



KMUTT

60 ปี  
แห่งการสถาปนา



สังคัมปรัวรรต  
พพณน้อมนาคต



IE  
NETWORK  
2020



# บทความฉบับสมบูรณ์ PROCEEDINGS

การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม

The 38<sup>th</sup> Conference of Industrial Engineering Network

วันที่ 7-8 พฤษภาคม 2563

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร

## คณะกรรมการจัดประชุมวิชาการ

### ข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2563

ผศ. นิธิ	บูรณจันท์	ประธานการจัดงาน
ศ.ดร. อาษา	ประทีปเสนา	ที่ปรึกษาฝ่ายวิชาการ
รศ.ดร. เขาวลิต	ลิ้มมณีวิจิตร	ที่ปรึกษาฝ่ายวิชาการ
ผศ.ดร. ไชยา	ดำคำ	ที่ปรึกษาฝ่ายวิชาการ
รศ.ดร. สุขสันต์	พรหมบุญพงศ์	ที่ปรึกษาฝ่ายวิชาการ
รศ.ดร. เตือนใจ	สมบุญณวิวัฒน์	ประธานฝ่ายวิชาการ
ผศ.ดร. อภินันทนา	อุดมศักดิ์กุล	ประธานอำนวยการ
ผศ.ดร. อุษณีย์	คำพูล	รองประธานอำนวยการ
รศ.ดร. บวรโชค	ผู้พัฒนา	ประธานฝ่ายจัดหาทุน
ดร. พงษ์ศักดิ์	ถึงสุข	รองประธานฝ่ายจัดหาทุน
ผศ.ดร. สมบุญ	เจริญวิไลศิริ	เลขานุการ
ผศ.ดร. ช่อแก้ว	จตุรานนท์	รองเลขานุการ
รศ.ดร. เจริญชัย	โหมพัตราภรณ์	กรรมการวิชาการ
ผศ.ดร. วิบุญ	ตั้งวโรตมณกุล	กรรมการวิชาการ
ผศ. มงคล	สินะวัฒน์	กรรมการวิชาการ
ผศ. พจมาน	เตียวพัฒนรัฐติกาล	กรรมการวิชาการ
ดร. พิเนชฐ์	ศรีโยธา	กรรมการวิชาการ
ดร. เชษฐพงษ์	จรรยาอนุรักษ์	กรรมการวิชาการ
ดร. ธนชพร	วงเวียน	กรรมการวิชาการ
ดร. พร้อมพงษ์	ปานดี	กรรมการวิชาการ
ดร. ก้องเกียรติ	ปุภรัตน์พงษ์	กรรมการวิชาการ
ดร. ศุภฤกษ์	บุญเทียร	กรรมการวิชาการ
ดร. ไพบูลย์	ช่วงทอง	กรรมการวิชาการ
อ. สุจินต์	ธงถาวรสุวรรณ	กรรมการวิชาการ
อ. สมพร	เพียรสุขมณี	กรรมการวิชาการ
อ. เจษฎา	จันทวงษ์โส	กรรมการวิชาการ
อ. พงษ์ศักดิ์	เทวินภิบาลพันธุ์	กรรมการวิชาการ
อ. ชนาگانต์	แคล้วอ้อม	กรรมการวิชาการ
อ. สุทิน	ชาญณรงค์	กรรมการวิชาการ
อ. วาสนา	เสียงดัง	กรรมการวิชาการ
อ. นพณรงค์	ศิริเสถียร	กรรมการวิชาการ
นายไพโรจน์	กรยุทธทอง	กรรมการอำนวยการ
นายสุธี	สังเทศย์	กรรมการอำนวยการ

## คณะกรรมการจัดประชุมวิชาการ

### ข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2563 (ต่อ)

นายคมกริช	กองสินทราก	กรรมการอำนวยการ
นายราชศักดิ์	เสนีวงศ์ ณ อยุธยา	กรรมการอำนวยการ
นางสาวราตรี	รอดแก้ว	กรรมการอำนวยการ
นางสาวณธิกา	ยิ้มวิไล	กรรมการอำนวยการ
นางสาวพรพิมล	ตั้งต่อวงศ์สกุล	กรรมการอำนวยการ
นางสาวเบญจมาศ	แทนปั้น	กรรมการอำนวยการ
นางสาวเบญจวรรณ	ศรีปานเงิน	กรรมการอำนวยการ

## รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

### มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ศ.ดร.อาษา	ประทีปเสนา
รศ.ดร.เต๋อใจ	สมบุญณวิวัฒน์
รศ.ดร.สุขสันต์	พรหมบุญพงศ์
รศ.ดร.บวรโชค	ผู้พัฒนา
รศ.ดร.ชุมพล	มณฑาทิพย์กุล
ผศ.ดร.เจริญชัย	โคมพัทธราภรณ์
ผศ.ดร.ช่อแก้ว	จตุรานนท์
ผศ.ดร.วิบุญ	ตั้งวโรตมณกุล
ผศ.ดร.อุษณีย์	คำพูล
ผศ.ดร.สมบุญ	เจริญวิไลศิริ
ผศ.ดร.อภินันทนา	อุดมศักดิ์กุล
ผศ.ดร.สรวิษฐ์	เยาวสุวรรณไชย
ผศ.ดร.กนกพร	กังวานสงค์
ผศ.ดร.อิศรทัต	พึ้งอัน
ผศ.พจมาน	เตียววัฒนรัฐติกาล
ผศ.มงคล	สินะวัฒน์
อ.ดร.เชษฐพงษ์	จรรยาอนุรักษ์
อ.ดร.ศุภฤกษ์	บุญเทียร
อ.ดร.ไพบูลย์	ช่วงทอง
อ.ดร.พร้อมพงษ์	ปานดี
อ.ดร.กานดา	บุญโสธรสถิต
อ.ดร.ฐิตินันท์	มีทอง
อ.ดร.ก้องเกียรติ	ปุภรัตน์พงษ์
อ.สุจินต์	ธงถาวรสุวรรณ
อ.สมพร	เพียรสุขมณี
อ.เจษฎา	จันทวงษ์โส
อ.นพณรงค์	ศิริเสถียร
อ.ชนากานต์	แคล้วอ้อม

### จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศ.ดร.ปารเมศ	ชุตินา
รศ.ดร.ปวีณา	เชาวลิตวงศ์
รศ.ดร.วิภาวี	ธรรมาภรณ์พิลาศ

## รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ (ต่อ)

### จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (ต่อ)

รศ.ดร.สมเกียรติ	ตั้งจิตสิตเจริญ
รศ.ดร.ณัฐชา	ทิวแสงสกุลไทย
ผศ.ดร.นภัสสวงศ์	โอสสถิลป์
ผศ.ดร.อังศุมาลิน	เสนจันทร์ฉิมไชย
ผศ.ดร.ดาริชา	สุธีวงศ์
ผศ.ดร.พิศิษฐ์	จารุมนโรจน์
ผศ.ประเสริฐ	อัครประดมพงศ์
ผศ.สุรพงษ์	ศิริกุลวัฒนา
ผศ.ภูมิ	เหลืองจามีกร
ผศ.ทฤทัย	โลหะศิริวัฒน์
อ.ดร.ไพโรจน์	ลดาวิจิตรกุล
อ.ดร.อมรศิริ	วิลาสเดชานนท์
อ.ดร.ณัฐ	ลีละวัฒน์
อ.วรโชค	ไชยวงศ์

### มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผศ.ดร.พรเทพ	อนุสรนิตินสาร
รศ.ดร.จันทร์ศิริ	สิงห์เถื่อน
ผศ.ดร.นราภรณ์	เภาประเสริฐ
อ.ดร.รมิตายุ	อยู่สุข

### มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน

อ.ดร.ประภัสสร	ตันติพันธุ์วดี
อ.ดร.อธิวัฒน์	บุญมี
อ.ดร.วรญา	เนืองมัจฉา
อ.ดร.อณจ	ชัยมณี
อ.ดร.วรุตม์	บุญภักดี

### มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

รศ.ดร.นิวิท	เจริญใจ
รศ.ดร.ชมพูนุท	เกษมเศรษฐ์
รศ.ดร.ชนนาถ	กฤตวรกาญจน์
ผศ.ดร.อลงกต	ลิ้มเจริญ แก้วโชตช่วงกุล

## รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ (ต่อ)

### มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (ต่อ)

อ.ดร.ชวิศ	บุญมี
อ.ดร.วาปี	มโนภินิเวศ
อ.ดร.วิรัชญา	จันทพวยเพชร

### มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

ผศ.ดร.ธนิดา	สุนารักษ์
ผศ.วรินทร์	เกียรติคุณกุล

### มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

รศ.ดร.กฤษดา	อัครรุ่งแสงกุล
รศ.ดร.ธีรเดช	วุฒิพรพันธ์
ผศ.ดร.กุศล	พิม่าพันธุ์ศรี
ผศ.ดร.ชยธัช	เผือกสามัญ
ผศ.ดร.ณัฐนารี	สุกเสกสรรค์
ผศ.ดร.ธนสาร	อินทรกำจรชัย

### มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

รศ.สุรสิทธิ์	ระวิงวงศ์
ผศ.ชูไฮดี	สนิ
ผศ.วรพงษ์	บุญช่วยแทน

### มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร

ผศ.ดร.วิสัน	ชารี
-------------	------

### มหาวิทยาลัยขอนแก่น

รศ.ดร.ชาญณรงค์	สายแก้ว
รศ.ดร.ศิรินทร์	สุขโต
ผศ.ดร.ธีรวัฒน์	เหล่านภากุล
ผศ.ดร.คมกฤษ	ปิติฤกษ์
ผศ.ดร.ธนา	ราชภูริภักดี
ผศ.ดร.รักน้อย	อัครรุ่งเรืองกุล
ผศ.ดร.สุขอังคณา	แถลงกัณฑ์
ผศ.ดร.วีรพัฒน์	เศรษฐ์สมบูรณ์

## รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ (ต่อ)

### มหาวิทยาลัยขอนแก่น (ต่อ)

ผศ.ดร.ฐนวรรธน์ นิยะโสมสถ  
ผศ.ดร.ปณิตศน์ สุรีย์ธนาภาส  
ผศ.ดร.ฐิติพงศ์ จำรัส  
อ.ดร.ศิวดี อธิญานารถ

### มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

ศ.ดร.พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์  
รศ.ดร.จิรรัตน์ อีระวราพฤษย์  
รศ.ดร.บุษบา พฤษชาพันธ์รัตน์  
รศ.ดร.เสมอจิตร์ หอมรสสุคนธ์  
รศ.จิรัชย์ พุทธกุลสมศิริ  
ผศ.ดร.อภิวัฒน์ มุตตามระ  
ผศ.ดร.จิรวรรณ คล้อยภยันต์  
ผศ.ดร.วารรัตน์ กังสัมฤทธิ์  
ผศ.ดร.สวัสดิ์ ภาระราช  
ผศ.ดร.สุภมาศ สุชาติานนท์  
ผศ.นริศ เจริญพร  
อ.ดร.อนินทยา คำกันยา  
อ.ดร.วุฒินันท์ นุ่นแก้ว

### มหาวิทยาลัยนเรศวร

ผศ.ดร.สธินิตย์ พุทธพนม  
ผศ.ดร.ขวัญนิธิ คำเมือง  
ผศ.ดร.สมลักษณ์ วรรณฤมล กิเยลาโรว่า  
ผศ.ดร.ศรีสัจจา วิทยศักดิ์  
ผศ.ศิษฏา สิมารักษ์

### มหาวิทยาลัยมหิดล

รศ.ดร.ดวงพรรณ ศฤงคารินทร์  
ผศ.ดร.ศุภชัย ราชฤทธิ์ศิริ  
ผศ.ดร.ดวงยศ สุภักดิ์  
อ.ดร.เอกชัย วารินศิริรักษ์  
อ.ดร.นพกร ภู่อะยา

## รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ (ต่อ)

### มหาวิทยาลัยรังสิต

ผศ.ดร.ธนวรรณ อัสวไพบูลย์  
ผศ.ดร.พิชญ์ มนัสปิติ  
ผศ.ดร.เพ็ญจันทร์ โกญจนาท  
ผศ.ศิลปชัย วัฒนเสย  
อ.ดร.ประพล จิระพรทิพย์  
อ.ดร.สมพร พรหมดวง  
อ.พรรคพงษ์ แก่นณรงค์  
อ.สายสุนีย์ พงษ์พัฒนศึกษา

### มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

อ.ประสิทธิ์ ไกรลมสม

### มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ

ผศ.ดร.ไพรัตน์ แก้วสาร  
อ.วรเชษฐ์ แสงสีดา

### มหาวิทยาลัยราชภัฏธนบุรี

อ.วรวิทย์ ลีลาวรรณ  
อ.ธนากร เมียงอารมณ์

### มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์

ผศ.ดร.อุดมพงษ์ เกศศรีพงษ์ศา  
ดร.เมษายา บุญสีลา  
อ.พิพัฒน์ ประจัญสานต์

### มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์

ผศ.ดร.นิศานาถ แก้ววินัด

### มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี

อ.วรัญญา ทิพย์โพธิ์



## รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ (ต่อ)

### มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

รศ.ดร.นิลวรรณ	ชุ่มฤทธิ์
ผศ.รติรัตน์	กิตติปัญญาพัฒน์
อ.ดร.พงษ์เพ็ญ	จันทนะ
อ.ดร.อนุวัฒน์	จตุลภาภวาร
อ.รท.ดร.รัฐวุฒิ	วงษ์วิทย์
อ.ดร.สมภาพ	แสงผึ้ง

### มหาวิทยาลัยศิลปากร

รศ.ดร.ประจวบ	กล่อมจิตร
--------------	-----------

### มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

รศ.ดร.ธเนศ	รัตนวิไล
รศ.ดร.นิกร	ศิริวงศ์ไพศาล
รศ.ดร.เสกสรร	สุธรรมานนท์
รศ.สมชาย	ชูโฉม
รศ.วนิดา	รัตนมณี
ผศ.ดร.นภิสพร	มีมงคล
ผศ.ดร.อรุณ	สังขพงศ์
ผศ.ดร.สุภาพรรณ	ไชยประพัทธ์
ผศ.ดร.รัฐชนา	สินธวาลัย
ผศ.ดร.วนัฐมพงษ์	คงแก้ว
ผศ.พิเชฐ	ตระการชัยศิริ
ดร.สุรียา	จิรสถิตสิน
ดร.กุลภัทร์	ทองแก้ว
ดร.ชุกกรี	แตสา
อ.ศิวศิษย์	วิทย์ศิลป์
อ.ลัคน์สิริ	ตรีรานูรัตน์

### มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

รศ.นุชสราร	เกรียงกรกฎ
รศ.ปรีชา	เกรียงกรกฎ
อ.ฐิติวรดา	ศรีสุวรรณดี

## รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ (ต่อ)

### สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ  
รศ.ดร.สิทธิพร พิมพ์สกุล  
รศ.ดร.สกนธ์ คล่องบุญจิต  
รศ.ดร.ทศพล เกียรติเจริญผล  
รศ.ดร.วัลย์ลักษณ์ อัตธีรวงศ์  
รศ.ดร.ชุมพล ยวงใย  
ผศ.ดร.วิภู ศรีสืบสาย  
ผศ.ดร.อุดม จันทร์จรัสสุข  
ผศ.ดร.กิตติวัฒน์ สิริเกษมสุข  
ผศ.ดร.มนัสชนก จงประสิทธิ์พร  
ผศ.ดร.เชาวลิต หามนตรี  
ผศ.ดร.นิรันดร์ พิสุทธอานนท์  
ผศ.ดร.รณน เจียรตระกุล  
ผศ.ดร.ภาสุ พูนภักดี  
อ.ดร.พลชัย โชติปราชญ์กุล  
อ.ดร.เพชรพล ตัณฑวิรุฬห์  
อ.ดร.จรัสวรรณ โภยวานิช

### สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์

รศ.ดร.กาญจน์ภา อมรัชกุล

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

### บทความหัวข้อที่ 5 Metallurgy, Materials and Surface Engineering (ME) (ต่อ)

IE-NETWORK-2020-ME-0021	280
ผลของธาตุเจือเงิน ทองแดงและดีบุก ในโลหะประสานทองคำ 965 สำหรับอุตสาหกรรมเครื่องประดับ ที่มีต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อมประสาน นพนัช พวงมาลี, ณรงค์ฤทธิ์ สนใจธรรม, เศรษฐวิทย์ แสงทิพย์, นพนันต์ เมืองเหนือ, นรารักษ์ บุตรชา และ สุรัตน์ วรรณศรี	
IE-NETWORK-2020-ME-0104	286
สมบัติการไหลตัวของโลหะอะลูมิเนียมผสมนิกเกิลในกระบวนการหล่อแรงดันสูง ณรงค์ศักดิ์ อมรัตน์อำรงค์, ปิยะพัทธ์ อุดมสิน, เซาวลิต ลิ้มมณีจิตร และ พร้อมพงษ์ ปานดี	
IE-NETWORK-2020-ME-0108	291
การพัฒนาความแข็งแรงและการต้านทานการกัดกร่อนของแนวเชื่อมอลูมิเนียมด้วยกระบวนการอะโนไดเซชัน วันสวีน จุ้นแดง และ อรรถพล แก้ววิสัย	
IE-NETWORK-2020-ME-0150	296
อิทธิพลของระยะห่างระหว่างการสแกนและความหนาชั้นผงที่ส่งผลต่อคุณภาพผิวในการพิมพ์สามมิติโดยใช้ เลเซอร์เผาผนึกวัสดุผงเทอร์โมพลาสติกโพลียูรีเทน สุภมาศ สุชาติานนท์, สุพรรณษา ซาดง และ สุกฤษฎี พูลสมบัติ	
IE-NETWORK-2020-ME-0151	303
คุณสมบัติทางกลของเทอร์โมพลาสติกโพลียูรีเทนที่ขึ้นรูปโดยการพิมพ์สามมิติโดยใช้เลเซอร์เผาผนึกวัสดุผง สุภมาศ สุชาติานนท์, สุกฤษฎี พูลสมบัติ และ สุพรรณษา ซาดง	
IE-NETWORK-2020-ME-0158	310
การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตผ้าไม่ทอจากเปลือกปาล์มน้ำมัน ภัทรภา จ้อยพจน์, จุฬาลักษณ์ โรจนานุกูล และ วิทยา ศิริคุณ	
IE-NETWORK-2020-ME-0189	316
การเพิ่มอายุความล้าของสปริงคลัทซ์ในรถยนต์ กฤษดา ประสพชัยชนะ, จันทร์ชา นาควชิรตระกูล และ สิริรัตน์ นำบัณฑิตษฐ์	

ผลของธาตุเงิน ทองแดงและดีบุก ในโลหะประสานทองคำ 965 สำหรับอุตสาหกรรม  
เครื่องประดับ ที่มีต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อมประสาน  
Influence of silver copper and tin alloying element within gold brazing  
alloys 965 for jewelry industry onto strength of brazing-line

นพณ์ช พวงมาลี<sup>1</sup> ณรงค์ฤทธิ์ สนใจธรรม<sup>2</sup> เศรษฐวิทย์ แสงทิพย์<sup>3</sup> นพนันต์ เมืองเหนือ<sup>4</sup>  
นรารักษ์ บุตรชา<sup>5</sup> สุรัตน์ วรรณศรี<sup>6</sup>

Noppanuch Puangmalee<sup>1</sup> Narongrit Sonjaitham<sup>2</sup> Setthawit Saengthip<sup>3</sup> Noppanan mungnuae<sup>4</sup>  
Nararak Budchar<sup>5</sup> Surat Wannasri<sup>6</sup>

p\_puangmalee@hotmail.com<sup>1</sup> narongrit.s@fitm.kmutnb.ac.th<sup>2</sup> witkub@hotmail.com<sup>3</sup> down\_31@hotmail.com<sup>4</sup>  
nararak.bu@rmuti.ac.th<sup>5</sup> swanasri\_1@hotmail.com<sup>6</sup>

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของธาตุเงิน ทองแดงและดีบุก ในโลหะประสานทองคำ 965 สำหรับอุตสาหกรรมเครื่องประดับ ที่มีต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อมประสาน โดยขึ้นทดสอบเป็นโลหะผสม ทองคำ (Au), เงิน (Ag), ทองแดง (Cu) และดีบุก (Sn) โดยมีปริมาณผสมของ Ag, Cu และ Sn 0.56–3.49 wt.%, 0–1.50 wt.% และ 0–1.35 wt.% ตามลำดับ ความแข็งแรงของแนวเชื่อมประสานดำเนินการทดสอบด้วยการทดสอบแรงดึง โดยการประยุกต์วิธีการทดสอบตามมาตรฐาน มอก 2669–2558 จากการศึกษาพบว่า ปริมาณความเข้มข้นของธาตุเงินทองแดง (Cu') และดีบุก (Sn') ที่เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของแนวเชื่อมประสานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยขึ้นทดสอบที่อัตราส่วนผสม 96.57Au 1.02Ag 1.22Cu 1.19Sn มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดเท่ากับ 370.49 MPa นอกจากนี้ การเติมธาตุเงินทองแดงและดีบุก เพื่อทดแทนธาตุเงินในโลหะประสานทองคำ 965 ซึ่งส่งผลทำให้ความแข็งแรงของแนวเชื่อมประสานเพิ่มขึ้นแล้ว ยังสามารถลดต้นทุนวัตถุดิบในการผลิตโลหะประสานทองคำ 965 ได้อีกด้วย

