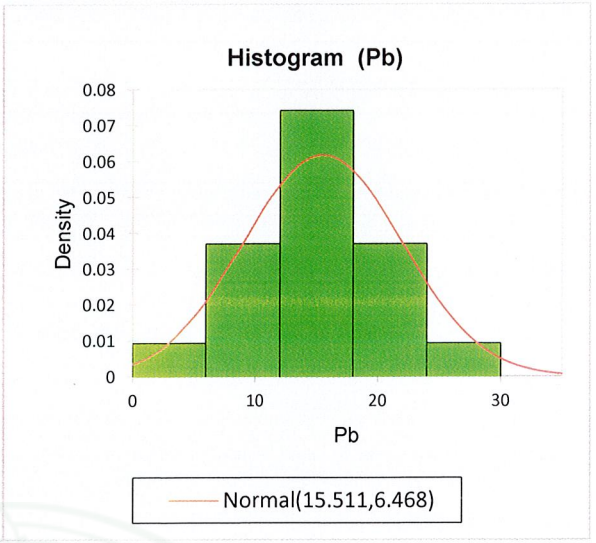
กราฟสามเหลี่ยมและกราฟสามมิติแสดงสัดส่วนผสมของธาตุหลัก

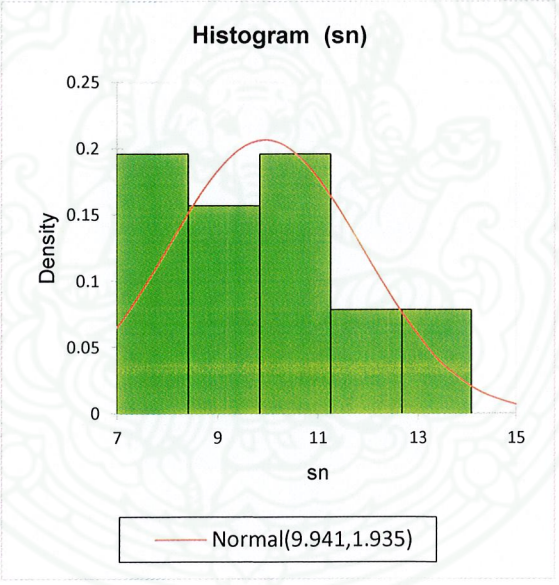


ข้อมูลองค์ประกอบการใช้โลหะผสมที่เป็นโลหะหลัก เป็นแบบใช้โลหะสามชนิด (Ternary metalcompound)เพียงแบบเดียวประกอบด้วย ทองแดง ดีบุก และตะกั่ว ซึ่งเป็นสำริด ประเภท Lead-Tin Bronze ทุกตัวอย่าง อัตราส่วนการใชช้โลหะทั้งสามชนิดนี้ ไม่คงที่ทุกตัวอย่าง แต่มีรูปแบบการใช้ที่มีการปรับเปลี่ยนสัดส่วนในรูปแบบ หรือกรอบการใช้เดียวกันโดยทองแดงใช้มีสัดส่วนผกผันกับปริมาณตะกั่ว และปริมาณดีบุกไม่ขึ้นกับทองแดงและดีบุก มีปริมาณค่อนข้างคงที่ ที่ ๘ – ๑๑%

กราฟ Histogram ของธาตุหลัก

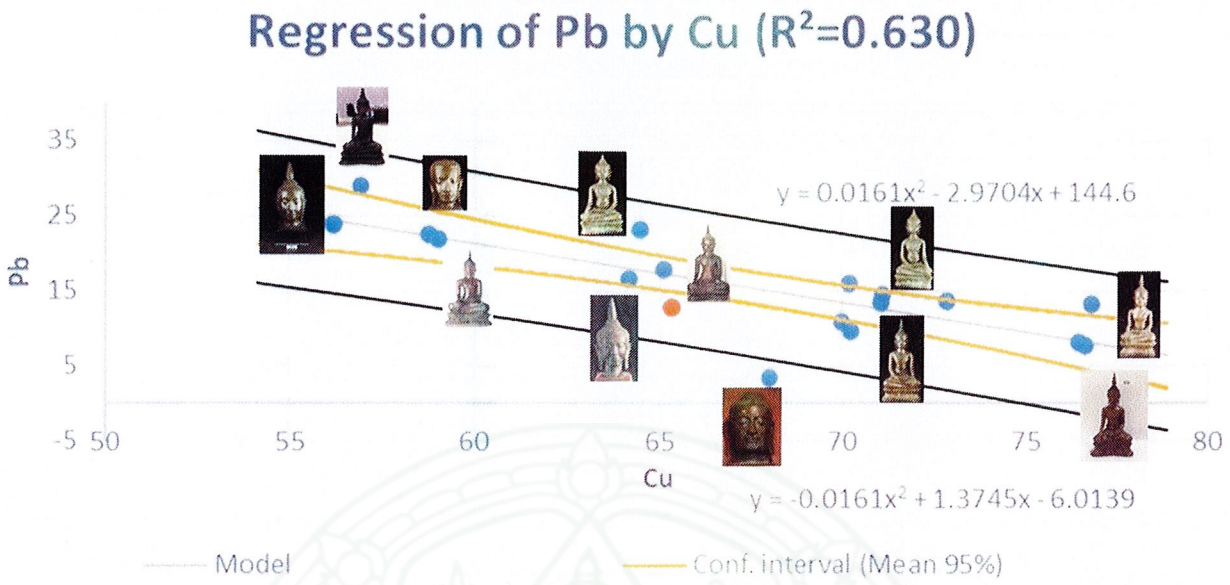






จากกราฟแท่ง Histogram แสดงปริมาณความหนาแน่นของการใช้โลหะหลักทั้งสามชนิด ทองแดง ตะกั่ว ดีบุก สำหรับเป็นโลหะผสม จากจำนวนตัวอย่างพระพุทธรูปศิลปะอู่ทอง ๒ พบว่าการใช้ทองแดง ที่ปริมาณน้อยที่สุดที่พบคือ ๕๖.๑๘% สูงที่สุดคือ ๗๖.๘๑๗% ค่าเฉลี่ยการใช้คือ ๖๗.๔๐๓% ช่วงที่มีการใช้หนาแน่นที่สุด คือ ๖๙ -๗๓ % รองลงมาคือ ๖๔ - ๖๖% ขณะที่ ๖๑ - ๖๔ % ไม่มีการใช้เลย ตะกั่วที่นำมาผสม ปริมาณน้อยที่สุดที่พบคือ ๓.๔๒% สูงที่สุดคือ ๒๙.๐๓๑% ค่าเฉลี่ยการใช้คือ ๑๕.๕๑๑% ช่วงที่มีการใช้หนาแน่นที่สุด คือ ๑๒ - ๑๘ % รองลงมาคือ ๖ - ๑๒% และ ๑๘ - ๒๔% ขณะที่ ๖๑ - ๖๔ % ที่ใช้น้อยที่สุด ช่วง ๓ - ๖% และ ๒๔ - ๒๙% ขณะที่ดีบุกมีช่วงปริมาณการใช้แคบที่สุด คือ ๗.๐๗๗ - ๑๔.๐๒๓% มีค่ากระจายการใช้เพียง ๑.๙๙๑% ช่วงที่มีการใช้อย่างหนาแน่น คือ ๗ - ๑๑.๓ % ช่วงที่มีการใช้น้อย คือ ๑๑.๓ - ๑๔ % ค่าเฉลี่ยการใช้ คือ ๙.๙๔๑%

