



การผลิตอัลลอยธาตุเชิงพาณิชย์ในระดับโรงงาน  
COMMERCIAL NIELLO ALLOYS AS A FACTORY SCALE



กันตินันท์ ภูพานใบ

การผลิตอัลลอยยาถมเชิงพาณิชย์ในระดับโรงงาน



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการอุตสาหกรรมและนวัตกรรม  
วิทยาลัยอุตสาหกรรมสร้างสรรค์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ  
ปีการศึกษา 2565  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

COMMERCIAL NIELLO ALLOYS AS A FACTORY SCALE



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of MASTER OF SCIENCE  
(Innovation and Industrial Management)  
College of Creative Industry, Srinakharinwirot University

2022

Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญาบัตร

เรื่อง

การผลิตอัลลอยยาถมเชิงพาณิชย์ในระดับโรงงาน

ของ

กัณฑ์นันท์ ภูพานใบ

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการอุตสาหกรรมและนวัตกรรม  
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

(รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญาบัตร

ที่ปรึกษาหลัก

ประธาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ขจีพร วงศ์ปรีดี)

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรัตน์ วรรณศิริ)

ที่ปรึกษาร่วม

กรรมการ

(อาจารย์ ดร.เสวต อินทศิริ)

(รองศาสตราจารย์ ดร.ณัด จินตโกศล)

ชื่อเรื่อง	การผลิตอัลลอยยามเชิงพาณิชย์ในระดับโรงงาน
ผู้วิจัย	กันตินันท์ ภูพานใบ
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
ปีการศึกษา	2565
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ขจีพร วงศ์ปรีดี
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ ดร. เสวต อินทศิริ

การคิดค้นยามดําปราศจากตะกั่วได้ถูกผลิตขึ้นมาเพื่อความปลอดภัยของผู้ใช้งานและสามารถส่งออกไปยังต่างประเทศได้ จึงจำเป็นต้องมีการสร้างเครื่องมือที่ได้มาตรฐานเพื่อรองรับการผลิตในปริมาณมาก ซึ่งงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อพัฒนาการผลิตแท่งยามดําปราศจากตะกั่วเพื่อใช้เชิงพาณิชย์ และสร้างมาตรฐานการผลิตด้วยการวิเคราะห์ปัจจัยการเย็นตัวที่ส่งผลต่อคุณภาพของแท่งยามดําปราศจากตะกั่ว โดยทางผู้วิจัยได้ทำการแบ่งกลุ่มของวัสดุเป็น 3 ชนิด จากนั้นได้ทำการออกแบบการหลอมโลหะ แบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ การหลอมโดยใช้หัวเป่าไฟ (Torch Melting) และการหลอมใช้เตาอินดักชั่น (Induction Melting Furnace) ซึ่งได้มีการเปรียบเทียบอุณหภูมิวัดโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) กับ เครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด (Infrared Thermometer) พบว่าค่าจากอินฟราเรดเทอร์มิเตอร์ (Infrared Thermometer) มีความน่าเชื่อถือมากกว่าโดยเปรียบเทียบกับจุดหลอมเหลวของธาตุเงินและธาตุดีบุก และได้มีการสร้างมาตรฐานการผลิตของ 4 การทดลอง จากผลการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพด้วยเครื่องมือวัดสี (Colorimeter) โดยใช้ระบบ CIE-Lab พบค่าผลสีดําใกล้เคียงกับชิ้นงานเงินที่ลงถมด้วยแท่งยามมีสารตะกั่วมากที่สุดที่ คือ  $L^* = 60.53$  (ค่าแสดงสีดําและสีขาว) การวัดค่าความเงาของชิ้นงานลงถมโดยใช้เครื่องวัดความเงา (Gloss meter) ได้เท่ากับ 231 GU และการตรวจสอบรูพรุนหรือตามด (Porosity) ที่เกิดในชิ้นงานโดยทำการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัล (Digital Microscope) หลังจากนั้นนำมาทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ และการถ่ายภาพเสมือนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) ใช้ร่วมกันกับเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบที่สัมพันธ์กับโครงสร้างจุลภาคพบการกระจายของเฟส Sn-rich จากนั้นนำผลการประเมินความพึงพอใจพบว่าผลจากผู้เชี่ยวชาญประเมินให้สูตรที่แสดงไว้ในสิทธิบัตรเลขที่ค่าขอ 1101001747 กับกระบวนการทวนและบ่มที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 150 °C มีความพึงพอใจสูงสุด เท่ากับ  $3.72 \pm 0.17$  คะแนน ซึ่งนำมาเป็นสูตรสำเร็จสำหรับการใช้งานเชิงพาณิชย์

คำสำคัญ : ยามดําปราศจากตะกั่ว, หัวเป่าไฟ, เตาอินดักชั่น, การเปรียบเทียบอุณหภูมิ

Title	COMMERCIAL NIELLO ALLOYS AS A FACTORY SCALE
Author	KANTINAN PHUPANBAI
Degree	MASTER OF SCIENCE
Academic Year	2022
Thesis Advisor	Assistant Professor Kageeporn Wongpreedee , Ph.D.
Co Advisor	Saweat Intarasiri , Ph.D.

The invention of lead-free black niello was produced for the safety of users and could be exported abroad. Therefore, it is necessary to create a standardized tool to support mass production. The purpose of this research is to develop the production of Niello lead-free ingots for commercial use. The establishment of production standards by analyzing the cooling factors that affect the quality of Niello lead-free rods. The researchers divided the raw materials into three types and then designed the melting metal. It can be divided into two types: torch melting and induction furnace. The induction melting furnace, which compared the temperature measured using a thermocouple with an infrared thermometer, showed that the infrared thermometer was more reliable compared to the melting point of silver and tin. It is found that the black result is close to the silver products filled with Niello with lead rods, which is  $L^* = 60.53$  (black and white display values). Gloss meter is based on the industrial standard measurement principle measured the gloss of the workpiece to be 231 GU Use a digital microscope to check the porosity of the work piece, and then use the ImageJ program for analysis and Scanning Electron Microscope to analyze the constituents related to the microstructure. The Sn-rich phase distribution was found. After that, the results of the satisfaction assessment were found that the results of the experts evaluated the formula shown in the patent application number 1101001747. With the production process, stirring and curing process at a mold temperature of 150 °C has the highest satisfaction equal to  $3.72 \pm 0.17$  points. Which brings a successful formula for commercial use.

Keyword : Niello lead-free, Torch melting, Induction melting furnace, Temperature comparison

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร.ขจีพร วงศ์ปรีดี อาจารย์ที่ปรึกษา และ ดร.เสวต อินทศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ซึ่งให้คำปรึกษา คำแนะนำ และเสนอแนวคิดที่เป็นประโยชน์อย่างมากต่อการวิจัย รวมทั้งให้ความช่วยเหลือในการ ตรวจสอบ และแก้ไขฉบับปรับปรุงปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่งต่ออาจารย์ทั้งสองท่าน

ขอขอบคุณ โครงการแพลตฟอร์มการศึกษาครบวงจรเพื่อการพัฒนาการศึกษาปริญญาโท และการวิจัยพัฒนานวัตกรรมของภาคอุตสาหกรรม (Triple helix master degree integrated platform for research, development and innovation in industry) ซึ่งได้รับ การสนับสนุนงบประมาณจากสำนักงานสภานโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ (สอวช.) โดยโครงการสนับสนุนการพัฒนาเทคโนโลยีของอุตสาหกรรมไทย (ITAP) และคุณชาตรี วัจฉลฉญาณ กรรมการผู้จัดการบริษัท สยาม วอเตอร์ เฟลม จำกัด

กันตินันท์ ภูพานใบ

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ .....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย .....	2
1.4 นิยามศัพท์เฉพาะ.....	2
1.5 กรอบแนวคิดในการวิจัย.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 กระบวนการผลิตเครื่องถมดำแบบดั้งเดิม .....	7
2.2 การศึกษาองค์ประกอบและคุณสมบัติของยาถมแบบดั้งเดิม .....	10
2.3 การพัฒนาของยาถมดำปราศจากตะกั่ว .....	12
2.4 คุณสมบัติของแร่ที่ทำให้เกิดสี .....	14
2.5 การพัฒนาอัลลอยดีบุกสำหรับงานเชื่อมประสาน .....	15
2.6 หลักการทำงานและประเภทของเตาที่ใช้ในอุตสาหกรรม .....	21
2.8 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	26



บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย .....	46
3.1 วิธีการทำแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่วด้วยกระบวนการหลอมมือโดยใช้หัวเป่าไฟ (Torch Melting) และศึกษาลักษณะหน้าตัดแท่งยาถม .....	49
3.2 วิธีการทำแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่วด้วยกระบวนการหลอมด้วยเตาหลอมเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Induction Melting Furnace).....	54
3.3 ทำการวัดอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) โดยทำการเปรียบเทียบกับอินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์ (Infrared Thermometer).....	58
3.4 การนำแท่งยาถมที่ทำการผลิตนำไปทดสอบให้ช่างลงถมทำการทดสอบ .....	60
3.5 การนำชิ้นงานเงินที่ทำการให้ช่างลงถมนำมาใช้ทดสอบด้วยกระบวนการทางวิทยาศาสตร์เพื่อนำมาหาคุณภาพของแท่งยาถม .....	61
3.6 วิธีการเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบคุณสมบัติของแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่วด้วยเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ขั้นสูง.....	64
บทที่ 4 การนำเสนอผลข้อมูลและการวิเคราะห์ผล .....	67
4.1 การหลอมแท่งยาถมด้วยกระบวนการใช้หัวเป่าไฟ .....	67
4.2 การหลอมแท่งยาถมดำด้วยกระบวนการเตาอินดักชั่น (Induction Melting Furnace) ....	68
4.3 การทำแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่วโดยใช้เตาหลอมอินดักชั่นโดยทำการกำหนดเวลาในการผลิตแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่ว .....	69
4.4 การวัดอุณหภูมิของเตาอินดักชั่นที่วัดด้วยเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) เปรียบเทียบกับอินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์ (Infrared Thermometer).....	75
4.5 ผลของการตรวจสอบชิ้นงานเงินหลังจากการลงถม .....	77
4.6 ระดับความพึงพอใจของช่างลงถมที่ทำการลงถมด้วยแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่ว .....	81
4.7 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมี .....	85
4.8 วิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray Diffraction) .....	91
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	96
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	96