**คำสำคัญ :** โลหะประสานทองคำ 965, ธาตุเงิน, ธาตุเงินทองแดง, ธาตุเงินดีบุก, แนวเชื่อมประสาน, อุตสาหกรรมเครื่องประดับ

#### Abstract

This research investigates the influence of silver copper and tin alloying element within gold brazing alloys 965 for jewelry industry onto strength of brazing-line. The specimens composed of Au, Ag, Cu and Sn. The volume of Ag, Cu and Sn were varied between 0.56–3.49 wt.%, 0–1.50 wt.% and 0–1.35 wt.% respectively. The strength of brazing-line was tested by tensile testing according to TIS 2669–2558. It was found that the copper (Cu') and tin intensity (Sn') were increased which affect to trend of ultimate tensile strength of brazing-line was increased. The specimen 96.57Au 1.02Ag 1.22Cu 1.19Sn had highest value of ultimate tensile strength was 370.49 MPa. In addition the adding copper and tin alloys to replace silver alloy in gold brazing alloys 965 as a result to strength of brazing-line increased, and it can also save raw materials cost for production of gold brazing alloys 965.

**Keywords :** gold brazing alloys, silver, copper, tin, brazing-line, jewelry industry

<sup>1,3,4</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา

<sup>2</sup> ภาควิชาการจัดการอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีและการจัดการอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

<sup>5,6</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

## 1. บทนำ

มาตรฐานทองคำรูปพรรณ 965 กำหนดให้มีปริมาณเนื้อทองคำไม่น้อยกว่า 96.5% โดยน้ำหนัก และมีธาตุอื่นเจืออยู่ไม่เกิน 3.5% โดยน้ำหนัก [1] ซึ่งธาตุเจืออาจอยู่ในรูปของธาตุบริสุทธิ์หรือโลหะเจือชนิดต่างๆ ซึ่งมีผลทำให้สมบัติต่างๆ ของทองคำรูปพรรณ 965 เปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณและชนิดของธาตุเจือที่ผสมเข้าไป และจากการศึกษาปัญหาอุปสรรคในการพัฒนาคุณภาพการผลิตเครื่องประดับ ด้านโลหะเชื่อมประสาน พบว่า ในขบวนการผลิตเครื่องประดับจะต้องมีการเชื่อมประสานเพื่อประกอบชิ้นส่วนต่างๆ ที่เป็นส่วนประกอบของเครื่องประดับเข้าด้วยกัน เช่น การเชื่อมกระเปาะสำหรับฝังพลอยเข้ากับตัวเรือนของจี้ ต่างหู หรือแม่แต่ก้านแหวน และนอกจากนี้ ยังรวมถึงการเชื่อมประสานเพื่อตกแต่งผิวชิ้นงานสำเร็จ โดยการเชื่อมปิดรอยตำหนิหรือตามรอยตำหนิจากการหดตัวของชิ้นงานจากขบวนการหล่อขึ้นรูป ซึ่งวัสดุที่ใช้ในการเชื่อมประสานเหล่านี้จะต้องมีคุณสมบัติหลอมละลายต่ำกว่าวัสดุที่ใช้เป็นตัวเรือนเครื่องประดับ แต่จะต้องมีปริมาณส่วนผสมของโลหะมีค่าผสมอยู่ตามปริมาณที่กำหนด โดยเฉพาะอย่างยิ่งเครื่องประดับที่ผลิตจากทองคำผสม 965 ที่ได้รับความนิยมจากผู้บริโภคภายในประเทศและต่างประเทศ ซึ่งบ่อยครั้งที่มีการตรวจสอบเครื่องประดับที่ผลิตจากทองคำผสม 965 ไม่ผ่านมาตรฐาน เนื่องจากการใช้โลหะประสานทองคำ ที่มีปริมาณเนื้อทองคำต่ำกว่าวัสดุตัวเรือน ซึ่งส่งผลให้ปริมาณเนื้อทองคำโดยรวมต่ำกว่าปริมาณที่กำหนด และนอกจากนี้ สีของโลหะเชื่อมประสานจะต้องมีสีใกล้เคียงกับวัสดุตัวเรือนให้มากที่สุด รวมถึงแนวเชื่อมประสานต้องมีความแข็งแรงที่เพียงพอต่อแรงดึงที่กระทำกับชิ้นงานเครื่องประดับได้ จากการศึกษาสมบัติของธาตุเจือต่างๆ ที่นำมาเป็นธาตุเจือในวัสดุประสานทอง 965 และภายใต้ข้อกำหนดคือ วัสดุประสานทองต้องมีเนื้อทองคำไม่น้อยกว่า 96.5 โดยน้ำหนัก มีความแข็งแรง มีจุดหลอมละลายต่ำกว่าวัสดุตัวเรือนและมีสีที่ใกล้เคียงกับวัสดุตัวเรือนมากที่สุด ซึ่งธาตุเจือหลักที่นิยมนำมาผลิตวัสดุประสานทอง 965 คือธาตุเงิน (Ag) ซึ่งจะช่วยให้วัสดุประสานทองมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากธาตุเงินมีต้นทุนค่อนข้างสูง จึงมีการนำทองแดง (Cu) มาเป็นธาตุเจือรอง ซึ่งทองแดงที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้วัสดุประสานทองมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นด้วย แต่สีของวัสดุประสานทองจะออกโทนสีแดงเพิ่มขึ้นเช่นกัน [2] ดังนั้น จึงจำเป็นต้องนำธาตุเจือรองอื่นผสมเพิ่มเข้าไปในวัสดุประสานทอง นั่นคือดีบุก (Sn) ซึ่งเป็นธาตุที่ลักษณะทางกายภาพสีเนื้อวัสดุใกล้เคียงกับธาตุเงินและมีต้นทุนค่อนข้างต่ำ เพื่อทดแทนปริมาณที่ลดลงของธาตุเงินและลดโทนสีแดงของวัสดุประสานทองให้ใกล้เคียงกับตัวเรือนมากที่สุด นอกจากนี้ดีบุกยังมีผลทำให้จุดหลอมละลายของวัสดุผสมนั้นต่ำลงด้วย [3] ซึ่งในงานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยได้มุ่งเน้นศึกษาผลของธาตุเจือเงิน ทองแดงและดีบุกในโลหะประสานทองคำ 965 สำหรับอุตสาหกรรมเครื่องประดับ ที่มีต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อมประสาน

## 2. ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

การศึกษามลของธาตุเจือเงิน ทองแดงและดีบุกในโลหะประสานทองคำ 965 สำหรับอุตสาหกรรมเครื่องประดับ ที่มีต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อมประสาน มีขั้นตอนการดำเนินการวิจัยดังนี้