กราฟแสดงความสัมพันธ์การใช้โลหะทองแดงและตะกั่ว



จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการใช้ตะกั่วกับทองแดง ในโลหะผสมสำหรับสร้างองค์พุทธรูปศิลปะอู่ทอง ๒ พบว่าเป็นการเพิ่ม ลดสัดส่วนในทิศทางที่ผกผันกัน หรือตรงกันข้าม เช่นเมื่อเพิ่มปริมาณของทองแดงขึ้น ก็ลดปริมาณตะกั่วในส่วนผสมลง จากสมการถดถอยแสดงถึงความสัมพันธ์กันที่สูง ซึ่งอาจแปรความว่าการผสมโลหะในศิลปะอู่ทอง ๒ มีการปรับสัดส่วนระหว่างทองแดงและตะกั่วเพื่อปรับปรุงคุณภาพให้มีความเหมาะสมมากขึ้นซึ่งแสดงถึงมีการศึกษาตลอดเวลา โดยคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนผสมที่ส่งผลคือ ความสามารถในการไหลลื่นของน้ำโลหะขณะเทเข้าแบบ, ความสวยงามของผิวโลหะจากการที่เนื้อโลหะไหลเข้าไปได้ทุกรายละเอียดของแบบ , สีขององค์พระเมื่อแข็งตัวและขัดผิวแล้ว ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้เกิดจากการปรับลดเพิ่มปริมาณตะกั่ว โดยแสดงเส้นสมการโมเดลความสัมพันธ์ของตะกั่วกับทองแดงคือ

Pb = 69.2935964080436-0.797923648517232*Cu ขอบเขตความสัมพันธ์ของทองแดงกับตะกั่วที่ผสมกันจากตัวอย่างพระพุทธรูปศิลปะอู่ทอง ๒ สามารถสร้างสมการคือ เส้นขอบเขตบน $Pb = 0.0161Cu^2 - 2.9704Cu + 144.6$ ขณะทีความสัมพันธ์ที่เส้นขอบเขตล่าง คือ $Pb = -0.0161Cu^2 + 1.3745Cu - 6.0139$

วิธีวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (principal component analysis)

โดยกำหนดให้ลักษณะต่างๆ ขององค์กอบของโลหะผสม 3 ชนิด ได้แก่ ทองแดง ดีบุก ตะกั่ว เป็นตัวแปร เพื่อสกัดสร้างชุดตัวแปรในองค์ประกอบหลักให้เป็นฟังก์ชันเชิงเส้นของตัวแปรเดิม และกำหนดจำนวนองค์ประกอบหลักจากองค์ประกอบที่มีค่า eigenvalue มากกว่า 1 และผลรวมร้อยละของค่าแปรปรวนเกินร้อยละ 80 จากนั้นคัดเลือกตัวแปรที่มีค่าถ่วงน้ำหนักในแต่ละองค์ประกอบเกิน 0.20 ขึ้นไปเป็นองค์ประกอบสำคัญ ส่วนตัวแปรที่มีค่าถ่วงน้ำหนักน้อยกว่า 0.20 ไม่นำมาพิจารณา นำผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแต่ละด้านกำหนดชื่อองค์ประกอบเพื่อใช้แบ่งแยกแต่ละตัวอย่างด้วยกราฟ 2 มิติ โดยใช้องค์ประกอบหลัก 3 ตัวที่มีค่า eigenvalues สูงสุด เป็นแกน X ,Y ตามลำดับ

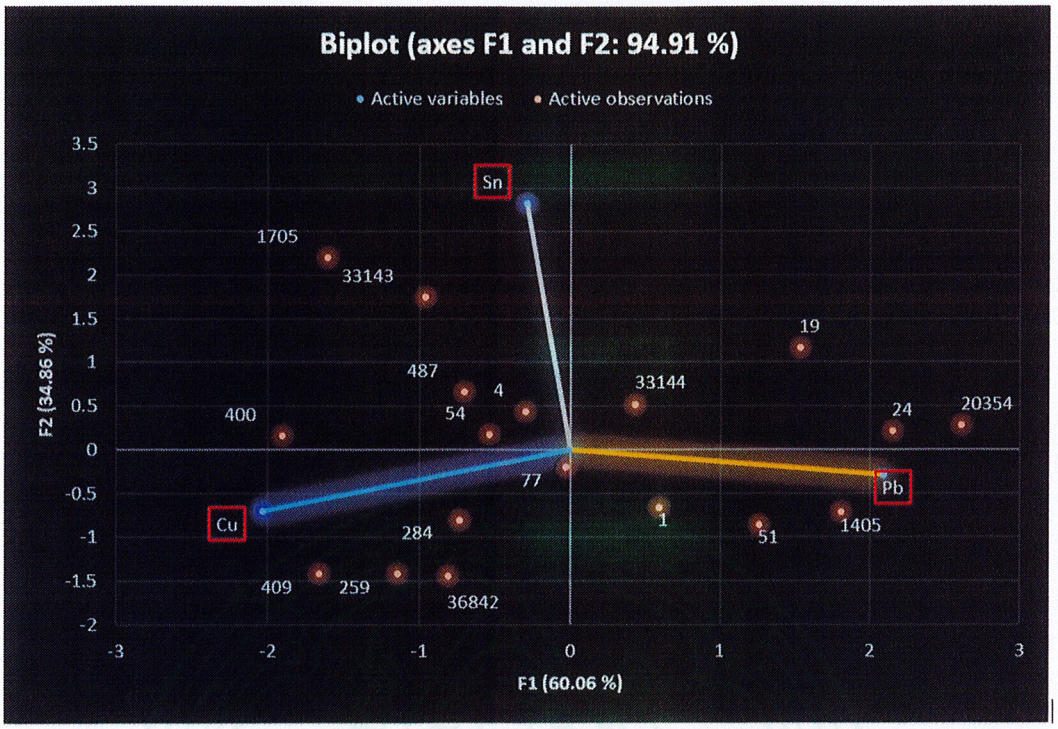
Variable	Observations	Obs. with missing data	Obs. without missing data	Minimum	Maximum	Mean	Std. deviation
Sn	18	0	18	7.077	14.023	9.941	1.991
Pb	18	0	18	3.420	29.031	15.511	6.656
Cu	18	0	18	56.181	76.817	67.403	6.623

ภาพรวมจากการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย ธาตุโลหะหลักบนพื้นผิวของตัวอย่างพระพุทธรูปอู่ทอง ๒ จำนวน ๑๘ ตัวอย่าง ประกอบด้วย ทองแดง(Cu) ตะกั่ว(Pb) และดีบุก(Sn) พบค่าเฉลี่ยสูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ยดังตารางด้านบน ขณะที่ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของดีบุก ตะกั่ว ทองแดงตามลำดับ มีค่า ๑.๙๙๑ ,๖.๖๕๖ และ๖.๖๒๓ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ในภาพรวมของโลหะทั้งสามชนิดคือ ทองแดงและตะกั่วมีความเบี่ยงเบนมาตรฐานใกล้เคียงกันแปรความว่าพื้นผิวของพระพุทธรูปกลุ่มนี้มีการผสมที่ปรับเพิ่ม ลดปริมาณทองแดงและตะกั่วที่สัมพันธ์กัน โดยดีบุกมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ต่ำกว่าโลหะสองชนิดข้างต้น ซึ่งแสดงว่ามีความสัมพันธ์ที่ไม่สอดคล้องกันกับ ทองแดงและตะกั่ว

การจัดกลุ่มโดยการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก

เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก พบว่า มี 2 องค์ประกอบหลักที่ค่า eigenvalues มากกว่า 1 คือ (F1), (F2) และครอบคลุมความแปรปรวนของตัวแปรทั้งหมดสูง 94.91 % โดยองค์ประกอบหลักที่ 1 (F1) มีค่า eigenvalues 1.802 สามารถอธิบายความแปรปรวนได้ 60.057% องค์ประกอบหลักนี้ประกอบด้วยลักษณะที่เกี่ยวข้องกับปริมาณสัดส่วนของทองแดง (Cu) ในเนื้อโลหะผสม และปริมาณของตะกั่ว (Pb) องค์ประกอบหลักที่ 2 (F2) และองค์ประกอบหลักที่ 3 (F3) มีค่า eigenvalues1.046, 0.153 ตามลำดับ และสามารถอธิบายความแปรปรวนได้ 34.855, 5.088% ตามลำดับ องค์ประกอบหลักที่ 2 เกี่ยวข้องกับปริมาณดีบุก (Sn)