5.2 ข้อเสนอแนะ.....	98
บรรณานุกรม.....	100
ประวัติผู้เขียน.....	103



## สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1 แสดงสูตรทางเคมี ระบบผลึก สี สีผง และชื่อแร่ของธาตุที่มีกำมะถันเป็นส่วนประกอบ . 15	
ตาราง 2 แสดงโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของอัลลอยเชื่อมประสานกับพื้นชั้นงานที่ทำจากเงิน และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอัลลอยเชื่อมประสาน Sn-4Ag, Sn-3Cu และ Sn-37Pb ทำการบ่มแข็งที่ 260 °C ที่เวลาต่างๆกัน..... 20	
ตาราง 3 แสดงส่วนผสมของแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่ว ..... 49	
ตาราง 4 แสดงเงื่อนไขการทดลองทำแท่งยาถมหลอมโดยใช้เตาอินดักชั่น ..... 57	
ตาราง 5 เปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิของการตรวจวัดด้วยเครื่องอินฟราเรดเทอร์มิสเตอร์และเทอร์โมคัปเปิลเทียบกับจุดหลอมเหลวของธาตุเงินและธาตุดีบุก ..... 76	
ตาราง 6 แสดงรูปถ่ายชิ้นงานตัวอย่างพร้อมกับร้อยละปริมาณรูพูนของชิ้นงาน ..... 78	

## สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพประกอบ 1 แผนผังแสดงกระบวนการผลิตแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่วและระบบการผลิตโรงงาน .....	3
ภาพประกอบ 2 แผนผังแสดงวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพของแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่ว	4
ภาพประกอบ 3 แผนผังแสดงแนวทางการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่ใช้โรงงานเป็นต้นแบบการผลิต .....	5
ภาพประกอบ 4 แท่งยาถมดำ .....	8
ภาพประกอบ 5 ประเภทเครื่องถลุงทั้ง 3 ชนิด ก)เครื่องถลุงทอง, ข)เครื่องถลุงตะทอง, ค)เครื่องถลุงดำ .....	8
ภาพประกอบ 6 ขั้นตอนการผลิตยาถมแบบดั้งเดิม .....	9
ภาพประกอบ 7 แสดงโครงสร้างจุลภาคของแท่งยาถมด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดสะท้อนแสงและกล้องจุลทรรศน์ชนิดสะท้อนแสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด .....	11
ภาพประกอบ 8 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่วด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสะท้อนแสง และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด .....	13
ภาพประกอบ 9 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดสะท้อนแสงกำลังขยาย 50 เท่าแสดงโครงสร้างจุลภาคของอัลลอยทองเหลืองสองชนิดที่ลงถมดำปราศจากตะกั่ว.....	14
ภาพประกอบ 10 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงโครงสร้างจุลภาคของอัลลอยเชื่อมประสาน Sn-3.5Ag, Sn-3.5Ag-0.7Cu, Sn-3.5Ag-1.7Cu และ Sn-0.5Ag-4Cu .....	16
ภาพประกอบ 11 ก) กราฟแสดงความขรุขระของชั้นรอยต่อของอัลลอยเชื่อมประสาน Sn-3.5Ag, Sn-3.5Ag-0.7Cu, Sn-3.5Ag-1.7Cu และ Sn-0.5Ag-4Cu, ข) กราฟแสดงความหนาของชั้นรอยต่อของอัลลอยเชื่อมประสาน Sn-3.5Ag, Sn-3.5Ag-0.7Cu, Sn-3.5Ag-1.7Cu และ Sn-0.5Ag-4Cu .....	17
ภาพประกอบ 12 กราฟแท่งแสดงสมบัติเชิงกลของอัลลอยเชื่อมประสานที่มีปริมาณเงินแตกต่างกัน .....	18

ภาพประกอบ 13 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงโครงสร้างจุลภาคของ Sn-3.5Ag-0.7Cu ที่เติมบิสมัทส่งผลต่อการเจริญเติบโตของชั้นอินเทอร์เมทัลลิก .....	19
ภาพประกอบ 14 เตาเหนี่ยวนำแบบไม่มีแกน (Coreless type) (ข) เตาเหนี่ยวนำแบบช่อง (Induction Furnace) .....	22
ภาพประกอบ 15 เตาอาร์คไฟฟ้าทางตรง.....	23
ภาพประกอบ 16 การระบายอากาศแบบทำให้เจือจาง.....	25
ภาพประกอบ 17 การระบายอากาศแบบเฉพาะที่.....	26
ภาพประกอบ 18 กล้องจุลทรรศน์ (Microscope).....	28
ภาพประกอบ 19 แสดงการเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอะตอมตัวอย่าง.....	31
ภาพประกอบ 20 แสดงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	31
ภาพประกอบ 21 แสดงส่วนประกอบและการทำงานของเครื่อง SEM.....	32
ภาพประกอบ 22 แสดงหลักการทำงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด .....	32
ภาพประกอบ 23 การเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่ระดับพลังงานของชั้นโคจรต่างๆ.....	34
ภาพประกอบ 24 แสดงลักษณะการวิเคราะห์ด้วยวิธี X-ray Mapping .....	35
ภาพประกอบ 25 แสดงส่วนประกอบและหลักการทำงานเบื้องต้นของ SEM.....	37
ภาพประกอบ 26 หลักการของ Bragg's law ในการคำนวณค่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ .....	39
ภาพประกอบ 27 การกำเนิดรังสีเอกซ์.....	40
ภาพประกอบ 28 ระบบสี Munsell.....	41
ภาพประกอบ 29 ระบบสี CIE-Lab.....	42
ภาพประกอบ 30 หน้าต่างโปรแกรม ImageJ .....	43
ภาพประกอบ 31 แสดงภาพที่วิเคราะห์จากโปรแกรม ImageJ.....	44
ภาพประกอบ 32 เครื่องวัดค่าความเงา (Gloss meter) .....	44
ภาพประกอบ 33 แผ่นผังแสดงขั้นตอนการทำงาน .....	48
ภาพประกอบ 34 แสดงลักษณะของดีบุกแห้ง .....	49

ภาพประกอบ 35 แสดงลักษณะของเม็ดเงิน .....	50
ภาพประกอบ 36 แสดงลักษณะของเม็ดทองแดง .....	50
ภาพประกอบ 37 แสดงลักษณะของผงกำมะถัน .....	51
ภาพประกอบ 38 แสดงลักษณะของแท่งกราไฟต์ .....	51
ภาพประกอบ 39 แสดงลักษณะของเป้ากระดาษ .....	52
ภาพประกอบ 40 แสดงลักษณะของหัวเป่าไฟ .....	52
ภาพประกอบ 41 แสดงลักษณะของรางเทเหล็ก .....	53
ภาพประกอบ 42 แสดงขั้นตอนการหลอมแท่งยาถมดำด้วยกระบวนการหลอมมือ .....	53
ภาพประกอบ 43 แสดงลักษณะของเตาอินดักชั่น .....	54
ภาพประกอบ 44 แสดงลักษณะของเป้ากราไฟต์ .....	54
ภาพประกอบ 45 แสดงลักษณะของเป้าเซรามิค .....	55
ภาพประกอบ 46 แสดงลักษณะแม่พิมพ์ขนาด 5 mm .....	55
ภาพประกอบ 47 แสดงลักษณะของฝาปิดเซรามิคของเตาอินดักชั่น .....	56
ภาพประกอบ 48 ขั้นตอนการหลอมแท่งยาถมด้วยการใช้เตาอินดักชั่น .....	57
ภาพประกอบ 49 แสดงลักษณะของอินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์ .....	59
ภาพประกอบ 50 การติดตั้งการวัดอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ในการเทียบกับอินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์ (Infrared Thermometer) .....	59
ภาพประกอบ 51 ก) ลักษณะชิ้นงานเงินแบบแผ่นที่ประเทศไทย ข) ชิ้นงานเงินแบบสี่เหลี่ยม .....	60
ภาพประกอบ 52 แบบประเมินลักษณะที่ดีของแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่ว .....	61
ภาพประกอบ 53 UltraScan VIS Spectrophotometer .....	62
ภาพประกอบ 54 Color space ของสีในระบบ CIE-LAB .....	62
ภาพประกอบ 55 กล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล .....	63
ภาพประกอบ 56 โปรแกรม ImageJ .....	63

ภาพประกอบ 57 Gloss meter .....	64
ภาพประกอบ 58 เครื่อง XRD ยี่ห้อ Rigaku รุ่น SmartLab.....	65
ภาพประกอบ 59 เครื่อง SEM-EDS ยี่ห้อ BRUKER รุ่น Xflash 6160.....	66
ภาพประกอบ 60 โครงสร้างจุลภาคที่ทำการกรนด้วยแท่งกราไฟต์เมื่อเติมธาตุกำมะถันเป็นเวลา ต่างๆ ก.) 5 นาที ข) 15 นาที.....	67
ภาพประกอบ 61 โครงสร้างจุลภาคของแท่งยาถมเมื่อเติมดีบุกที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ก) ที่ อุณหภูมิ 700 °C เวลากรน 5 นาที ข) ) ที่อุณหภูมิ 750 °C เวลากรน 20 นาที ค) ) ที่อุณหภูมิ 800 °C เวลากรน 2 นาที ง) ) ที่อุณหภูมิ 800 °C เวลากรน 5 นาที .....	68
ภาพประกอบ 62 โครงสร้างจุลภาคของแท่งยาถมเมื่อเติมดีบุกที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ก) 600 °C ลักษณะเป็นทรงกลม ข) 650 °C มีลักษณะเป็นทรงกลม ค) 600 °C ลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยม ง) 650 °C ลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยม .....	69
ภาพประกอบ 63 บริเวณที่ทำการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค EDS โดยระบุ ตำแหน่งในการตรวจวัด .....	70
ภาพประกอบ 64 องค์ประกอบทางเคมีของแท่งยาถมด้วยเทคนิค EDS เมื่อเติมธาตุกำมะถันที่ อุณหภูมิ 650 °C มีลักษณะเป็นทรงกลม ก) สเปกตรัมที่บริเวณขอบของแท่งยาถม ข) สเปกตรัมที่ บริเวณกึ่งกลางของแท่งยาถม ค) สเปกตรัมที่บริเวณจุดศูนย์กลางของแท่งยาถม ง) ภาพโครงสร้าง จุลภาคของการทดลองเมื่อเติมดีบุกที่อุณหภูมิ 600 °C ลักษณะเป็นทรงกลม .....	71
ภาพประกอบ 65 องค์ประกอบทางเคมีของแท่งยาถมด้วยเทคนิค EDS เมื่อเติมธาตุกำมะถันที่ อุณหภูมิ 650 °C มีลักษณะเป็นทรงกลม ก) แสดงสเปกตรัมที่บริเวณขอบของแท่งยาถม ข) แสดง สเปกตรัมที่บริเวณกึ่งกลางของแท่งยาถม ค) แสดงสเปกตรัมที่บริเวณจุดศูนย์กลางของแท่งยาถม ง) ภาพโครงสร้างจุลภาคของการทดลองเมื่อเติมดีบุกที่อุณหภูมิ 650 °C ลักษณะเป็นทรงกลม..	72
ภาพประกอบ 66 องค์ประกอบทางเคมีของแท่งยาถมด้วยเทคนิค EDS เมื่อเติมธาตุกำมะถันที่ อุณหภูมิ 600 °C มีลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยม ก) สเปกตรัมที่บริเวณส่วนบนแท่งยาถม ข) สเปกตรัม บริเวณส่วนล่างแท่งยาถม ค) ภาพโครงสร้างจุลภาคของการทดลองเมื่อเติมดีบุกที่อุณหภูมิ 600 °C ลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยม .....	73
ภาพประกอบ 67 องค์ประกอบทางเคมีของแท่งยาถมด้วยเทคนิค EDS เมื่อเติมธาตุกำมะถันที่ อุณหภูมิ 650 °C มีลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยม ก) แสดงสเปกตรัมที่บริเวณส่วนบนแท่งยาถม ข)	