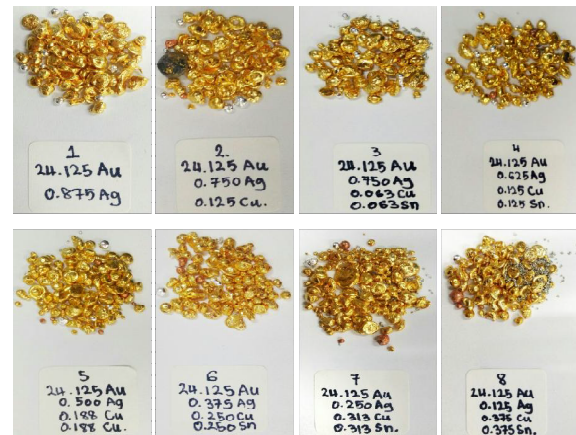
### 2.1 การเตรียมโลหะประสานทองคำ 965

กำหนดอัตราส่วนผสมของโลหะประสานทองคำ 965 ซึ่งมีปริมาณธาตุหลักคือ ทองคำ (Au) 96.5 wt.% ธาตุเจือหลักคือ เงิน (Ag) 0.5–3.5 wt.% ธาตุเจือรองคือ ทองแดง (Cu) 0–1.5 wt.% และดีบุก (Sn) 0–1.5 wt.%

ธาตุเจือหลักและธาตุเจือรองจะถูกแปรผันปริมาณดังแสดงในตารางที่ 1 โดยปริมาณธาตุเจือหลักและธาตุเจือรองรวมกันแล้วต้องไม่เกิน 3.5 wt.% เพื่อผลิตเป็นเม็ดโลหะประสานทองคำ 965 ดังแสดงในรูปที่ 1 และดำเนินการนำเม็ดโลหะประสานทองคำ 965 มาหล่อขึ้นรูปและรีดเป็นแผ่นสำหรับการวิเคราะห์ตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีหลังการหล่อขึ้นรูป ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer และใช้ในการทดลองการเชื่อมประสาน เพื่อวิเคราะห์ผลของธาตุเจือเงิน ทองแดงและดีบุก ที่มีต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อมประสาน ดังแสดงในรูปที่ 2

ตารางที่ 1 การกำหนดอัตราส่วนผสมทางเคมีของโลหะประสานทองคำ 965

ขั้นตอนทดสอบ	สัดส่วนการผสมที่กำหนดในการทดลอง (wt.%)			
	Au	Ag	Cu	Sn
1	96.5	3.5		
2	96.5	3.0	0.5	
3	96.5	3.0	0.25	0.25
4	96.5	2.5	0.5	0.5
5	96.5	2.0	0.75	0.75
6	96.5	1.5	1.0	1.0
7	96.5	1.0	1.25	1.25
8	96.5	0.5	1.5	1.5



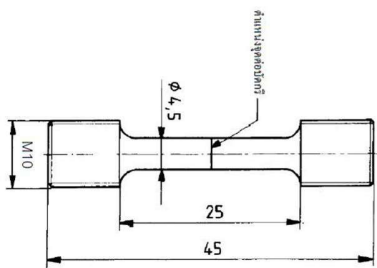
รูปที่ 1 เม็ดโลหะประสานทองคำ 965 สำหรับเตรียมการหล่อขึ้นรูปขั้นตอนทดสอบที่อัตราส่วนผสมต่างๆ



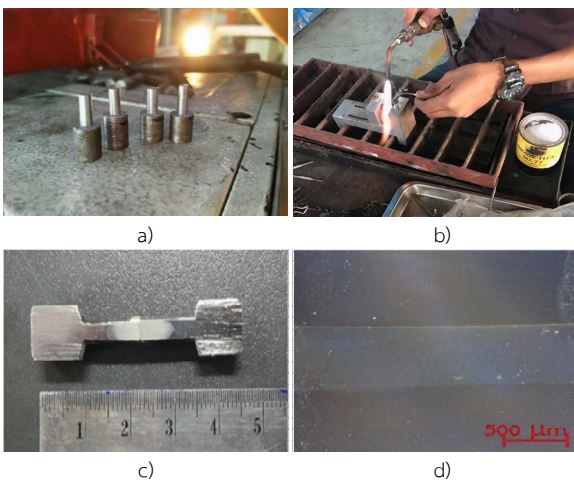
รูปที่ 2 โลหะประสานทองคำ 965 หลังการหล่อขึ้นรูปและรีดเป็นแผ่น

## 2.2 การเตรียมชิ้นทดสอบความแข็งแรงแนวเชื่อมประสานของโลหะประสานทองคำ 965

การวิเคราะห์ทดสอบความแข็งแรงในการเชื่อมประสานของโลหะประสานทองคำ 965 ดำเนินการทดสอบด้วยการทดสอบแรงดึง (Tensile testing) โดยการประยุกต์วิธีการทดสอบตามมาตรฐาน มอก 2669-2558 ชิ้นทดสอบมีขนาดและลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3 โดยดำเนินการนำเหล็กเหนียว ss400 ทำการกลึงขึ้นรูปชิ้นทดสอบ ดังลักษณะแสดงในรูปที่ 4 a) และดำเนินการเชื่อมประสานด้วยวัสดุโลหะประสานทองคำ 965 โดยจะใช้ฟลักซ์เจอร์เป็นอุปกรณ์จับยึดชิ้นทดสอบสำหรับการเชื่อมประสาน โดยวางชิ้นทดสอบในแนวนอนและใช้ฟิลเลอร์เกจขนาด 0.5 มม. เป็นตัวตั้งระยะห่างระหว่างชิ้นทดสอบทั้ง 2 ชิ้น เพื่อให้ระยะห่างของชิ้นทดสอบสำหรับการเชื่อมประสานมีระยะห่างที่คงที่เท่ากันทุกครั้ง และใช้ความร้อนจากการสันดาปของก๊าซเชื้อเพลิง LPG และเปลวไฟชนิด Neutral Flame ในการเชื่อมประสานดังแสดงในรูปที่ 4 b) หลังจากที่ได้ชิ้นทดสอบเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ชิ้นทดสอบจะถูกนำไปทำการขัดแต่งผิวให้เรียบ โดยใน 1 กลุ่มตัวอย่าง จะดำเนินการเชื่อมประสานชิ้นทดสอบจำนวน 6 ชิ้น และทำการสุ่มชิ้นทดสอบจำนวน 1 ชิ้น เพื่อทำการตรวจสอบความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมประสาน ดังแสดงในรูปที่ 4 c)-d) ซึ่งถ้าการสุ่มตรวจสอบชิ้นทดสอบพบว่าแนวเชื่อมประสานไม่สมบูรณ์ ชิ้นทดสอบทั้งหมดของกลุ่มตัวอย่างนั้น จะถูกดำเนินการเตรียมใหม่ทั้งหมดและสุ่มตรวจสอบอีกครั้ง นอกจากนี้ยังมีการตรวจสอบความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมประสานจากรอยขาดของแนวเชื่อมประสานหลังการทดสอบด้วย



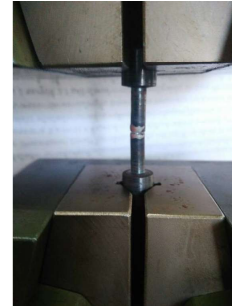
รูปที่ 3 ลักษณะของชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน มอก. 2669-2558



รูปที่ 4 การเตรียมและการเชื่อมประสานชิ้นทดสอบ

## 2.3 การทดสอบความแข็งแรงแนวเชื่อมประสานของโลหะประสานทองคำ 965

ความแข็งแรงแนวเชื่อมประสานของโลหะประสานทองคำ 965 จะถูกทดสอบด้วยการทดสอบแรงดึง (Tensile testing) ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงเอนกประสงค์ (Universal testing machine, UTM) ยี่ห้อ LLOYD รุ่น LS100 Plus ที่มีการติดตั้งอุปกรณ์วัดแรง (Load cell) ขนาด 100 kN และกำหนดอัตราเร็วในการดึงทดสอบที่ 0.2 mm/min ซึ่งมีลักษณะการจับยึดชิ้นทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ลักษณะการจับยึดชิ้นทดสอบสำหรับการทดสอบแรงดึง