Cu/Pb/Sn

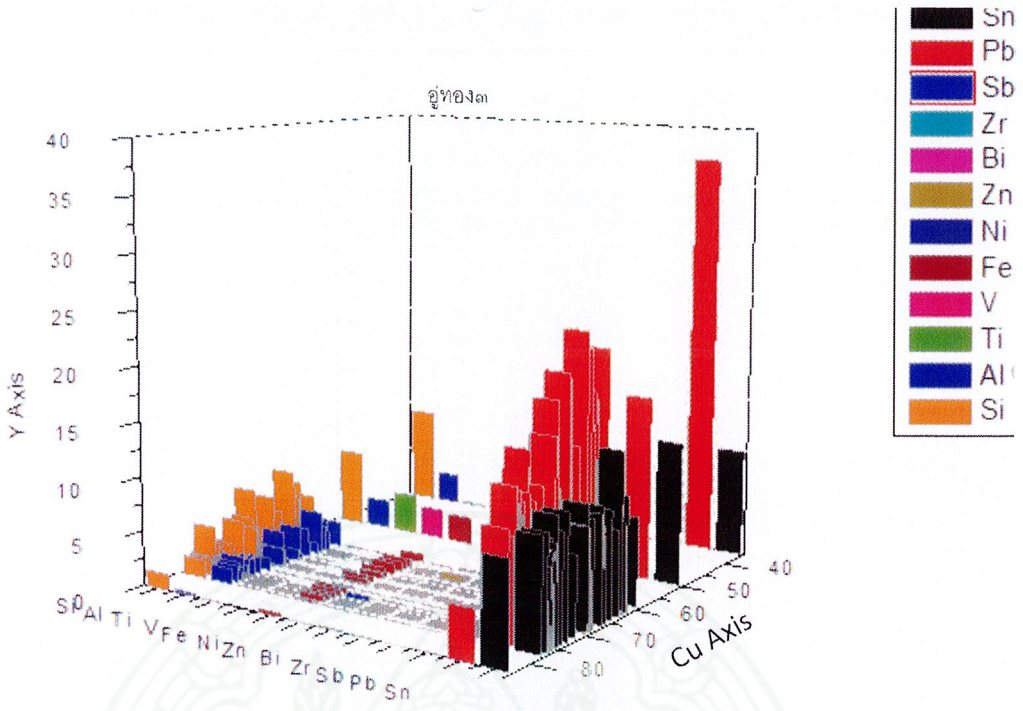


พระพุทธรูปอู่ทอง ๓

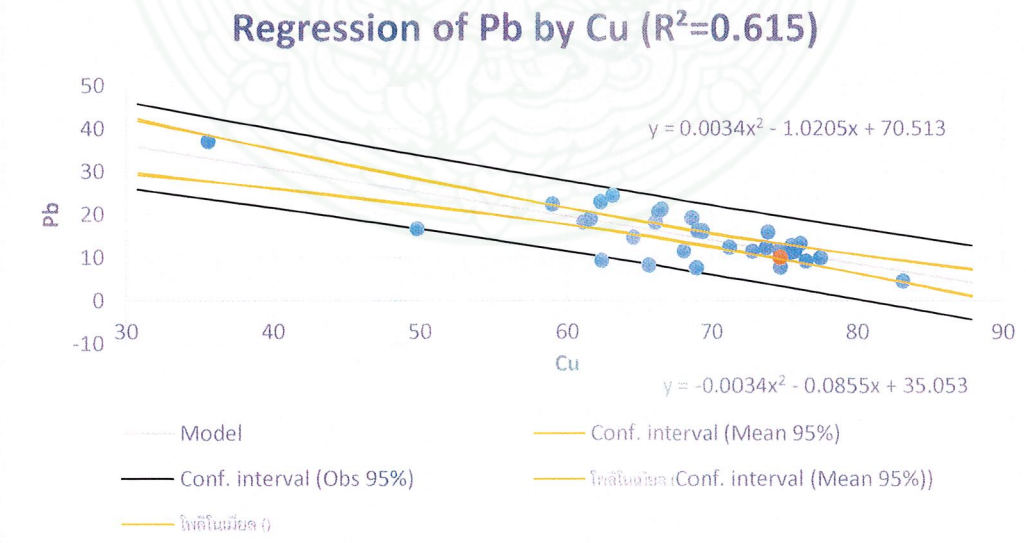
ข้อมูล XRF

	Sb	Sn	Zr	Bi	Pb	Zn	Cu	Ni	Co	Fe	V	Ti	Al	Si	Mn	P	Au	W	Ag	S
487	0.079	8.28138	0.008	0.0364	11.5843	0.031	75.6888	0.02833	0.01367	0.1625	0.05313	0.08663	2.11814	2.12125		0.119				
61	0.1584	11.2036	0.0082	0.047	10.0688	0.0972	74.6876	0.0546		0.351	0.0534	0.1116	1.1946	1.955						
278	0.15925	10.092	0.00975		9.189	0.12	76.4765	0.07025	0.0235	0.50125	0.058	0.172	1.478	1.61175						
327	0.157	7.78533	0.01133	0.036	11.835	0.035	75.698	0.041		0.491	0.05883	0.10383	1.2965	4.3875						
551	0.16122	8.38433	0.01083	0.048	15.9798	0.084	73.855	0.51767		0.81956	0.131	0.0455	0.789	0.753						
26971	0.13717	11.1945	0.01033	0.056	7.88117	0.1486	74.6912	0.0245		0.77683	0.0672	0.2695	1.75267	2.931	0.10117					
16138	0.14583	8.9295	0.0125	0.062	19.2827	0.10367	68.609	0.0318		0.29933	0.04683	0.102	1.438	3.2725						
2697	0.2186	9.6892	0.0116	0.0615	12.3438	0.052	73.73	0.0275		0.4962	0.0464	0.111	1.5386	1.6046						
2799	0.17467	7.18322	0.009	0.0532	13.3173	0.08578	76.0836	0.03611		0.30289	0.03944	0.08656	1.727	1.69167						
548	0.27645	10.0372	0.00818	0.06157	10.0263	0.044	77.449	0.05709		0.18291	0.037	0.09027	1.4045	1.65543						
206	0.17392	9.47108	0.00883	0.041	11.3565	0.092	75.5472	0.03271	0.014	0.3445	0.05245	0.12	1.567	1.6855						
197	0.1435	7.19325	0.01063	0.0575	12.5018	0.07033	71.222	0.033		0.18525	0.03863	0.062	1.154	4.08088		6.101	5.7727			
183	0.11933	8.71925	0.02319	0.051	18.2122	0.106	65.9984	0.03189		0.91144	0.06013	0.1394	3.094	5.42292		0.7003				
4099	0.18233	8.0141	0.0238	0.08467	22.4493	0.133	58.953	0.038		0.7522	0.0525	0.1474	2.2542	4.28588		6.0966	0.309		0.263	
4199	0.21444	8.1046	0.0337	0.0674	19.083	0.22086	61.5574	0.0305		0.7816	0.0562	0.1829	2.36167	4.77444		1.61057	3.37483			
1614	0.3728	9.9394	0.059	0.07467	37.077	0.1844	35.5296			1.47	0.1962	0.2192	2.8882	9.0354			4.4023			
1356	0.3065	13.0187	0.25783	8.276	16.7425	0.1815	49.7944			2.53767	2.80217	3.68633	2.6908	7.0476		0.9985	3.6025			
2523	0.19367	14.4563	0.008	0.05017	9.37317	0.4535	62.348	0.09583		1.06317	0.09517	0.2185	3.80983	7.228		0.471	0.39333			
25205	0.16264	11.1652	0.00327	0.04845	11.5054	0.13582	72.7707	0.03691		0.37218		0.04073	1.45827	2.19155						
25194	0.06625	8.97863	0.00938	0.02338	16.0656	0.06813	69.3295	0.00338	0.00588	0.44325		0.11	1.775	3.06738						
30140	0.177	7.9098	0.0052	0.02	11.7584	0.0668	74.646	0.016		0.4312	0.0506	0.067	0.949	2.1974						
33137	0.09671	9.3035	0.05221	0.03214	16.2644	0.20064	69.3241	0.01		0.89986	0.03436	0.13879	0.70957	4.082			0.01		0.04	
3394	0.087	10.572	0.0095	0.063	22.942	0.094	62.2495			0.419	0.067	0.0775	1.139	2.2795						
131	0.12042	9.06017	0.00825	0.02717	16.3374	0.11983	69.0293	0.01658		0.42383	0.05683	0.10058	1.59575	3.05308	0.01	0.01				
18	0.13044	9.27594	0.00422	0.08228	4.60967	0.1845	83.1109	0.047	0.00694	0.35506		0.07639	0.31	1.45407			0.04733		0.02	
25206	0.17113	9.64875	0.0065	0.041	11.6694	0.13063	68.0775	0.01175		0.44025		0.04	0.5125	1.09213			7.632			
25251	0.06755	11.0324	0.00446	0.05109	7.69227	0.10355	68.9404	0.10791		0.51527			3.19964	6.57791		1.47082	0.189			
25204	0.13958	7.68575	0.00925	0.0205	24.4688	0.061	63.0723	0.01213		0.85163		0.03775	1.01613	2.2005		0.39963				
9952	0.151	7.625	0.00175	0.0465	8.31525	0.07875	65.5705	0.015	0.005	0.26175		0.0175	0.476	0.977			11.7955			
9962	0.1806	8.9312	0.006	0.0274	10.806	0.0176	75.0832	0.0388		0.5658		0.0672	1.8338	2.9226						
9932	0.1658	8.4258	0.0048	0.0124	12.8898	0.0364	75.4666	0.0218	0.0046	0.438		0.0706	0.7044	1.6552						
9911	0.12425	10.3519	0.0075	0.06288	20.7314	0.09563	66.226	0.00288	0.00263	0.51763		0.0735	0.5995	1.18638						
25195	0.1822	9.7198	0.0104	0.0494	21.2976	0.0722	66.4376	0.0146		0.4272		0.0174	1.0618	0.681						
25152	0.1818	9.6806	0.0116	0.0746	14.7454	0.157	64.5084	0.0128		1.02		0.0182	2.6286	3.7902	0.0072	0.7316	2.42			
28	0.14686	10.3767	0.01286	0.06286	18.2066	0.15914	61.1062	0.02743		0.57729		0.02179	2.63879	5.98514			0.63921			