แสดงสเปกตรัมที่บริเวณส่วนล่างแห่งยาถม ค) ภาพโครงสร้างจุลภาคของการทดลองเมื่อเติมดีบุกที่อุณหภูมิ 650 °C ลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยม..... 74

ภาพประกอบ 68 แผนภูมิการเปรียบเทียบระหว่างค่า L\* กับเงื่อนไขการทดลองต่างๆ..... 77

ภาพประกอบ 69 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณร้อยละรูพรุนภายในชิ้นงาน (%Porosity) ที่ผ่านการลงถม กับเงื่อนไขการทดลองต่างๆ ..... 80

ภาพประกอบ 70 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความเงากับเงื่อนไขการทดลองต่างๆ 81

ภาพประกอบ 71 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบระหว่างระดับความพึงพอใจของช่างลงถมในด้านการไหล กับเงื่อนไขต่างๆในกระบวนการทดลอง ..... 82

ภาพประกอบ 72 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบระหว่างระดับความพึงพอใจของช่างลงถมในด้านการติดแน่น กับเงื่อนไขต่างๆในกระบวนการทดลอง ..... 83

ภาพประกอบ 73 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบระหว่างระดับความพึงพอใจของช่างลงถมในด้านสีของชิ้นงานกับเงื่อนไขต่างๆในกระบวนการทดลอง..... 84

ภาพประกอบ 74 โครงสร้างจุลภาคของแห่งยาถมถมโดยการทดลองแบบต่างๆ ก) หัวเป่าไฟ (Torch Melting) ข) การทดลองกวนอย่างเดี่ยวอุณหภูมิแม่พิมพ์ 100 °C ค) การทดลองกวนอย่างเดี่ยวอุณหภูมิแม่พิมพ์ 150 °C ง) การทดลองกวนและบ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์ 150 °C จ) การทดลองกวนและบ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์ 150 °C ..... 86

ภาพประกอบ 75 วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคแบบ Mapping Analysis การทดลองแบบ Torch Melting ..... 87

ภาพประกอบ 76 วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคแบบ Mapping Analysis การทดลองแบบกวนอย่างเดี่ยวที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 100 °C ..... 87

ภาพประกอบ 77 วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคแบบ Mapping Analysis การทดลองแบบกวนอย่างเดี่ยวที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 150 °C ..... 88

ภาพประกอบ 78 วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคแบบ Mapping Analysis การทดลองแบบกวนและบ่มที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 100 °C..... 88

ภาพประกอบ 79 วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคแบบ Mapping Analysis การทดลองแบบกวนและบ่มที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 150 °C..... 89



ภาพประกอบ 80 โครงสร้างจุลภาคของแท่งยาถบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่  
กำลังขยาย 400x และกำลังขยาย 6000x ก) การทดลองกวนอย่างเดี่ยวที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 100°C  
ข) การทดลองกวนอย่างเดี่ยวที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 150°C ค) การทดลองกวนและบ่มที่อุณหภูมิ  
แม่พิมพ์ 100 °C ง) การทดลองกวนและบ่มที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 150 °C ..... 90

ภาพประกอบ 81 XRD ของแท่งยาถบที่เตรียมโดยการกวนและบ่มที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 100 °C และ  
เปรียบเทียบส่วนบน ส่วนกลาง และส่วนล่างของแท่งยาถบ ..... 92

ภาพประกอบ 82 XRD ของแท่งยาถบที่เตรียมโดยการกวนและบ่มที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 150 °C และ  
เปรียบเทียบส่วนบน ส่วนกลาง และส่วนล่างของแท่งยาถบ ..... 93

ภาพประกอบ 83 การเปรียบเทียบโครงสร้างทางผลึกศาสตร์ของการทำการทดลองซ้ำ ..... 94



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

เป็นที่รู้กันดีว่าเครื่องยาถมไทยนั้น เป็นศิลปะโบราณดั้งเดิม ที่เป็นหัตถกรรมพื้นเมืองของไทยเป็นที่สนใจในตลาดทั้งในและต่างประเทศ ถ้าสามารถส่งออกได้จะสามารถขยายการรับรู้ทางวัฒนธรรมของชาติที่เชื่อมโยงกับวงการธุรกิจจิวเวลรี่ไทยได้เป็นอย่างมาก แต่เนื่องจากยาถมประกอบด้วย ตะกั่ว ทองแดง เงิน และกำมะถัน เนื่องจากมีมลพิษในกระบวนการผลิต ส่งผลต่อสุขภาพโดยจะไปสะสมในร่างกาย ถ้ารับเข้าไปในปริมาณที่มากอาจทำให้ถึงขั้นเสียชีวิตได้ จึงได้มีการคิดค้นสูตรใหม่ในปี พ.ศ.2554 ชจีพร วงศ์ปรีดี และคณะได้คิดค้นยาถมดำปราศจากตะกั่วขึ้นโดยนำดีบุกมาทดแทนตะกั่ว และได้จดสิทธิบัตรในนามมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เลขที่คำขอ 1101001747 ต่อมาได้มีการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่วเปรียบเทียบกับความแข็ง ความคงทน ทั้งนี้เพื่อให้ได้มาตรฐาน และเหมาะแก่การนำมาทำเครื่องประดับที่สามารถส่งออกได้จริง

ปัจจุบันกระบวนการผลิตแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่ว นั้น ยังทำมาจากกระบวนการหลอมมือทำให้คุณภาพของแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่วไม่เป็นมาตรฐานเดียวกัน ซึ่งส่งผลต่อการขยายตลาดในเรื่องของการรับรองคุณภาพที่ไม่ให้ปัญหาต่างๆ ตามมา เช่น การยึดเกาะติดของชิ้นงาน ปริมาณรูพรุนบนเนื้อยาถม เป็นต้น ปัญหาหลายๆอย่างที่กล่าวมาข้างต้นนั้น ทำให้ส่งผลต่อชิ้นงานของเครื่องถมไทย และที่สำคัญ คือ ขั้นตอนการผลิตนั้นยังมีการใส่กำมะถันซึ่งเป็นควันทoxicต่อผู้ที่ทำการผลิตเองที่ต้องสูดดมเข้าไป

ด้วยเหตุดังกล่าวทางวิทยาลัยอุตสาหกรรมสร้างสรรค์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ มีแนวความคิดที่จะร่วมกับบริษัท สยาม วอเตอร์ เฟลม จำกัด โดยทางบริษัท สยาม วอเตอร์ เฟลม จำกัด ได้ทำข้อตกลงความร่วมมือในการนำสูตรยาถมนี้เพื่อไปทดลองในโรงงาน สามารถใช้กระบวนการทำงานเพื่อนำไปทดสอบการผลิตให้ได้มาตรฐาน และให้เห็นคุณค่าของผลงานศิลปกรรมที่เกิดขึ้นโดยตระหนักว่าผลงานเหล่านั้นจะมีความสำคัญ เป็นสิ่งที่ทรงคุณค่าที่ควรจะรักษาไว้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อพัฒนาการผลิตแท่งถลุงดำปราศจากตะกั่ว
2. เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยการเย็นตัวที่ส่งผลต่อคุณภาพของแท่งถลุงดำปราศจากตะกั่ว
3. เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของยาถมที่ไปใช้ในเชิงพาณิชย์

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. สร้างห้องต้นแบบสำหรับผลิตแท่งถลุงดำปราศจากตะกั่วที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม
2. ศึกษาคุณสมบัติของแท่งถลุงดำปราศจากตะกั่วก่อนและหลังการใช้เครื่องต้นแบบของกระบวนการผลิตแท่งถลุงดำปราศจากตะกั่ว
3. ศึกษาปริมาณการหลอมในระดับที่แตกต่างกัน โดยการทดลองเริ่มจาก 30 กรัม และ 50 กรัม
4. ทดสอบการลงถมกับระดับชั้นเชี่ยวชาญ
5. วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของโครงสร้างผลึก โครงสร้างจุลภาค และการลงถม
6. ออกแบบการผลิตในระดับโรงงานและศึกษาประสิทธิภาพการผลิตของแท่งถลุงและวิเคราะห์สูญเสีย
7. ศึกษาการลงถมของช่างกับขนาดแท่งถลุงต่างๆ โดยใช้ช่างระดับชั้นต้น ชั้นเชี่ยวชาญ อย่างละ 3 ตัวอย่าง (การจัดทำแบบประเมิน และหลักการทางสถิติ ความพึงพอใจของลูกค้ระดับต่างๆ)
8. ศึกษาต้นทุนโดยการปรับรูปแบบการทดลองเพื่อลดการสูญเสียของการผลิต (การใช้ DOE กำหนด)
9. จัดทำการตีพิมพ์เผยแพร่ทั้งแบบวิชาการและแบบงานสร้างสรรค์
10. จัดทำรายงานการวิจัย