## 3. ผลการวิจัย

### 3.1 ผลการวิเคราะห์ตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี

วัสดุโลหะประสานทองคำ 965 ทั้งหมดที่ได้จากการหล่อหลอมผสมโลหะชนิดต่างๆ ขึ้นรูปเป็นชิ้นทดสอบแล้ว ถูกนำไปทำการวิเคราะห์ตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค x - ray fluorescence พบว่าส่วนผสมทางเคมีของชิ้นทดสอบทั้งหมดมีค่าแตกต่างจากปริมาณการผสมที่กำหนดเล็กน้อย ชิ้นทดสอบบางชิ้นมีปริมาณของธาตุบางธาตุเพิ่มขึ้น บางธาตุลดลง ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งสันนิษฐานได้ว่า อาจเกิดจากการกระจายตัวของธาตุต่างๆ ไม่สม่ำเสมอในบางบริเวณของชิ้นทดสอบหรืออาจเกิดจากการที่เนื้อโลหะมีออกไซด์ผสมอยู่ แล้วถูกจับหรือแยกออกจากราน้ำโลหะด้วยผงบอริก (Boric acid powder) ซึ่งทำหน้าที่ฟลักซ์ (Flux) กลายเป็นขี้ตะกรัน (Slag) โดยขี้ตะกรันที่เกิดขึ้นนี้ จะลอยอยู่บนผิวหน้าและแยกตัวจากราน้ำโลหะ

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของวัสดุโลหะประสานทองคำ 965 ที่ได้จากการหล่อขึ้นรูป [4]

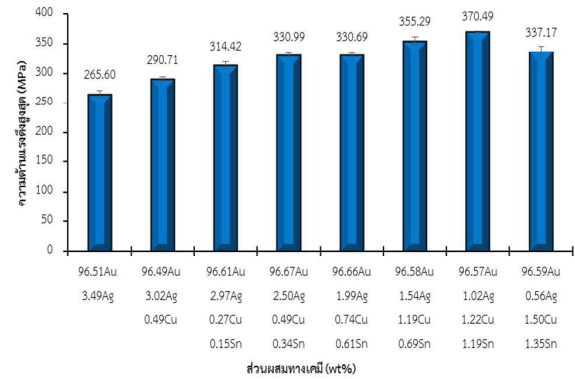
ชิ้นทดสอบ	สัดส่วนการผสมที่กำหนดในการทดลอง (wt.%)				การวิเคราะห์ตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี (wt.%)			
	Au	Ag	Cu	Sn	Au	Ag	Cu	Sn
1	96.5	3.5			96.51	3.49		
2	96.5	3.0	0.5		96.49	3.02	0.49	
3	96.5	3.0	0.25	0.25	96.61	2.97	0.27	0.15
4	96.5	2.5	0.5	0.5	96.67	2.50	0.49	0.34
5	96.5	2.0	0.75	0.75	96.66	1.99	0.74	0.61
6	96.5	1.5	1.0	1.0	96.58	1.54	1.19	0.69
7	96.5	1.0	1.25	1.25	96.57	1.02	1.22	1.19
8	96.5	0.5	1.5	1.5	96.59	0.56	1.50	1.35

### 3.2 ผลการวิเคราะห์ทดสอบความแข็งแรงแนวเชื่อมประสานของโลหะ ประสานทองคำ 965

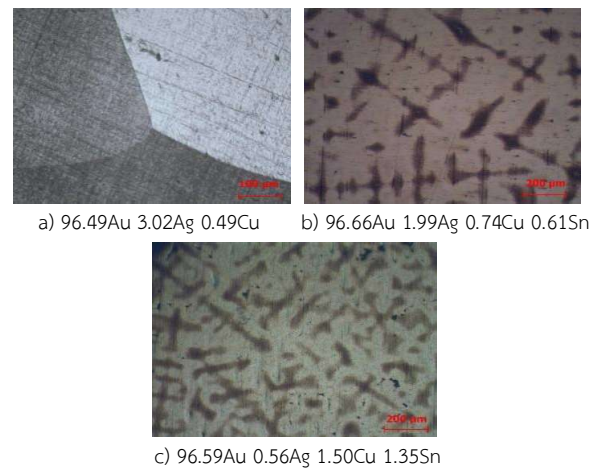
จากการสุ่มตรวจสอบความสมบูรณ์ของแนวเชื่อมประสานของชิ้นทดสอบ พบว่า แนวเชื่อมประสานของชิ้นทดสอบมีความสมบูรณ์ทุกชิ้นทดสอบ และชิ้นทดสอบทุกกลุ่มตัวอย่างถูกนำไปดำเนินการทดสอบแรงดึงเพื่อทดสอบหาความต้านทานแรงดึงสูงสุดของแนวเชื่อมประสานของวัสดุโลหะประสานทองคำ 965 ที่มีอัตราส่วนผสมต่างกัน ผลจากการวิเคราะห์ทดสอบ พบว่า ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของแนวเชื่อมประสานของวัสดุโลหะประสานทองคำ 965 ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ มีความแตกต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุเจือชนิดต่างๆ ที่เป็นส่วนผสมหรือองค์ประกอบทางเคมี โดยปริมาณของทองแดงและดีบุกที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของแนวเชื่อมประสานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังผลการทดสอบที่แสดงในตารางที่ 3 และกราฟเปรียบเทียบที่แสดงในรูปที่ 6 โดยชิ้นทดสอบที่อัตราส่วนผสม 96.57Au 1.02Ag 1.22Cu 1.19Sn มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของแนวเชื่อมประสานสูงสุดเท่ากับ 370.49 MPa แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อมีการเติมธาตุเจือดีบุกเพิ่มสูงขึ้นมากกว่า 1.19 wt.% (96.59Au 0.56Ag 1.50Cu 1.35Sn) กลับทำให้แนวเชื่อมประสานมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดลดลงอย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของวัสดุโลหะประสานทองคำ 965 ดังแสดงในรูปที่ 7 โดยวัสดุโลหะประสานทองคำ 965 ที่ไม่มีการผสมธาตุเจือดีบุก (96.49Au 3.02Ag 0.49Cu) จะมีโครงสร้างจุลภาคดังแสดงในรูปที่ 7 a) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าธาตุเจือเงินและธาตุเจือทองแดงสามารถละลายรวมตัวเข้ากับทองคำเป็นเนื้อเดียวกันในลักษณะของสารละลายของแข็ง แต่ในขณะที่เมื่อมีการเติมธาตุเจือดีบุกส่งผลทำให้โครงสร้างจุลภาคของวัสดุโลหะประสานทองคำ 965 มีลักษณะเป็นโครงสร้างเดนไดรต์ (Dendrite structure) และมีปริมาณโครงสร้างเดนไดรต์เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณธาตุเจือดีบุกเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 7 b)–c) นอกจากนี้ปริมาณธาตุเจือดีบุกที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลทำให้ค่าความแข็งแรงของวัสดุโลหะประสานทองคำ 965 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง [5] แต่ขณะเดียวกัน ก็ส่งผลทำให้วัสดุโลหะประสานทองคำ 965 มีความเปราะเพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งการเติมธาตุเจือดีบุกในวัสดุโลหะประสานทองคำ 965 มากกว่า 1.19 wt.% ทำให้โครงสร้างเดนไดรต์มีปริมาณเพิ่มขึ้นและวัสดุโลหะประสานทองคำ 965 มีความเปราะเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมประสานเริ่มมีแนวโน้มลดลง