กราฟแท่งสามมิติแสดงปริมาณธาตุต่างๆ

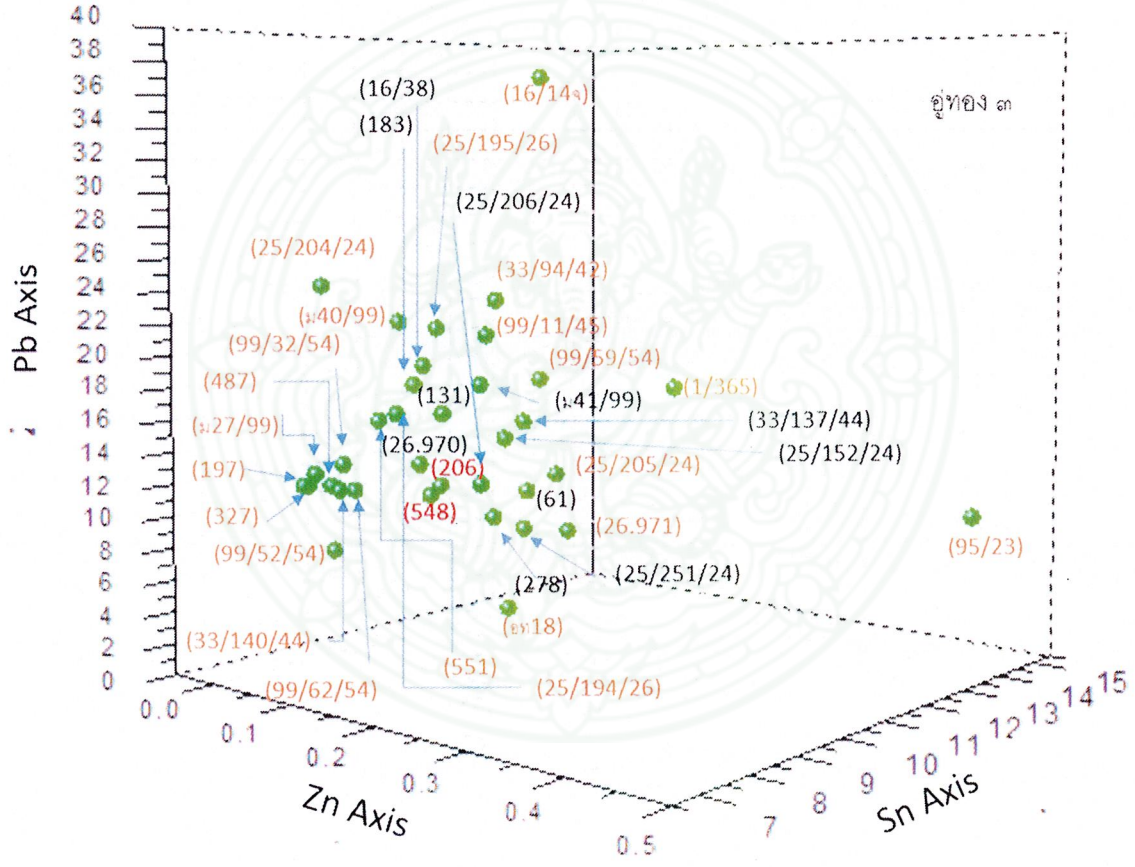


กราฟแสดงความสัมพันธ์การใช้โลหะทองแดงและตะกั่ว

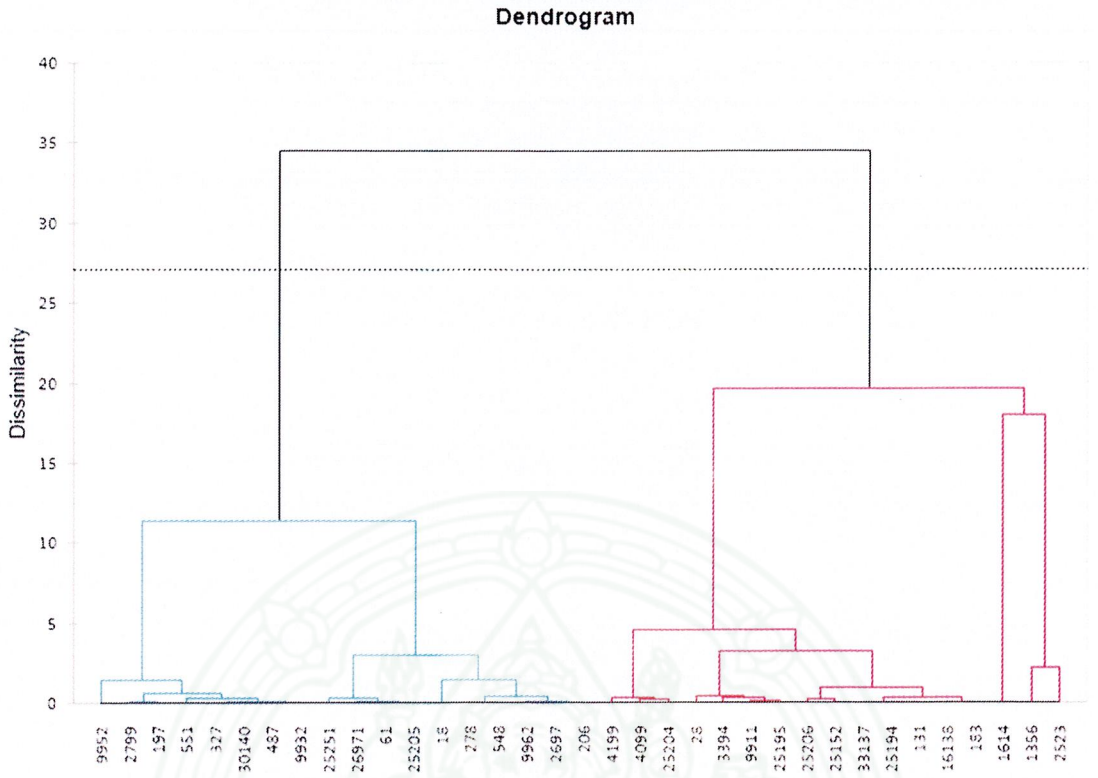


จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการใช้ตะกั่วกับทองแดง ในโลหะผสมสำหรับสร้างองค์พุทธรูปศิลปะอู่ทอง ๓ พบว่าเป็นการเพิ่ม ลดสัดส่วนในทิศทางที่ผกผันกัน หรือตรงกันข้าม เช่นเมื่อเพิ่มปริมาณของทองแดงขึ้น ก็ลดปริมาณตะกั่วในส่วนผสมลง จากสมการถดถอยแสดงถึงความสัมพันธ์กันที่มีความถูกต้องสูง โดยแสดงเส้นสมการโมเดลความสัมพันธ์ของตะกั่วกับทองแดงคือ Pb = 52.7828148510421-0.553001713143731*Cu ขอบเขตความสัมพันธ์ของทองแดงกับตะกั่วที่ผสมกัน จากตัวอย่างพระพุทธรูปศิลปะอู่ทอง ๓ สามารถสร้างสมการคือ เส้นขอบเขตบน Pb =0.0034Cu^2-1.0205Cu+70.513 ขณะทีความสัมพันธ์ที่เส้นขอบเขตล่าง คือ Pb = -0.0034Cu^2-0.0855Cu+35.053โดยที่ทองแดงที่ใช้และนิยม คือ 60 – 78 % ปริมาณตะกั่วที่ 7.5 – 24.5% สัดส่วนที่มีการใช้กันมากคือ บริเวณ ที่ทองแดง 74.5%กับตะกั่ว 11%