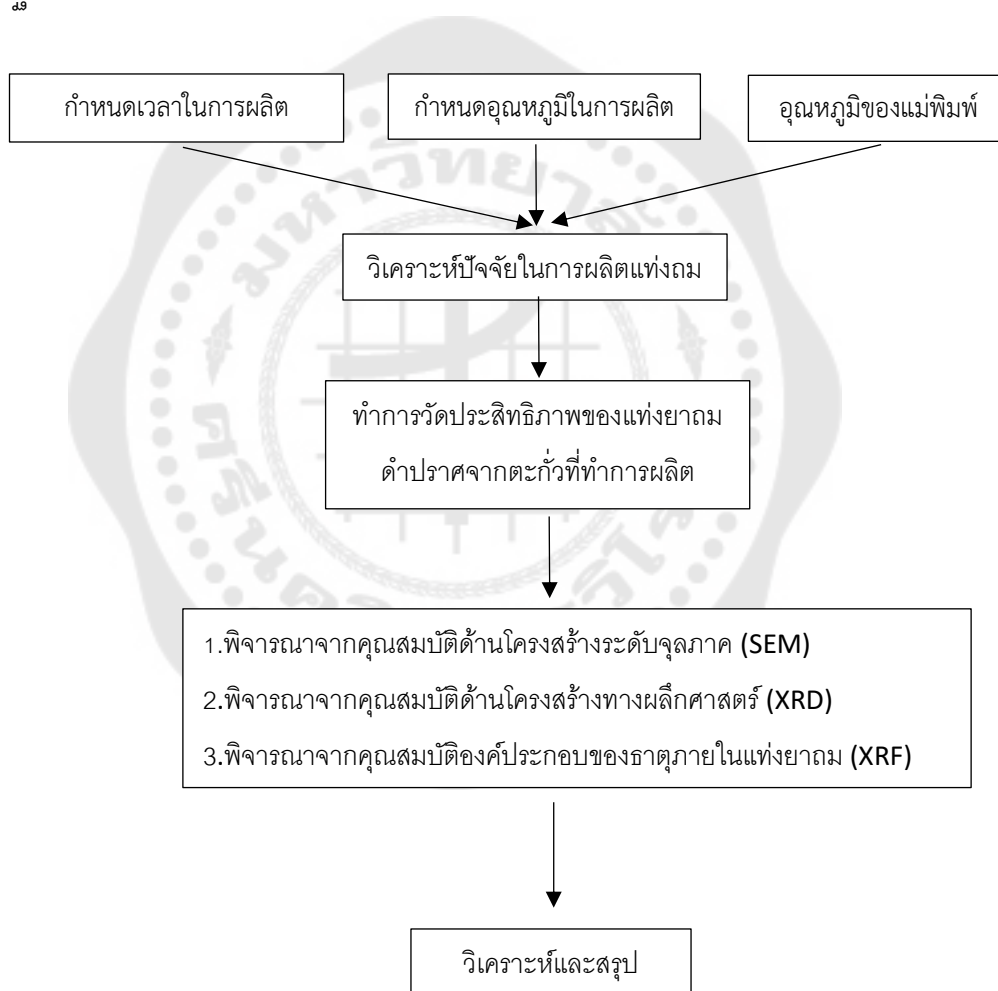
## 1.4 นิยามศัพท์เฉพาะ

1. เครื่องถม หมายถึง เครื่องเงินที่ทำการแกะลวดลายให้มีลักษณะเป็นร่อง และทำการเติมร่องลายด้วยแท่งถลุงที่มีสีดำ
2. ยาถม หมายถึง สารที่ประกอบด้วย ตะกั่ว เงิน ทองแดง และกำมะถัน ซึ่งช่างทำถมจะนำสารทั้งสามชนิดมาหลอมทำเป็น แท่งสีดำ ใช้ทำเครื่องถม
3. ยาถมดำปราศจากตะกั่ว หมายถึง ยาถมแท่งสีดำที่ทำการปรับปรุงสูตรโดยไม่ใส่ตะกั่ว

4.สมบัติเชิงกายภาพ ในงานวิจัยนี้ หมายถึง ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของยาถมดำปราศจากตะกั่ว ศึกษาโครงสร้างผลึกของแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่ว ศึกษาองค์ประกอบของแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่ว

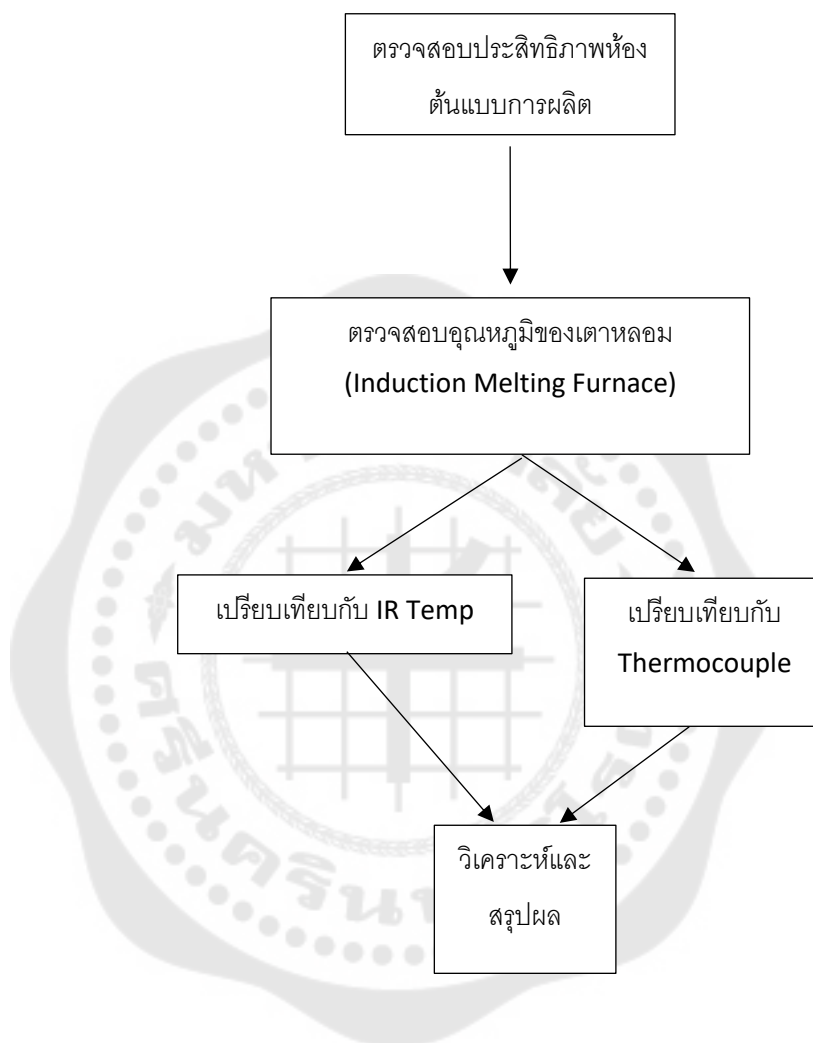
### 1.5 กรอบแนวคิดในการวิจัย

ตามวัตถุประสงค์ข้อที่ 1 เพื่อพัฒนาการผลิตแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่วให้ได้มาตรฐาน



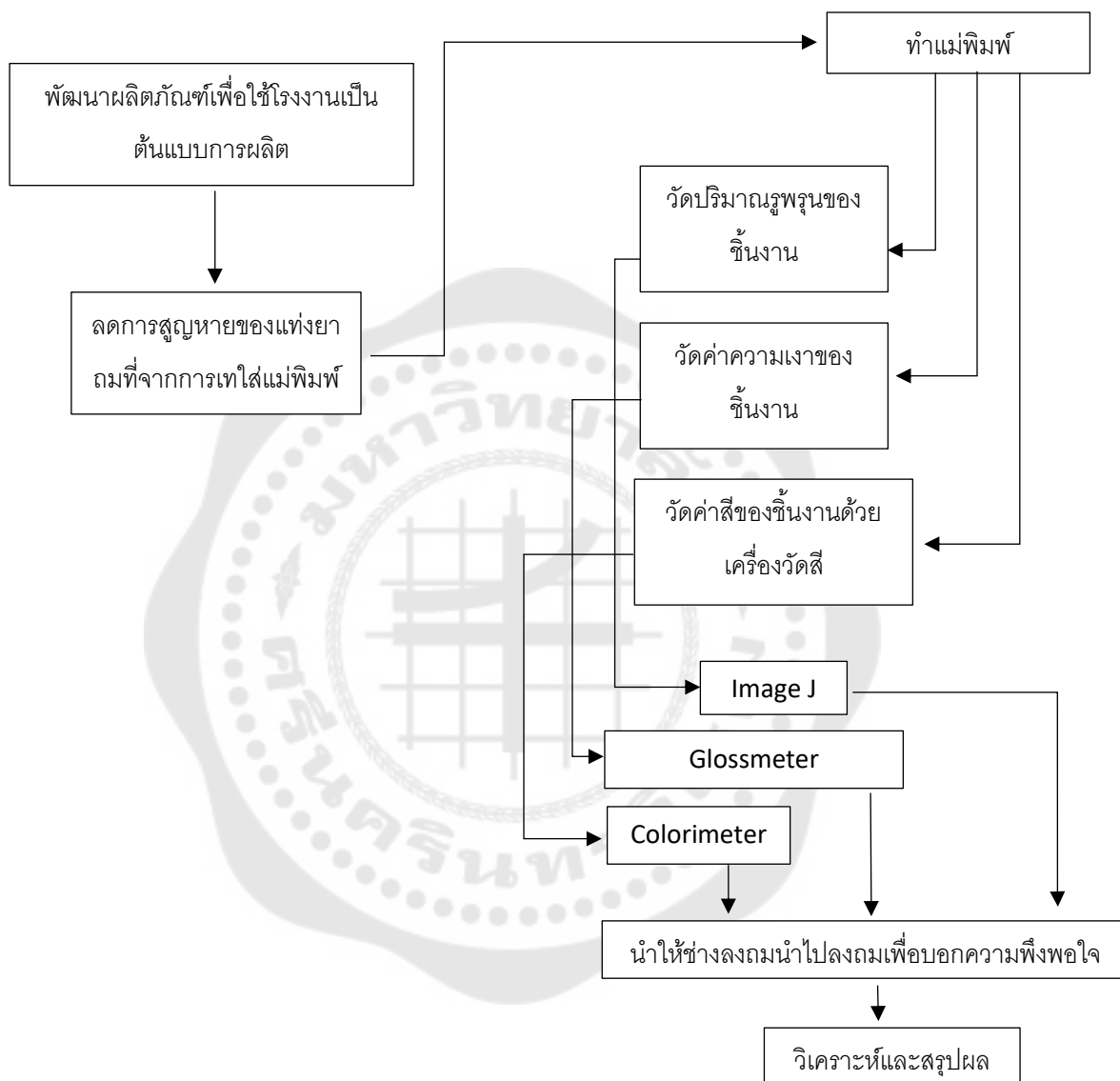
ภาพประกอบ 1 แผงผังแสดงกระบวนการผลิตแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่วและระบบการผลิตโรงงาน

ตามวัตถุประสงค์ข้อที่ 2 เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยการเย็นตัวที่ส่งผลต่อคุณภาพของแท่งถลุง  
ดำปราศจากตะกั่ว



ภาพประกอบ 2 แผนผังแสดงวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพของแท่งถลุงดำปราศจากตะกั่ว

ตามวัตถุประสงค์ข้อที่ 3 เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของยาถมที่ใช้ในเชิงพาณิชย์



ภาพประกอบ 3 แผนผังแสดงแนวทางการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่ใช้โรงงานเป็นต้นแบบการผลิต

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ห้องต้นแบบและเครื่องต้นแบบของกระบวนการผลิตแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่ว ทำให้มีการควบคุมการผลิตที่ส่งผลต่อแท่งยาถมดำให้มีมาตรฐานระดับเดียวกัน
2. ได้แท่งยาถมดำปราศจากตะกั่วที่มีประสิทธิภาพสามารถผลิตในเชิงอุตสาหกรรม
3. เพื่อให้ทราบปัจจัยการผลิตส่งผลต่อคุณภาพแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่วที่ไม่ได้มาตรฐานในระดับเดียวกัน โดยพิจารณาจากคุณสมบัติด้านโครงสร้างระดับจุลภาค ความร้อนและการไหลตัวของยาถม



## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังต่อไปนี้

1. การศึกษาเครื่องถนอมไทยและกระบวนการผลิตเครื่องถนอมไทยแบบดั้งเดิม
2. ศึกษาองค์ประกอบและคุณสมบัติของยาถนอมแบบดั้งเดิม
3. วิวัฒนาการของแท่งยาถนอมดำปราศจากตะกั่ว
4. ศึกษาหลักการทำงานและประเภทของเตาที่ใช้ในการหลอมโลหะในอุตสาหกรรม
5. ศึกษากระบวนการควบคุมมลพิษทางอากาศที่เกิดจากผลิต
6. เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