ตารางที่ 3 ผลวิเคราะห์ทดสอบความต้านทานแรงดึงสูงสุดของแนวเชื่อม  
ประสานของโลหะประสานทองคำ 965

ชิ้น ทดสอบ	ส่วนผสมทางเคมี (wt.%)	ความต้านทานแรงดึง สูงสุด (MPa)	
		Average	SD
1	96.51Au 3.49Ag	265.60	5.33
2	96.49Au 3.02Ag 0.49Cu	290.71	3.41
3	96.61Au 2.97Ag 0.27Cu 0.15Sn	314.42	5.09
4	96.67Au 2.50Ag 0.49Cu 0.34Sn	330.99	2.95
5	96.66Au 1.99Ag 0.74Cu 0.61Sn	330.69	4.08
6	96.58Au 1.54Ag 1.19Cu 0.69Sn	355.29	6.52
7	96.57Au 1.02Ag 1.22Cu 1.19Sn	370.49	1.04
8	96.59Au 0.56Ag 1.50Cu 1.35Sn	337.17	9.64



รูปที่ 6 ความต้านทานแรงดึงสูงสุดของแนวเชื่อมประสานของโลหะประสาน  
ทองคำ 965 ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ



รูปที่ 7 ตัวอย่างโครงสร้างจุลภาคของวัสดุโลหะประสานทองคำ 965 [5]

จากการวิเคราะห์ผลของธาตุเจือต่างๆ (เงิน ทองแดง และดีบุก) ที่มีต่อความแข็งแรงในแนวเชื่อมประสานของวัสดุโลหะประสานทองคำ 965 ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ จากรูปที่ 6 นั้น ไม่สามารถบอกให้ทราบถึงผลของธาตุเจือต่างๆ ที่มีต่อแนวโน้มค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดที่เกิดขึ้นอย่างชัดเจนได้ ดังนั้นจึงใช้วิธีการวิเคราะห์ความเข้มข้นของธาตุเจือต่างๆ [6] ในวัสดุโลหะประสานทองคำ 965 เพื่อเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด ซึ่งค่าความเข้มข้นของธาตุเจือเงิน ( $Ag'$ ), ธาตุเจือทองแดง ( $Cu'$ ) และธาตุเจือดีบุก ( $Sn'$ ) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (1) – (3) โดยค่าความเข้มข้น  $Ag'$ ,  $Cu'$  และ  $Sn'$  ที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของแนวเชื่อมประสานของชิ้นทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 4

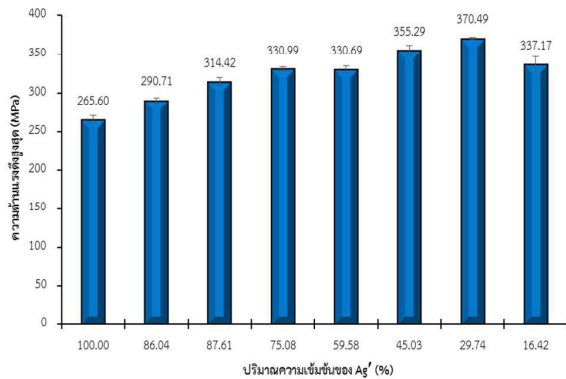
$$Ag' = \frac{Ag(wt\%) \times 100\%}{Ag(wt\%) + Cu(wt\%) + Sn(wt\%)} \quad (1)$$

$$Cu' = \frac{Cu(wt\%) \times 100\%}{Ag(wt\%) + Cu(wt\%) + Sn(wt\%)} \quad (2)$$

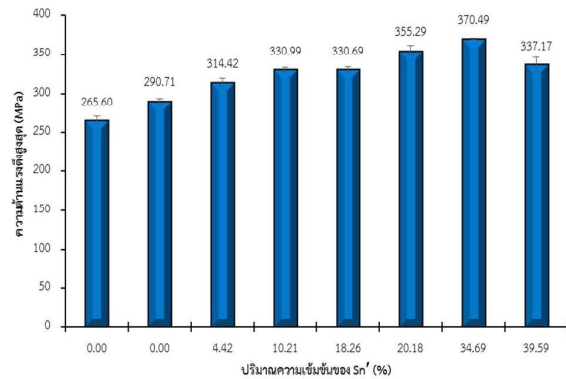
$$Sn' = \frac{Sn(wt\%) \times 100\%}{Ag(wt\%) + Cu(wt\%) + Sn(wt\%)} \quad (3)$$

ตารางที่ 4 ค่าความเข้มข้นของธาตุเงิน ( $Ag'$ ) ทองแดง ( $Cu'$ ) และดีบุก ( $Sn'$ ) ในโลหะประสานทองคำ 965 ที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของแนวเชื่อมประสาน

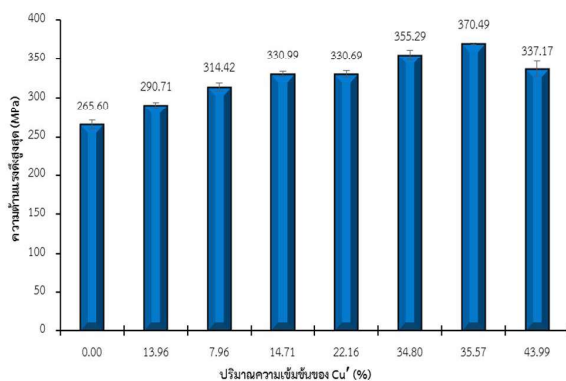
ชั้นทดสอบ	ส่วนผสมทางเคมี (wt.%)	อัตราการผสม (wt.%)				ค่าความเข้มข้นของธาตุเงินชนิดต่างๆ ในชั้นทดสอบโลหะประสานทองคำ 965 (%)			ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (MPa)
		Au	Ag	Cu	Sn	$Ag'$	$Cu'$	$Sn'$	
1	96.51Au 3.49Ag	96.51	3.49			100.00			265.60
2	96.49Au 3.02Ag 0.49Cu	96.49	3.02	0.49		86.04	13.96		290.71
3	96.61Au 2.97Ag 0.27Cu 0.15Sn	96.61	2.97	0.27	0.15	87.61	7.96	4.42	314.42
4	96.67Au 2.50Ag 0.49Cu 0.34Sn	96.67	2.50	0.49	0.34	75.08	14.71	10.21	330.99
5	96.66Au 1.99Ag 0.74Cu 0.61Sn	96.66	1.99	0.74	0.61	59.58	22.16	18.26	330.69
6	96.58Au 1.54Ag 1.19Cu 0.69Sn	96.58	1.54	1.19	0.69	45.03	34.80	20.18	355.29
7	96.57Au 1.02Ag 1.22Cu 1.19Sn	96.57	1.02	1.22	1.19	29.74	35.57	34.69	370.49
8	96.59Au 0.56Ag 1.50Cu 1.35Sn	96.59	0.56	1.50	1.35	16.42	43.99	39.59	337.17