กราฟสามิติแสดงสัดส่วนผสมของธาตุหลัก



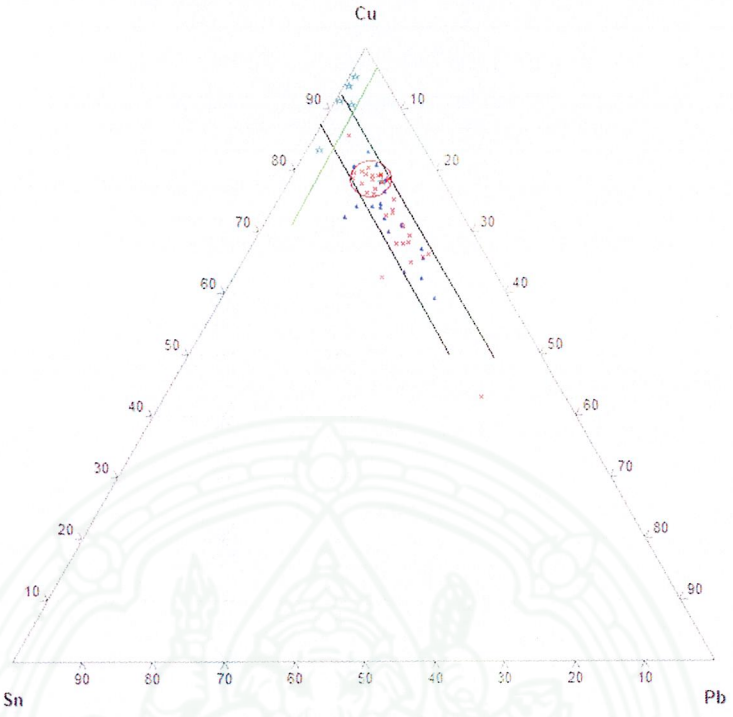
กราฟเปรียบเทียบความเหมือนของพระพุทธรูปแต่ละองค์



จากแผนภูมิ (Dendrogram) เปรียบเทียบความแตกต่างที่ระดับความเชื่อมั่นทางสถิติ ๙๕.๔๙% ของตัวอย่างพระพุทธรูปอู่ทอง ๓ โดยศึกษาความสัมพันธ์ของโลหะ ๓ ชนิดในองค์ประกอบคือ ทองแดง (Cu),ดีบุก (Sn),ตะกั่ว (Pb),สังกะสี พบว่าสามารถแบ่งเป็นกลุ่มใหญ่ที่มีระดับความแตกต่างกัน (Dissimilarity) ได้เป็นสองกลุ่มใหญ่ คือกลุ่มแผนผังสีน้ำเงิน มีระดับความแตกต่างกันสูงสุดภายในกลุ่มประมาณ ๑๒ และอีกลุ่มคือ กลุ่มแผนผังสีแดง มีระดับความแตกต่างสูงสุดภายในกลุ่มประมาณ ๒๐ พระพุทธรูปกลุ่มสีแดงและสีน้ำเงินมีระดับความแตกต่างกัน ๓๕ จากแผนภูมิแสดงถึงสัดส่วนของโลหะหลักที่ประกอบด้วย ทองแดง ดีบุก และ ตะกั่ว มีสัดส่วนที่คล้ายคลึงกันสามารถแบ่งได้สองกลุ่มข้างต้น กลุ่มแผนภูมิสีน้ำเงินมีความแตกต่างกันน้อยหรือมีความคล้ายคลึงกันสูง ภายกลุ่มยังสามารถเป็นกลุ่มย่อยได้ประมาณ ๓ กลุ่มย่อย กลุ่มแรกประกอบด้วยพระพุทธรูปทะเบียน ๙๙/๕๒, ม ๒๗/๙๙, ๑๙๗, ๕๕๑, ๓๒๗, ๓๐/๑๔๐, ๔๘๗ และ ๙๙/๓๒ กลุ่มที่สองประกอบด้วยพระพุทธรูปทะเบียน ๒๕/๒๕๑, ๒๖/๙๗๑, ๖๑ และ ๒๕/๒๐๕ กลุ่มที่สามประกอบด้วยพระพุทธรูปทะเบียน ๑๘, ๒๗๘, ๕๔๘, ๙๙/๖๒, ๒๖/๙๗ และ ๒๐๖ ขณะที่กลุ่มแผนภูมิสีแดงแบ่งได้สี่กลุ่มหลัก กลุ่มแรกประกอบด้วยพระพุทธรูปทะเบียน ๔๑/๙๙, ๔๐๙๙, และ ๒๕/๒๐๔ กลุ่มที่สองประกอบด้วยพระพุทธรูปทะเบียน ๒๘, ๓๓/๙๔, ๙๙/๑๑ และ ๒๕๑/๙๕ กลุ่มที่สามประกอบด้วยพระพุทธรูปทะเบียน ๒๕/๒๐๖, ๒๕/๑๕๒, ๓๓/๑๓๗, ๒๕/๑๙๔, ๑๓๑, ๑๖๑๓๘ และ ๑๘๓ ขณะที่กลุ่มสุดท้าย มีความแตกต่างกันกับกลุ่มต่างๆพระพุทธรูปสามองค์นี้อาจไม่ได้สร้างร่วมสมัยนี้ประกอบด้วย ๑๖/๑๔จ, ๑๓๕๖ และ ๒๕/๒๓