#### 2.1 กระบวนการผลิตเครื่องถนอมดำแบบดั้งเดิม

เครื่องถนอมเป็นศิลปหัตถกรรมที่นิยมตั้งแต่สมัยอยุธยา มีทั้งเครื่องถนอมนครศรีธรรมราช มีชื่อว่า “ ถนอมนคร ” เครื่องถนอมในจังหวัดกรุงเทพฯ มีชื่อว่า “ บ้านพานถม ” เครื่องถนอมสมัยก่อนนิยมทำเป็นเครื่องใช้ และเครื่องบรรณาการ ต่อมาในปัจจุบันได้นำมาประยุกต์ใช้ทำเครื่องประดับ เช่น กำไล ต่างหู แหวน เป็นต้น และประดับด้วยเพชรหรือพลอยหลากสีเพื่อสามารถที่จะเพิ่มมูลค่าได้

การผลิตแท่งยาถนอมแบบโบราณมีกลวิธีเฉพาะในการทำที่แตกต่างขึ้นอยู่กับความสามารถของช่าง แต่มีการผสมของโลหะสามอย่าง คือ เงิน ตะกั่ว และทองแดง หลอมละลายในเตาแก๊สโดยใช้ความร้อนจากเตาถ่านไม้เนื้ออ่อน เมื่อโลหะทั้งสามหลอมเป็นเนื้อเดียวกันจึงทยอยเติมกำมะถันจนหมด แล้วควนให้เข้ากัน หลังจากนั้นปิดฝาและทำการให้ความร้อนไปเรื่อยๆ จนกำมะถันหมดซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 3 – 4 วัน หลังจากเทลงวางเป็นแท่งยาถนอมดำ ซึ่งลักษณะแท่งยาถนอมดำที่ดีนั้นจะต้องมีลักษณะหน้าที่เป็นเสี้ยน เงางาม และอมน้ำเงิน ดังภาพประกอบ 4 (สมาคมเครื่องถนอมไทย, 2509)





ภาพประกอบ 4 แท่งยามดำ

ที่มา: อติรุจ พีรวัฒน์ และสิทธิชัย หุ่นสกุล (2559)

เครื่องถมไทยมีอยู่ 3 แบบ คือ เครื่องถมทอง เครื่องถมตะทอง และเครื่องถมดำหรือเครื่องถมเงิน ดังภาพประกอบ 5 เป็นเนื้อถมที่เติมลงไปอยู่บนพื้นโลหะตามร่องลาย ตามความนิยมยามที่ตีนั้นต้องมีสีดำสนิท



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพประกอบ 5 ประเภทเครื่องถมทั้ง 3 ชนิด ก)เครื่องถมทอง, ข)เครื่องถมตะทอง, ค)เครื่องถมดำ

ที่มา: <http://saranukromthai.or.th/sub/book/book.php?book=21&chap=4&page=t21-4-infodetail09.html> (2539)

### 2.1.1 ขั้นตอนการผลิตเครื่องถมไทย



ภาพประกอบ 6 ขั้นตอนการผลิตยาถมแบบดั้งเดิม

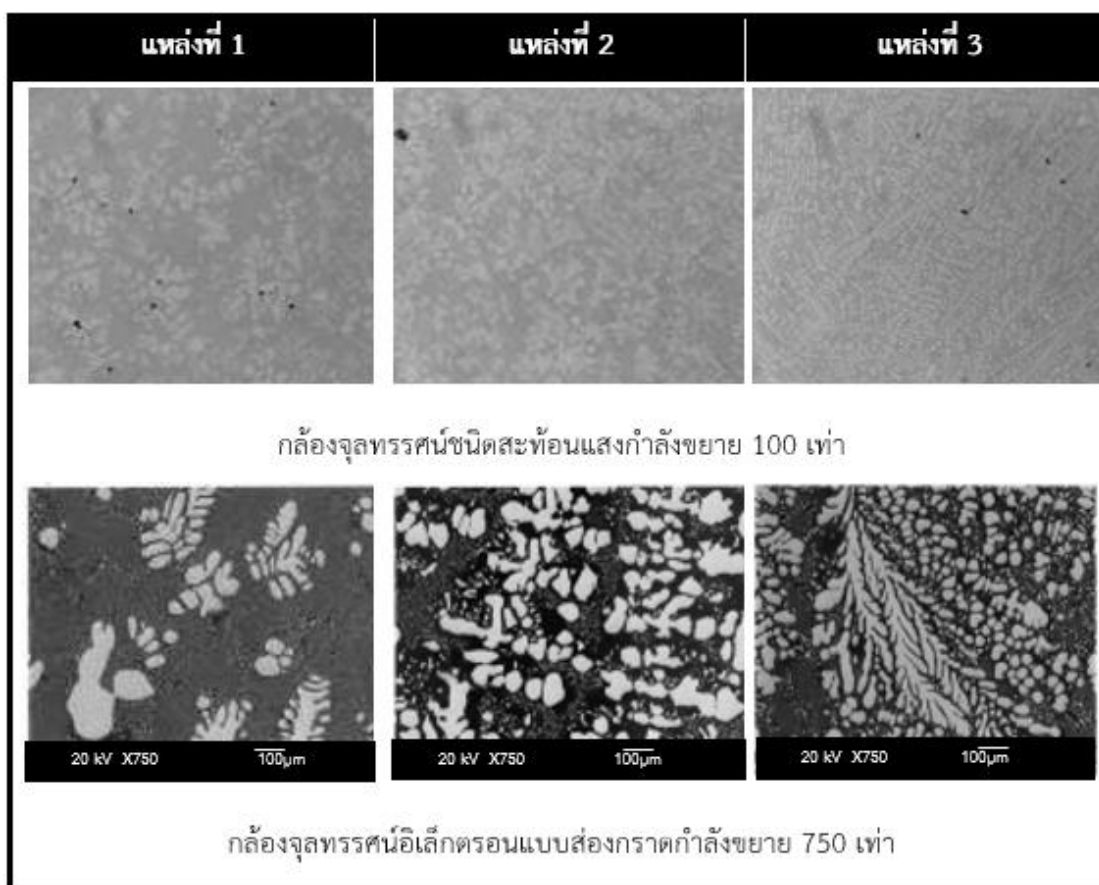
ที่มา: <http://saranukromthai.or.th/sub/book/book.php?book=21&chap=4&page=t21-4-infodetail09.html> (2539)

1. การแกะสลักลวดลาย เริ่มด้วยการใช้หมึกจีนเขียนลวดลายลงบนพื้นเงิน แล้วแกะสลักเป็นลวดลายต่างๆ ให้งดงาม
2. ขั้นตอนขึ้นรูป การทำโลหะให้เป็นรูปร่างโดยใช้ค้อนทุบแท่งเงินให้แผ่ จากนั้นมาตัดให้เป็นรูปภาชนะตามที่ต้องการ
3. ขั้นเขียนลาย วาดลวดลายลงไปบนภาชนะ จนได้ลวดลายละเอียดตามความต้องการ
4. ขั้นแกะสลักลาย สลักลวดลายด้วยมือ ตอกเป็นรอยลึกตามลวดลายที่เขียนไว้ โดยสลักให้มีรอยนูนอีกด้านหนึ่ง
5. ขั้นลงถม นำแท่งยาถมที่เตรียมไว้แล้วหลอมละลายด้วยยาถมด้วยความร้อนเต็มลงไปในร่องลวดลายที่แกะสลักไว้ น้ำยาถมจะไหลไปตามร่องนั้น การลงถมที่ดีต้องไม่ลงครั้งเดียว ต้องลงถมถึง 3 – 4 ครั้ง เพื่อให้เต็มร่อง
6. ขั้นตกแต่งถม แต่งผิวให้เรียบด้วยตะไบหรือกระดาษทราย จนกระทั่งเห็นลวดลายขึ้นชัดเจน

7. ชั้นขี้ดงา ขัดชิ้นงานด้วยเครื่องขัดด้วยยาขัดยาตินและยาแดง เช็ดด้วยผ้านุ่มเพื่อทำความสะอาด (สมาคมเครื่องถมและเครื่องเงินไทย, 2512)

## 2.2 การศึกษาองค์ประกอบและคุณสมบัติของยาถมแบบดั้งเดิม

องค์ประกอบของแท่งยาถมดั้งเดิมที่มี ตะกั่ว เงิน ทองแดง และกำมะถันเป็นส่วนผสม ซึ่งแต่ละแหล่งมีสูตรในการทำแท่งยาถมที่แตกต่างกัน ดังแสดงในงานวิจัยของณัฐกฤตา และคณะ (ณัฐกฤตา เพ็ญแสง และคณะ, 2552) ซึ่งได้ทำการศึกษาส่วนประกอบทางเคมีคุณสมบัติต่างๆในแท่งยาถมของช่างทำเครื่องถมและวิเคราะห์เปรียบเทียบลักษณะของแท่งยาถมของผู้ผลิตแท่งยาถม 3 แหล่ง คือ แหล่งที่ 1 ยาถมของอาจารย์สมนึก จันทร์จำปา จากกรุงเทพฯ เป็นการนำแท่งจาก จ.นครศรีธรรมราชมาผสมเพิ่มโลหะบางชนิด แหล่งที่ 2 ยาถมของอาจารย์ระไว สุดเฉลย จ.จังหวัดนครศรีธรรมราช และแหล่งที่ 3 ยาถมของ อาจารย์นันทพร คงผอม จากกรุงเทพฯ จากนั้นศึกษาความพึงพอใจจากช่างผู้ใช้แท่งยาถม โดยแท่งยาถมทั้ง 3 แหล่งมีโครงสร้างจุลภาคดังภาพประกอบ 7 เมื่อนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีด้วยระบบการวิเคราะห์เทคนิค Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าทั้ง 3 แหล่งมีส่วนประกอบของตะกั่วอยู่ในช่วงร้อยละ 40.38-52.64 โดยน้ำหนัก, เงินร้อยละ 2.03-12 โดยน้ำหนัก, ทองแดงร้อยละ 29.80-31.18 โดยน้ำหนัก และกำมะถันร้อยละ 14.14-14.44 โดยน้ำหนัก และผลวิเคราะห์โครงสร้างทางผลึกศาสตร์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) พบว่าแท่งยาถมทั้ง 3 แหล่งประกอบด้วยสารประกอบ PbS, Cu<sub>2</sub>S, AgCuS มีโครงสร้างทางผลึกศาสตร์ Orthorhombic แต่แท่งยาถมแหล่งที่ 1 จะไม่พบ AgCuS ที่มีสารประกอบ PbS เป็นโครงสร้างผลึกศาสตร์แบบ Cubic และสารประกอบ Cu<sub>2</sub>S มีโครงสร้างผลึกศาสตร์เป็น Monoclinic จากการวิเคราะห์ข้อมูลการตอบแบบสอบถามความพึงพอใจของช่างที่ใช้ยาถมทั้ง 3 คน โดยทดลองใช้ยาถมทั้ง 3 แหล่งลงถมบนชิ้นงานเงิน เมื่อทำการคิดในเชิงสถิติพบว่ายาถมจากแหล่งต่างๆ ทั้ง 3 แหล่งมีคุณสมบัติในเรื่องของ สี การเกาะติด ความมันวาว รูพรุนและการไหลที่ไม่แตกต่างกัน