รูปที่ 8 อิทธิพลค่าความเข้มข้นของธาตุเงิน ( $Ag'$ ) ที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดในแนวเชื่อมประสานของโลหะประสานทองคำ 965 ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ



รูปที่ 10 อิทธิพลค่าความเข้มข้นของธาตุเงิน ( $Sn'$ ) ที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดในแนวเชื่อมประสานของโลหะประสานทองคำ 965 ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ



รูปที่ 9 อิทธิพลค่าความเข้มข้นของธาตุเงิน ( $Cu'$ ) ที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดในแนวเชื่อมประสานของโลหะประสานทองคำ 965 ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

จากการวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของธาตุเงิน ( $Ag'$ ) ทองแดง ( $Cu'$ ) และดีบุก ( $Sn'$ ) ในโลหะประสานทองคำ 965 ที่มีต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อมประสาน ดังแสดงในตารางที่ 4 และในรูปที่ 8-10 พบว่า ธาตุเงินทองแดงมีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของแนวเชื่อมประสาน ซึ่งมีเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบชั้นทดสอบที่ไม่มีส่วนผสมของธาตุเงินทองแดง (96.51Au 3.49Ag) กับชั้นทดสอบที่มีธาตุเงินทองแดงผสม (96.49Au 3.02Ag 0.49Cu) พบว่า ชั้นทดสอบมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของแนวเชื่อมประสานจากเดิม 265.60 MPa เพิ่มขึ้นเป็น 290.71 MPa เมื่อมีการเติมธาตุเงินทองแดง ซึ่งปริมาณธาตุเงินทองแดงที่เพิ่มขึ้น สามารถทดแทนธาตุเงินที่ลดลงได้ โดยปริมาณ  $Cu'$  ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของแนวเชื่อมประสานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาผลของธาตุดีบุกที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของแนวเชื่อมประสาน พบว่า ธาตุดีบุกมีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด ซึ่งเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบชั้นทดสอบที่ไม่มีส่วนผสมของธาตุดีบุก (96.49Au 3.02Ag 0.49Cu) กับชั้นทดสอบที่มีส่วนผสมของธาตุดีบุก (96.61Au 2.97Ag 0.27Cu 0.15Sn) พบว่า ชั้นทดสอบมีค่าความต้านทาน



แรงดึงสูงสุดของแนวเชื่อมประสานจากเดิม 290.71 MPa เพิ่มขึ้นเป็น 314.42 MPa เมื่อมีการเติมธาตุเจือตีบุก ซึ่งปริมาณธาตุเจือตีบุกที่เพิ่มขึ้นสามารถทดแทนธาตุเจือเงินและทองแดงที่ลดลงได้ ซึ่งปริมาณ Sn' ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของแนวเชื่อมประสานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

#### 4. สรุปผลการวิจัย

จากผลการดำเนินการวิจัยศึกษาผลของธาตุเจือเงิน ทองแดง และตีบุกในโลหะประสานทองคำ 965 สำหรับอุตสาหกรรมเครื่องประดับ ที่มีต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อมประสานทอง สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นทดสอบด้วยเทคนิค x-ray fluorescence พบว่า ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นทดสอบมีค่าแตกต่างจากปริมาณการผสมที่กำหนดเล็กน้อย เนื่องจากการกระจายตัวของธาตุต่างๆ ไม่สม่ำเสมอ และเนื้อโลหะอาจมีออกไซด์ผสมอยู่ และถูกแยกออกจากน้ำโลหะด้วยผงบอริก (Boric acid powder) ซึ่งทำหน้าที่ฟลักซ์ (Flux) กลายเป็นขี้ตะกั่ว (Slag) ซึ่งจะลอยอยู่บนผิวหน้าของน้ำโลหะและแยกตัวจากน้ำโลหะ

การวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของธาตุเจือเงิน (Ag') ทองแดง (Cu') และตีบุก (Sn') ในโลหะประสานทองคำ 965 ที่มีต่อความแข็งแรงของแนวเชื่อมประสาน พบว่า ธาตุเจือทองแดงและตีบุกมีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของแนวเชื่อมประสาน ซึ่งปริมาณธาตุเจือทองแดงและตีบุกที่เพิ่มขึ้น สามารถทดแทนธาตุเจือเงินที่ลดลงได้ โดยปริมาณ Cu' และ Sn' ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของแนวเชื่อมประสานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยชิ้นทดสอบที่อัตราส่วนผสม 96.57Au 1.02Ag 1.22Cu 1.19Sn มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของแนวเชื่อมประสานเท่ากับ 370.49 MPa แต่อย่างไรก็ตาม ไม่ควรเติมธาตุเจือตีบุกในวัสดุโลหะประสานทองคำ 965 เกินกว่า 1.19 wt.% เนื่องจากจะทำให้โครงสร้างเดนไดรต์ที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นและวัสดุโลหะประสานทองคำ 965 มีความเปราะเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงของแนวเชื่อมประสานเริ่มมีแนวโน้มลดลง

นอกจากนี้ การเติมธาตุเจือทองแดงและตีบุก เพื่อทดแทนธาตุเจือเงินในวัสดุโลหะประสานทองคำ 965 ซึ่งส่งผลทำให้แนวเชื่อมประสานมีความ

แข็งแรงเพิ่มขึ้นแล้ว ยังสามารถลดต้นทุนวัตถุดิบในการผลิตวัสดุโลหะประสานทองคำ 965 ได้อีกด้วย

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจาก สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ประจำปีงบประมาณ 2560

#### เอกสารอ้างอิง

- มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 303-2548 ทองรูปพรรณ (GOLD ORNAMENTS), สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม
- สุรัตน์ วรรณศรี และคณะ โครงการวิจัย “การศึกษาอิทธิพลของธาตุเจือทองแดง และทองแดง-อินเดียมต่อระดับสีทองคำ 965” สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.), 2550
- เศรษฐวิทย์ แสงทิพย์ และคณะ โครงการวิจัย “การศึกษาวิเคราะห์อิทธิพลของธาตุเจือเงิน ทองแดงและตีบุก ที่มีผลต่อจุดหลอมละลายและสมบัติการเปื่อยของโลหะประสานทองคำเจือ 965 สำหรับอุตสาหกรรมเครื่องประดับ” สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.), 2560
- ณรงค์ฤทธิ์ สนใจธรรม และคณะ “ผลของธาตุเจือเงิน ทองแดงและตีบุก ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพของโลหะประสานทองคำ 965 สำหรับอุตสาหกรรมเครื่องประดับ” การประชุมวิชาการย้ายงานวิศวกรรมอุตสาหการ ประจำปี พ.ศ. 2562, 21-24 กรกฎาคม 2562 กรุงเทพมหานคร หน้า 537-542
- นพนัช พวงมาลี และคณะ โครงการวิจัย “การศึกษาวิเคราะห์อิทธิพลของธาตุเจือเงิน ทองแดงและตีบุก ที่มีผลต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของโลหะประสานทองคำ 965 สำหรับอุตสาหกรรมเครื่องประดับ” สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.), 2560
- Pearson W.S. The Metallurgy of The Carat Gold Alloys. Gold Technology, Issue No. 4, World Gold Council, 1991, 2-25