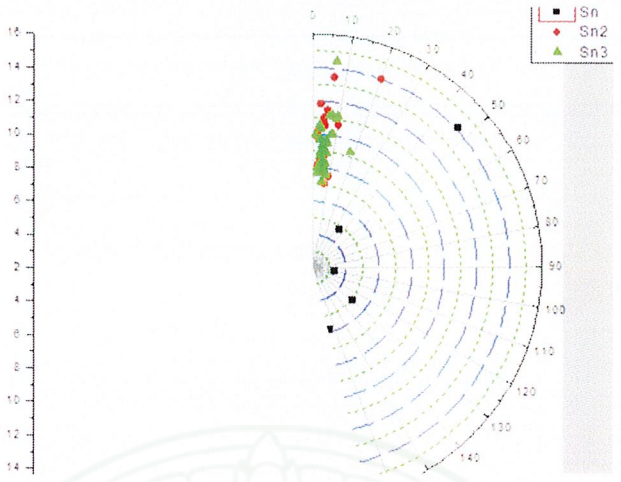
พระพุทธรูปอู่ทองทุกแบบ

กราฟสามเหลี่ยมแสดงสัดส่วนผสมของธาตุหลัก

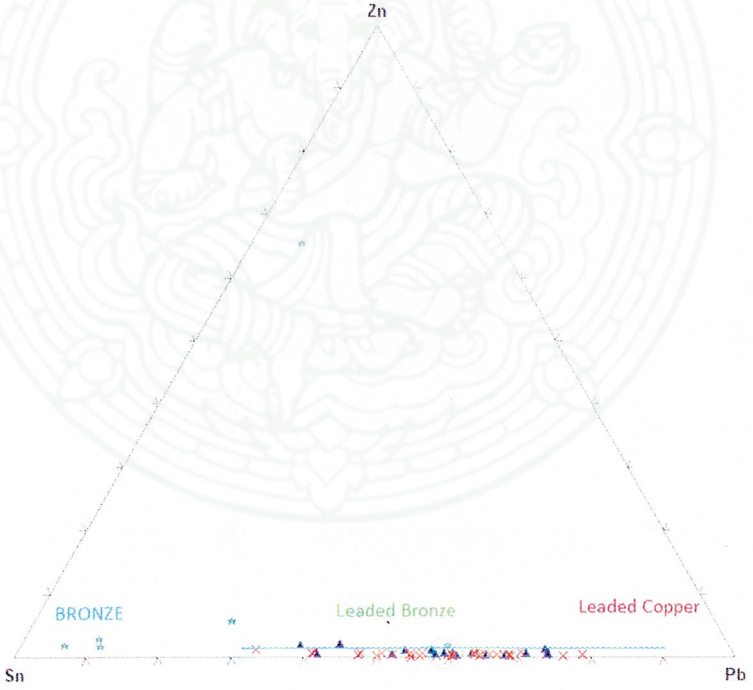


สัดส่วนผสมของพระพุทธรูปศิลปะอู่ทอง ใช้โลหะหลักสามชนิด(Ternary metal) คือ ทองแดง ดีบุก และตะกั่ว สัดส่วนการผสมของพระพุทธรูปอู่ทอง ๒ และ ๓ มีรูปแบบที่คล้ายคลึงกัน โดยที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณระหว่างทองแดงและตะกั่ว แบบผกผันโดยปรับเพิ่มลดสวนทางกัน ขณะที่ใช้ปริมาณดีบุกค่อนข้างคงที่ ปริมาณดีบุกที่ใช้ไม่เป็นไปตามสัดส่วนของทองแดงและตะกั่วที่เปลี่ยนไป ปริมาณดีบุกที่ใช้ ตั้งแต่ 7 -12% พระพุทธรูปอู่ทอง ๓ มีบริเวณที่ใช้กันมาก คือบริเวณที่วงกลมบนกราฟ ซึ่งอาจเป็นสัดส่วนที่ช่างนิยม หรือเป็นสัดส่วนที่พระพุทธรูปหล่อแล้วมีคุณสมบัติที่เหมาะสม

กราฟองศาแสดงการแบ่งแยก Cu/Pb และ Sn ของพระพุทธรูปอู่ทองแต่ละแบบ



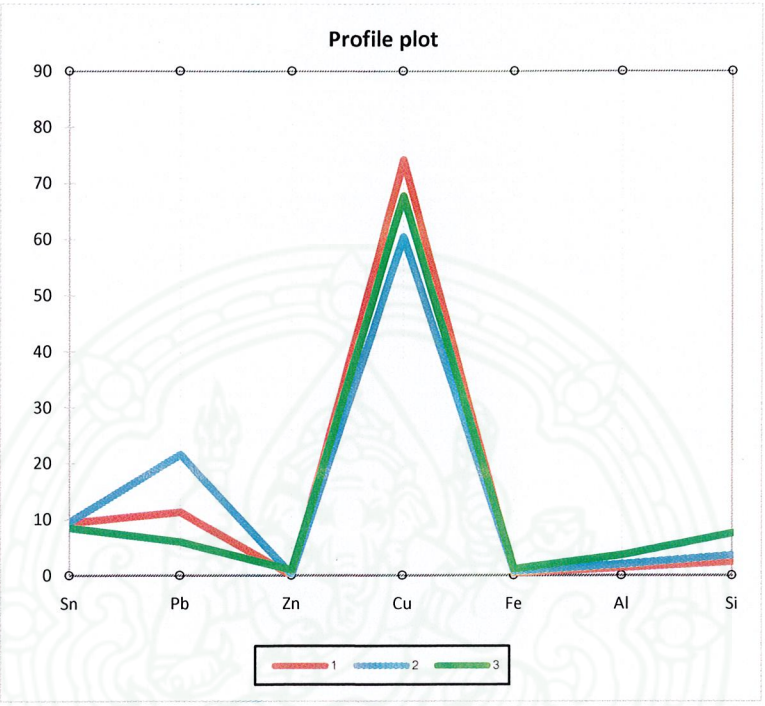
กราฟสามเหลี่ยมแสดงสัดส่วนผสมของธาตุหลัก



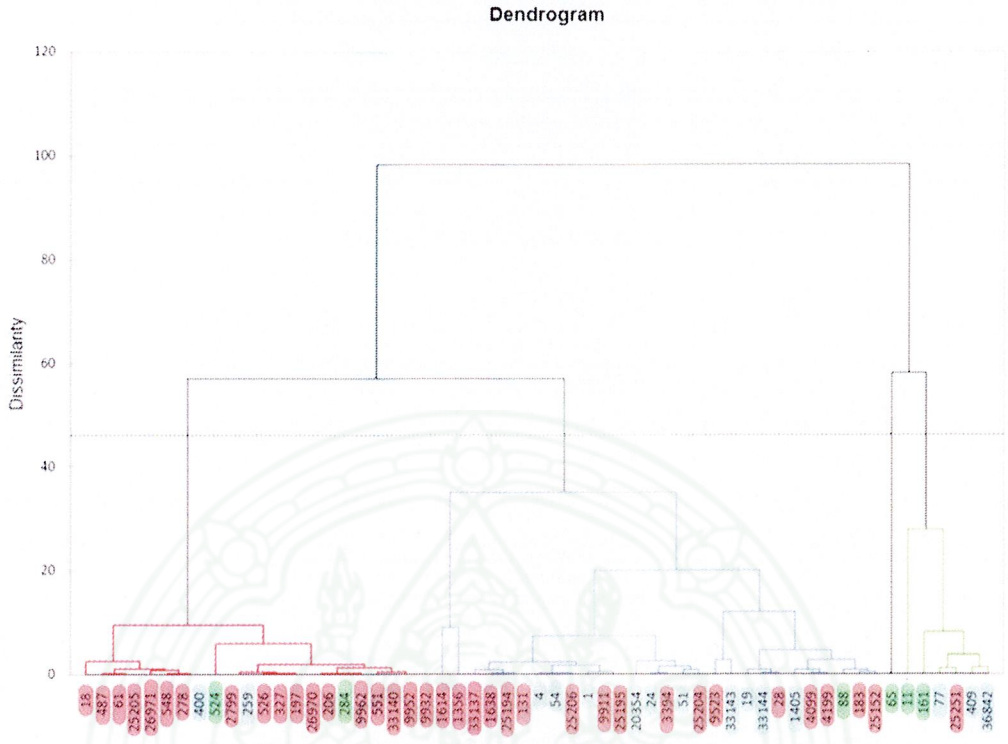
กราฟเปรียบเทียบการแบ่งกลุ่มโลหะผสมของทองแดงของพระพุธรูปอู่ทองโดยเปรียบเทียบกับรูปแบบของโลหะผสมของทองแดงปัจจุบัน ของอัตราส่วนผสม ดีบุก ตะกั่ว และสังกะสี ซึ่งพระพุทธรูปศิลปะอู่ทอง มีลักษณะที่