ภาพประกอบ 7 แสดงโครงสร้างจุลภาคของแท่งยาถมด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดสะท้อนแสงและกล้องจุลทรรศน์ชนิดสะท้อนแสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ที่มา: ณัฐกฤตา เพ็ญแสง (2552)

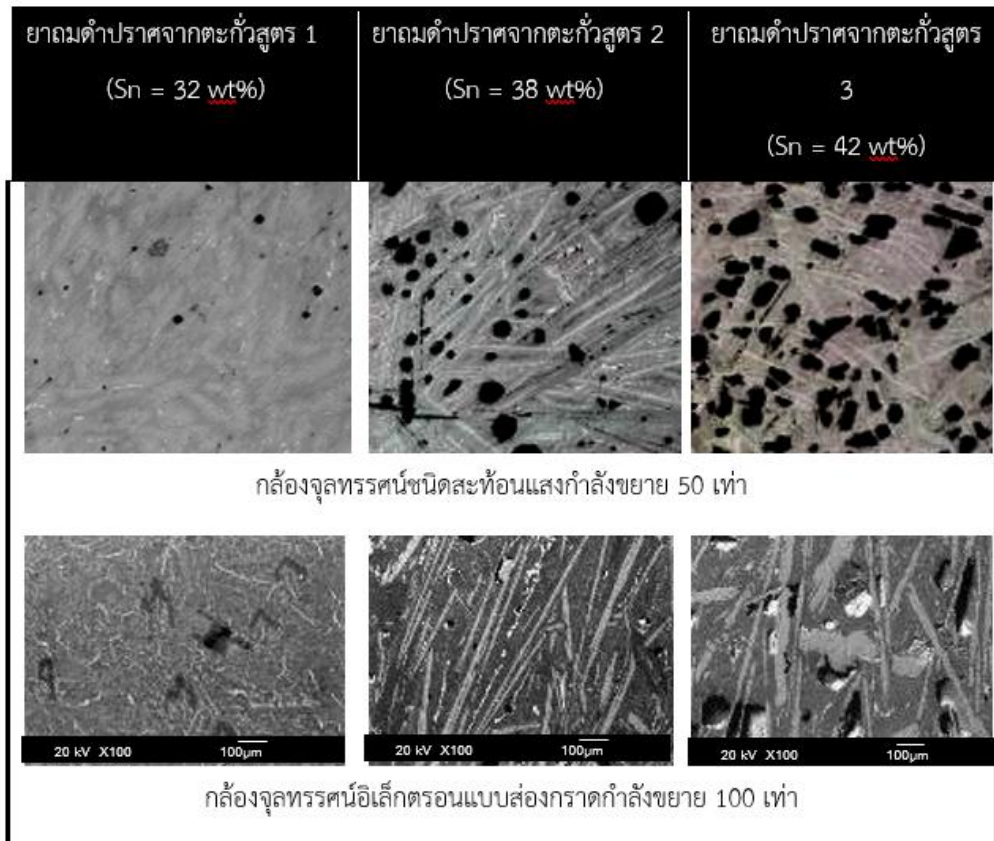
ต่อมานงานวิจัยขจีพร วงศ์ปรีดี และคณะ ฯ (Pathra Srisukho และ Kageeporn Wongpreedee, 2013) ศึกษาสมบัติของยาถมแบบดั้งเดิม ทำการเปรียบเทียบความแข็งที่ผิวระหว่างแท่งยาถมดำที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบกับแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่ว โดยนำยาถมจาก 3 แหล่ง และหาองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเทคนิค XRF แหล่งที่ 1 จากนครศรีธรรมราชทำการปรับส่วนผสมมีองค์ประกอบของตะกั่วร้อยละ 50.53 โดยน้ำหนัก, เงินร้อยละ 1.43 โดยน้ำหนัก, ทองแดงร้อยละ 29.94 โดยน้ำหนัก และกำมะถันร้อยละ 14.35 โดยน้ำหนัก อื่นๆร้อยละ 3.75 โดยน้ำหนัก แหล่งที่ 2 จากนครศรีธรรมราชมีองค์ประกอบของตะกั่วร้อยละ 44.66 โดยน้ำหนัก, เงินร้อยละ 11.13 โดยน้ำหนัก, ทองแดงร้อยละ 33.99 โดยน้ำหนัก และกำมะถันร้อยละ 10.31 โดยน้ำหนัก แหล่งที่ 3 จากกรุงเทพฯ มีส่วนผสมของตะกั่วร้อยละ 40.76

โดยน้ำหนัก, เงินร้อยละ 8.36 โดยน้ำหนัก, ทองแดงร้อยละ 31.13 โดยน้ำหนัก และกำมะถันร้อยละ 19.79 โดยน้ำหนัก ซึ่งทั้ง 3 แหล่ง มีความแข็งที่ผิว  $96.87 \pm 6.8$  HV,  $83.26 \pm 7$  HV และ  $99.84 \pm 5.4$  HV ตามลำดับ ซึ่งยากด่าปราศจากตะกั่วที่ได้จากการผสมมีความแข็งที่ผิวมากกว่า ยากดแบบดั้งเดิม คือ  $182 \pm 19.1$  HV

## 2.3 การพัฒนาของยากด่าปราศจากตะกั่ว

ในปี พ.ศ. 2554 ขจีพร วงศ์ปรีดี และคณะฯ (K.Wongpreedee, P. Sriukho, P.Ruethaitananon, S.Harbantan, และ S.Kedsin., 2558) ได้ทำการคิดค้นประดิษฐ์ยากด่าปราศจากตะกั่วขึ้น เนื่องจากตลาดเครื่องถมของประเทศไทยนั้นไม่ได้อยู่ในวงกว้าง เพราะไม่สามารถนำออกขายไปยังต่างประเทศได้ เนื่องจากมีสารตะกั่วซึ่งเป็นพิษ ดังนั้นจึงได้คิดค้นสูตรแท่งยากด่าโดยนำดีบุกมาทดแทนตะกั่วในปริมาณร้อยละ 32-43 โดยน้ำหนัก และได้จดสิทธิบัตรในนามของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ในเลขที่คำขอ 1101001747 ของ ชื่อผลงานว่า “แท่งยากด่าปราศจากตะกั่ว”

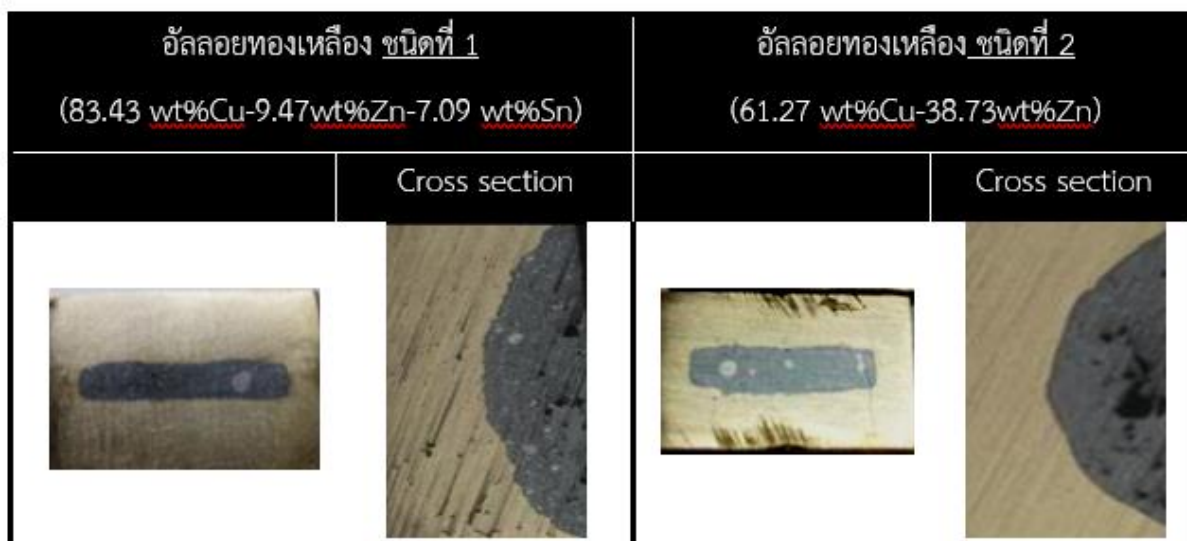
ต่อมางานวิจัยของภัทรา ศรีสุโข และคณะฯ (Pathra Srisukho, Panphot Ruethaitananon, และ Kageeporn Wongpreedee, 2011) ได้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคและการจัดเรียงตัวของยากด่าปราศจากตะกั่วและได้ตั้งชื่อว่า “Niello inlay” ซึ่งมีโครงสร้างจุลภาคดังภาพประกอบ 5 แสดงโครงสร้างจุลภาคของแท่งยากด่าปราศจากตะกั่วด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลของการเพิ่มปริมาณของธาตุดีบุกมากขึ้นจะเกิดเฟส Sn-rich มีลักษณะเส้นเข็ม (Needle-like plates) ได้ชัดเจนจำนวนมาก ซึ่งถ้าปริมาณของธาตุดีบุกต่ำมากจะทพให้เกิดยูเทคติกแบบสารประกอบ ทองแดง-ดีบุก เป็นส่วนใหญ่ ทำให้ไม่สามารถเห็นเฟสของเส้นเข็ม Sn-rich นอกจากนั้นพบว่า เฟส Ag-rich ที่มีรูปร่างไม่แน่นอนแยกออกมาอยู่บริเวณขอบเกรน และไม่มีธาตุกำมะถันเป็นส่วนประกอบ และพบมากในกรณีที่มีปริมาณส่วนผสมของธาตุเงิน ซึ่งพบมากที่สุดที่ยากด่าปราศจากตะกั่วสูตร 1 และผลของการเพิ่มปริมาณธาตุดีบุกในยากด่าปราศจากตะกั่วส่งผลกระทบให้เกิดรูพรุนในแท่งยากด่าปราศจากตะกั่วมากขึ้นตามปริมาณดีบุกที่เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ได้ทำการวิเคราะห์หาจุดหลอมเหลวของแท่งยากด่าปราศจากตะกั่วด้วยเครื่อง DSC พบว่ายากด่าปราศจากตะกั่วทั้งสามสูตรมีจุดหลอมเหลวประมาณ  $407 - 414^{\circ}\text{C}$



ภาพประกอบ 8 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของแท่งยานมดำปราศจากตะกั่วด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสะท้อนแสง และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ที่มา: ภัทรา ศรีสุโข (2556)

ดังนั้นทองเหลืองที่มีธาตุดีบุกเป็นส่วนประกอบเป็นส่วนทำให้เกิดฝ้าขาวได้ง่าย เพราะธาตุดีบุกนั้นชอบรวมตัวกับทองแดงและเงิน จนเกิดเป็นฝ้าขาวมากกว่าที่จะจับตัวกับธาตุกำมะถันที่เป็นตัวให้เกิดสีดำ ส่วนทองเหลืองที่มีสังกะสีปริมาณมากจะทำให้เกิดการยึดเกาะระหว่างชั้นรอยต่อของยานมดำปราศจากตะกั่วกับทองเหลืองไม่ดี และทำให้ร่วนมากกว่าทองเหลืองที่มีดีบุกเป็นส่วนประกอบ



ภาพประกอบ 9 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดสะท้อนแสงกำลังขยาย 50 เท่าแสดงโครงสร้างจุลภาคของอัลลอยทองเหลืองสองชนิดที่ลงถมดำปราศจากตะกั่ว

ที่มา: ขจีพร วงศ์ปรีดี (2555)

## 2.4 คุณสมบัติของแร่ที่ทำให้เกิดสี

การทำให้เกิดสีของยาถมแหล่งกำเนิดมาจากธาตุต่างๆ ซึ่งเป็นส่วนประกอบของยาถม โดยเฉพาะที่มีกำมะถันเป็นส่วนประกอบมีส่วนสำคัญทำให้ยาถมนั้นมีสีดำ ซึ่งในงานของ (E. Brepohl., 2001) บอกถึงชื่อแร่ต่างๆ ที่มีธาตุกำมะถันเป็นองค์ประกอบ ซึ่งแต่ละสารประกอบมีผลทำให้เกิดสีและระบบผลึกที่แตกต่างกันตามตาราง 1 แสดงสูตรทางเคมี สีแร่ สีผง ระบบผลึก และชื่อแร่ของธาตุที่มีธาตุกำมะถันเป็นองค์ประกอบ ซึ่งธาตุต่างๆ บ่งบอกให้เห็นถึงความเชื่อมโยงของอัลลอยดีบุกเชื่อมประสานกับยาถมดำปราศจากตะกั่วที่มีดีบุก เงิน และทองแดงเป็นส่วนประกอบ

ตาราง 1 แสดงสูตรทางเคมี ระบบผลึก สี สีผง และชื่อแร่ของธาตุที่มีกำมะถันเป็นส่วนประกอบ

สูตรเคมี	ระบบผลึก	สีแร่	สีผง	ชื่อแร่
Ag <sub>2</sub> S	Cubic	ดำ	ดำ	Argentite
	Monoclinic			Acanthite
AgCuS	Orthorhombic	สีเทาเข้มดำ	สีเทา	Stromeyerite
Ag <sub>3</sub> CuS <sub>2</sub>	Tetragonal	สีเทา	ดำ	Jalpaite
Cu <sub>2</sub> S	Hexagonal	เทาตะกั่ว	ดำเทา	Chaococite
	Orthorhombic	ดำเทา		
CuS	Hexagonal	น้ำเงินคราม	เทาตะกั่ว	Covellite
Cu <sub>2</sub> SnS <sub>3</sub>	Triclinic	สีเทาอมเขียว	เทา	Mohite
PbS	Cubic	ดำ	ดำ	Galena

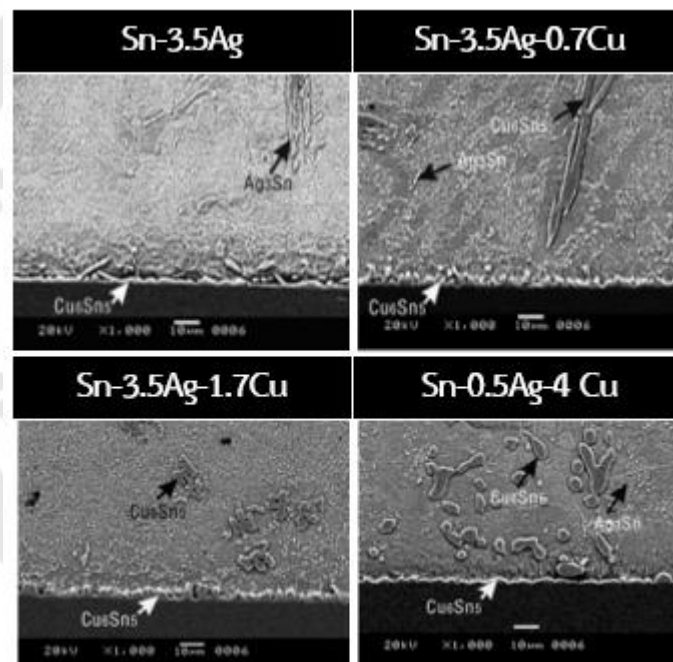
## 2.5 การพัฒนาอัลลอยดีบุกสำหรับงานเชื่อมประสาน

เมื่ออดีตอัลลอยที่ใช้ในการเชื่อมประสานที่ของงานอิเล็กทรอนิกส์จะใช้ตะกั่วกับดีบุกเป็นส่วนประกอบหลัก ซึ่งปัจจุบันได้เลิกใช้ธาตุตะกั่วเหลือแต่ธาตุดีบุกอย่างเดียวและเติมโลหะอื่นๆเข้าไปทดแทน เช่น เงิน ทองแดง ในปริมาณที่แตกต่างกันเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้นแต่ผลของการใช้อัลลอยดีบุกสำหรับงานเชื่อมประสานมักทำให้เกิดชั้นอินเตอร์เมทัลลิกที่หนาระหว่างอัลลอยเชื่อมประสานกับพื้นชิ้นงานจนเป็นสาเหตุที่เกิตรอยแตก จึงได้มีการเพิ่มธาตุอื่นๆประกอบในเข้ามาในปริมาณที่ต่ำ เช่น การเติมธาตุบิสมัทเพื่อนำมาปรับปรุงคุณสมบัติให้ดีขึ้นลดการเติบโตของชั้นอินเตอร์เมทัลลิก จากการศึกษาคุณสมบัติของอัลลอยดีบุกสำหรับงานเชื่อมประสาน ได้มีการศึกษาการเชื่อมประสานของกลุ่มดีบุกบนชิ้นงานทองแดงและเงิน ซึ่งอัลลอยดีบุกสำหรับงานเชื่อมประสานที่มีทองแดงค่อนข้างจะมีปัญหาการเกิดชั้นอินเตอร์เมทัลลิกที่เป็นสาเหตุเกิดการแตกหัก ดังนั้นความสำคัญเรื่องความขรุขระ ความหนา รวมถึงจลนพลศาสตร์ มีผลต่อการปรับปรุงคุณสมบัติของอัลลอยดีบุกสำหรับงานเชื่อมประสาน

งานวิจัยของ D.Q. Yu, L.Wang (Yu และ Wang, 2008) ได้ศึกษาวิวัฒนาการพฤติกรรมการเจริญเติบโตและความขรุขระของชั้นอินเตอร์เมทัลลิก ระหว่างอัลลอยเชื่อมประสาน ดีบุก เงิน

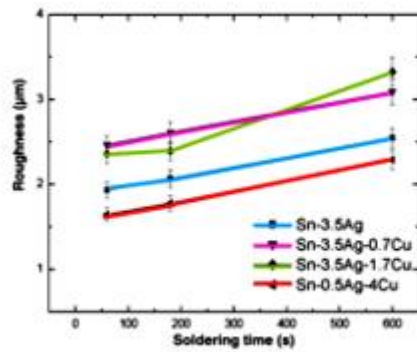


และทองแดง โดยมีปริมาณทองแดงที่แตกต่าง ผสมอยู่ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 0.7, 1.7 และ 4 โดยน้ำหนัก มีส่วนผสมอัลลอยเชื่อมประสานคือ Sn-3.5Ag, Sn-3.5Ag-0.7Cu, Sn-3.5Ag-1.7Cu และ Sn-0.5Ag-4Cu ซึ่งอบบนพื้นชิ้นงานทองแดง ศึกษานี้ทำให้ทราบว่าปริมาณทองแดงส่งผลต่อความหนาของชั้นอินเตอร์เมทัลลิก ดังภาพประกอบ 10 คือสารประกอบของ  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  เมื่ออัลลอยเชื่อมประสานมีปริมาณทองแดงเพิ่มขึ้น แต่ทำให้ความขรุขระน้อยลงดังภาพประกอบ 11ก) แต่ความหนากลับเพิ่มมากขึ้นดังภาพประกอบ 11ข) ซึ่งไม่ส่งผลดีต่อคุณสมบัติของอัลลอยเชื่อมประสานเพราะสารประกอบอินเตอร์เมทัลลิกมีสมบัติแข็งแต่เปราะ และถ้ามีความหนาชั้นอินเตอร์เมทัลลิกมากขึ้นจะส่งผลให้สมบัติเชื่อมประสานไม่ดีซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดรอยแตกได้

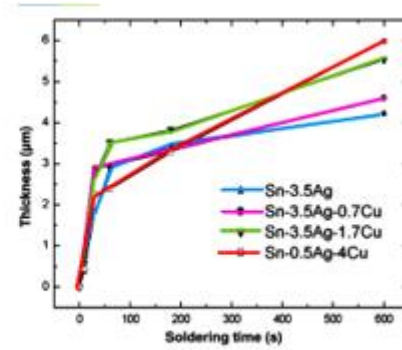


ภาพประกอบ 10 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงโครงสร้างจุลภาคของอัลลอยเชื่อมประสาน Sn-3.5Ag, Sn-3.5Ag-0.7Cu, Sn-3.5Ag-1.7Cu และ Sn-0.5Ag-4Cu

ที่มา: D.Q. Yu, L.Wang (2008)



(ก)

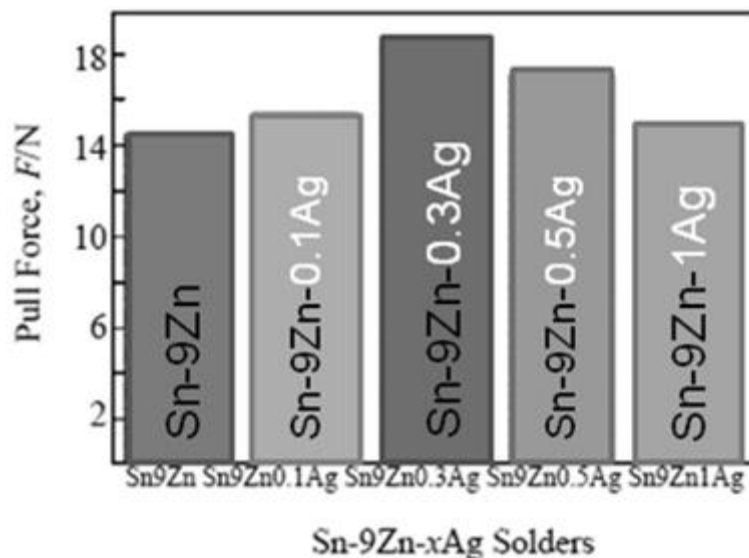


(ข)