สัดส่วนโลหะเป็น สำริด (bronze) หรือ Tin-Bronze, lead-Tin Bronze ,High Lead Tin Bronze ส่วนใหญ่สัดส่วนผสมของโลหะพระพุทธรูปอู่ทองมีลักษณะเป็น High Lead Tin Bronze หรือมีสัดส่วนที่เป็นสำริดประเภทมีตะกั่วในองค์ประกอบสูง เมื่อพิจารณาตามรุ่นพบว่าอู่ทอง ๑ มีความเป็นสำริดหรือTin Bronze ขณะที่ อู่ทอง ๒ และอู่ทอง ๓ มีลักษณะเป็น สำริดประเภทผสมตะกั่วสูงหรือ High Lead Tin Bronze

กราฟแสดงปริมาณเปรียบเทียบธาตุสำคัญต่างๆของพระพุทธรูปแต่ละแบบ



กราฟเปรียบเทียบความเหมือนของพระพุทธรูปแต่ละองค์



7 Factor

แผนภูมิเปรียบเทียบพระพุทธรูปศิลปะอู่ทองทุกยุคสมัย ๕๗ ตัวอย่าง แยกตามความแตกต่างของส่วนผสมหลัก ๓ ธาตุ ทองแดง ดีบุก ตะกั่ว และธาตุปนเปื้อน คือ สังกะสี เหล็ก ซิลิกอน และอลูมิเนียม พบว่าจัดพระพุทธรูปออกเป็นสามกลุ่มใหญ่ กลุ่มแผนผังสีแดง แผนผังสีน้ำเงิน และแผนผังสีเขียว

สรุปการศึกษา

๑.พระพุทธรูปอู่ทองแบบที่ ๑ มีการใช้โลหะผสมของทองแดงหลายแบบ ประกอบด้วย สำริด ประเภท

๑. Tin-Bronze

๒.Leaded-Tin Bronze

๓. Gunmetal(ต้องมีการศึกษาข้อมูลมากขึ้น)

พระพุทธรูปประเภท Leaded-Tin Bronze มีสัดส่วนของโลหะมีลักษณะร่วมกับพระพุทธรูปอู่ทองแบบ ๒ และ ๓ หมายเหตุ จำเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติมเนื่องจากจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษามีจำนวนน้อย

๒.พระพุทธรูปอู่ทองแบบที่ ๒ มีการใช้โลหะผสมของทองแดงหรือ สำริด ประเภทLeaded-Tin Bronze มีรูปแบบการผสมโลหะที่ ใช้สัดสัดที่เป็นรูปแบบเดียวกันคือใช้โลหะทองแดงที่ปรับลดปรับเพิ่มสอดคล้องกับปริมาณตะกั่วแบบผกผัน ส่วนปริมาณดีบุกมีปริมาณคงที่ ๘- ๑๑ % ไม่ขึ้นกับปริมาณของทองแดงและตะกั่ว โดยมีสูตรที่ใช้คำนวณหาส่วนผสมดังนี้Pb = 69.2935964080436-0.797923648517232*Cu มีค่าเบี่ยงเบนด้านบน คือPb = 0.0161Cu2 - 2.9704Cu + 144.6 ขณะที่ค่าเบี่ยงเบนด้านล่าง คือ Pb = -0.0161Cu2 + 1.3745Cu - 6.0139

๓.พระพุทธรูปอู่ทองแบบที่ ๓ มีการใช้โลหะผสมของทองแดงหรือ สำริดส่วนมาก ประเภท High Leaded-Tin Bronze คือมีการใช้ปริมาณตะกั่วที่มากกว่าดีบุก มีรูปแบบการผสมโลหะที่ ใช้สัดสัดที่เป็นรูปแบบเดียวกันคือใช้โลหะทองแดงที่ปรับลดปรับเพิ่มสอดคล้องกับปริมาณตะกั่วแบบผกผัน ส่วนปริมาณดีบุกมีปริมาณคงที่ ๘- ๑๒ % ไม่ขึ้นกับปริมาณของทองแดงและตะกั่ว โดยมีสูตรที่ใช้คำนวณหาส่วนผสมดังนี้ Pb = 52.7828148510421-0.553001713143731*Cu มีค่าเบี่ยงเบนด้านบน คือPb =0.0034Cu2-1.0205Cu+70.513 ขณะที่ค่าเบี่ยงเบนด้านล่าง คือ Pb = -0.0034Cu2-0.0855Cu+35.053โดยที่ทองแดงที่ใช้และนิยม คือ 60 – 78 % ปริมาณตะกั่วที่ 7.5 – 24.5% สัดส่วนที่มีการใช้กันมากคือ บริเวณ ที่ทองแดง 74.5% กับตะกั่ว 11%

พระพุทธรูปอู่ทอง ๒ สัดส่วนของโลหะสามชนิดคือทองแดง ตะกั่ว ดีบุก มีลักษณะที่ไม่คงที่แบบใดแบบหนึ่ง แต่ยังคงอยู่ในแบบหรือขอบเขตการคำนวณตามสูตร ซึ่งแสดงถึงเป็นลักษณะของการปรับปรุงสูตรการผสมตลอดยุคสมัย ในขณะที่อู่ทอง ๓ มีลักษณะการใช้โลหะผสมเช่นเดียวกับพระอู่ทอง ๒ มีการปรับปรุงและพัฒนาสัดส่วนเช่นกัน แต่จะมีบริเวณหรือสัดส่วนที่มีความเหมาะสมหรือเลือกใช้กันมากสำหรับอู่ทอง ๓ คือ ทองแดง บริเวณ 74.5% ตะกั่ว 11% ดีบุก 9.5%พระพุทธรูปอู่ทองแบบที่ ๒ และ ๓ มีสัดส่วนของการใช้โลหะผสมบางช่วงเวลา ที่มีความเหมือนกันหรือแบบเดียวกันซึ่งอาจแสดงมีการทับซ้อนของช่วงเวลาการทำพระพุทธรูป

ข้อจำกัดอุปสรรค

๑. การศึกษานี้ยังคงไม่สมบูรณ์ เนื่องจากยังคงมีข้อจำกัดของเทคนิคการศึกษาที่ใช้ที่ไม่ทำลายตัวอย่าง จึงเป็นข้อมูลที่เป็นแนวทางในการศึกษาต่อไป

๒. จำนวนตัวอย่างเช่นอู่ทอง ๑ น้อยเกินไปจึงยังอาจไม่มีความถูกต้องมากนัก

๓.ข้อมูลที่ศึกษาได้ในพระพุทธรูปบางองค์มีความแตกต่างจากข้อมูลโดยรวมจึงอาจต้องศึกษาให้ลึกมากกว่าวิธีที่ศึกษาครั้งนี้เพื่อยืนยันความถูกต้อง