ภาพประกอบ 11 ก) กราฟแสดงความขรุขระของชั้นรอยต่อของอัลลอยเชื่อมประสาน Sn-3.5Ag, Sn-3.5Ag-0.7Cu, Sn-3.5Ag-1.7Cu และ Sn-0.5Ag-4Cu, ข) กราฟแสดงความหนาของชั้นรอยต่อของอัลลอยเชื่อมประสาน Sn-3.5Ag, Sn-3.5Ag-0.7Cu, Sn-3.5Ag-1.7Cu และ Sn-0.5Ag-4Cu

ที่มา: D.Q. Yu, L.Wang (2008)

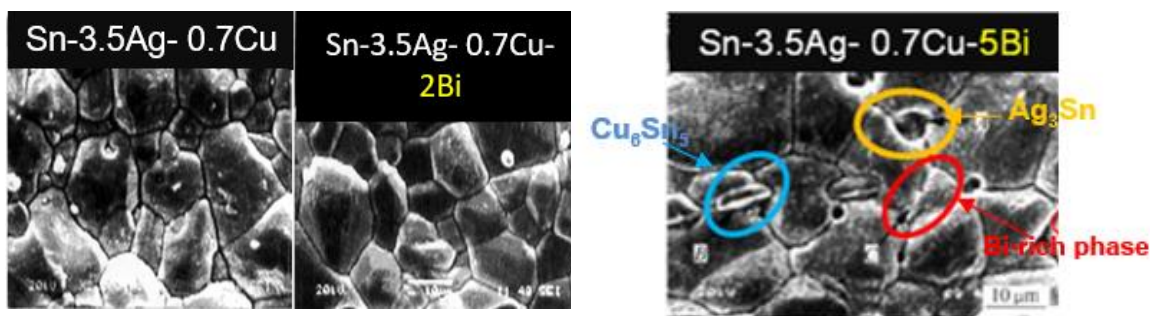
งานวิจัยของ Chen Wenxue, et al. (Chen, Xue, Wang, และ Hu, 2010) ได้ศึกษาอิทธิพลปริมาณโลหะเงินที่ใส่ลงในอัลลอยเชื่อมประสานในปริมาณที่แตกต่างกันส่งผลต่อคุณสมบัติของอัลลอยเชื่อมประสานในสูตร Sn-9Zn ผลการวิจัยนี้ได้พบว่าโลหะเงินที่มีส่วนสำคัญช่วยเรื่องความสามารถในการเชื่อมและคุณสมบัติเชิงกล ซึ่งผลในการเพิ่มปริมาณเงินร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก สามารถที่จะปรับปรุงความต้านทานของการเกิดออกซิเดชันของอัลลอยเชื่อมประสานช่วยเรื่องการเกาะติดที่ดีจึงส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกล แต่เมื่อมีโลหะเงินเพิ่มขึ้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ทำให้คุณสมบัติเชิงกลกลับลดลงดังภาพประกอบ 12



ภาพประกอบ 12 กราฟแท่งแสดงสมบัติเชิงกลของอัลลอยเชื่อมประสานที่มีปริมาณเงินแตกต่างกัน

ที่มา: Chen Wenxue, et al. (2010)

ในต่อมาได้มีการคิดค้นปรับปรุงโดยมีการเติมธาตุต่างๆ เพียงเล็กน้อย เพื่อให้คุณสมบัติในการเชื่อมที่ดีขึ้น ดังในงานวิจัยของ LI Guo-yuan, SHI Xun-qing (Li และ Shi, 2006) ทำการเติมธาตุบิสมัทลงไปในอัลลอยเชื่อมประสานส่งผลต่อการเจริญเติบโตของสารประกอบอินเตอร์เมทัลลิก เมื่อทำการตรวจสอบการแพร่ของการเจริญเติบโตของการเกิดชั้นอินเตอร์เมทัลลิก จากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังภาพประกอบ 13 พบว่าผลของปริมาณการเติมธาตุบิสมัทสามารถหยุดยั้งการเจริญเติบโตของชั้นอินเตอร์เมทัลลิก แสดงผลให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณธาตุบิสมัทร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก สามารถปรับแก้ไขขนาดเกรนที่เป็นอินเตอร์เมทัลลิก และหยุดยั้งการเจริญเติบโตที่มากของชั้นอินเตอร์เมทัลลิก

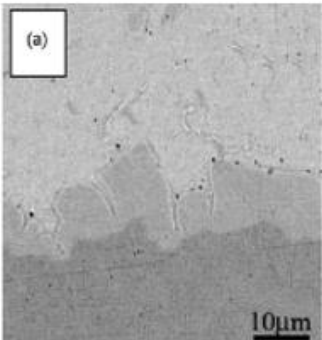
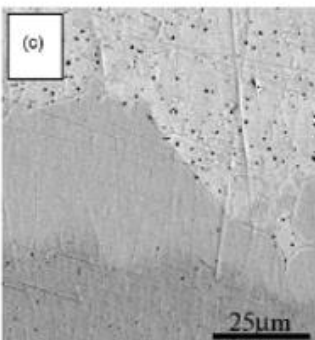
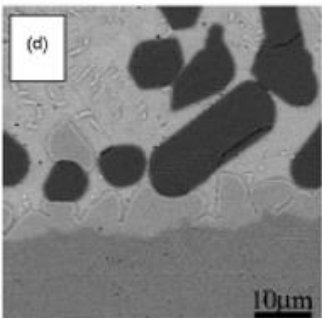
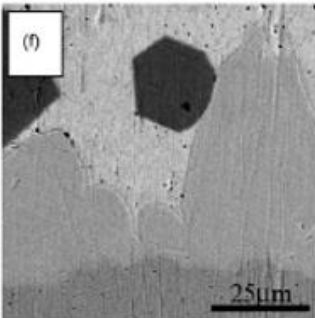
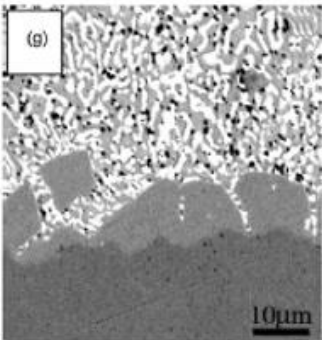
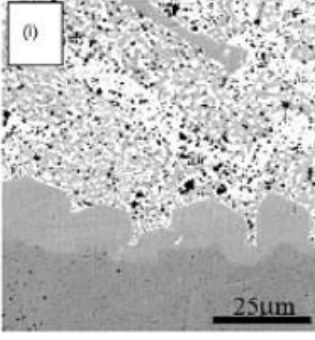


ภาพประกอบ 13 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงโครงสร้างจุลภาคของ Sn-3.5Ag-0.7Cu ที่เติมบิสมัทส่งผลต่อการเจริญเติบโตของชั้นอินเตอร์เมทัลลิก

ที่มา : LI Guo-yuan, SHI Xun-qing (2006)

งานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นนั้นจะเป็นอัลลอยดีบุกเชื่อมประสานโดยมีธาตุทองแดงเป็นพื้น แต่ในงานวิจัยของ H.F. Zou and Z.F. Zhang (Zou, Zhang, และ Zhang, 2009) ได้ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์ของชั้นอินเตอร์เมทัลลิกของอัลลอยเชื่อมประสานกับพื้นชิ้นงานที่เป็นโลหะเงิน โดยอัลลอยเชื่อมประสานมีสูตร Sn-4Ag, Sn-3Cu และ Sn-37Pb ได้ทำการป้อนแข็งที่เวลาต่างกัน เพื่อศึกษาความหนาของชั้นสารประกอบอินเตอร์เมทัลลิก ผลการวิจัยสามารถนำไปคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ได้ โดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอัลลอยเชื่อมประสานที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบมีค่าต่ำสุด คือ  $0.66 \times 10^{-14} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  จึงทำให้มีผลต่อการเจริญเติบโตของชั้นอินเตอร์เมทัลลิกที่ช้ากว่าทองแดง และเงินตามลำดับ ในงานวิจัยนี้แนะนำว่าพื้นชิ้นงานที่ทำจากเงินดีกว่าที่ทำจากทองแดง เพราะช่วยลดการเกิดอนุภาค  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  บริเวณรอยต่อของอัลลอยเชื่อมประสานกับพื้นชิ้นงานทองแดงซึ่งเป็นสาเหตุของการแตกหัก

ตาราง 2 แสดงโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของอัลลอยเชื่อมประสานกับพื้นชิ้นงานที่ทำจากเงิน และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอัลลอยเชื่อมประสาน Sn-4Ag, Sn-3Cu และ Sn-37Pb ทำการบ่มแข็งที่ 260 °C ที่เวลาต่างๆกัน

อัลลอยเชื่อม ประสาน	บ่มแข็ง เวลา 0.5 ชั่วโมง	บ่มแข็ง เวลา 9 ชั่วโมง	ค่าสัมประสิทธิ์ การแพร่ (ตารางเมตรต่อ วินาที)
Sn-4Ag/Ag			$1.41 \times 10^{-14}$
Sn-3Cu/Ag			$1.39 \times 10^{-14}$
Sn-37Pb/Ag			$0.66 \times 10^{-14}$

ที่มา: H.F. Zou and Z.F. Zhang (2009)

## 2.6 หลักการทำงานและประเภทของเตาที่ใช้ในอุตสาหกรรม

### 2.6.1 องค์ประกอบระบบของเตาอุตสาหกรรม

เตาอุตสาหกรรมที่นำไปใช้ในโรงงานอยู่ในโรงงานมีความหลากหลายมากมาย ซึ่งเตาแต่ละประเภทยังมีลักษณะการทำงานที่แตกต่าง นอกจากนั้นเตายังมีอุณหภูมิการทำงานที่แตกต่างกัน ทำให้ส่งผลให้การใช้พลังงานของเตาแตกต่างกันไปด้วย โดยทั่วไปเตาอุตสาหกรรมที่ต้องการอุณหภูมิสูงจะใช้พลังงานสูงและเกิดการสูญเสียความร้อนสูงเมื่อเทียบกับเตาที่มีอุณหภูมิใช้พลังงานที่ต่ำกว่า

### 2.6.2 ประเภทของเตาอุตสาหกรรมประกอบไปด้วย

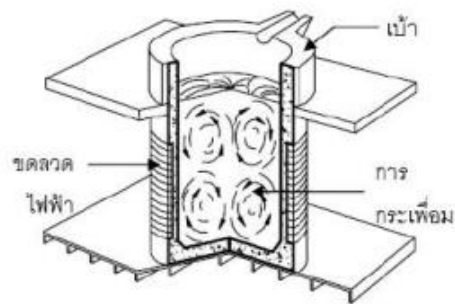
#### 2.6.2.1 เตาหลอมที่ใช้พลังงานไฟฟ้า

เตาหลอมไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนเพื่อใช้หลอมโลหะ เตาหลอมไฟฟ้าที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรมประเภทหล่อหลอมโลหะ ได้แก่ เตาเหนี่ยวนำ และเตาอาร์คไฟฟ้า (คู่มือผู้รับผิดชอบด้านพลังงาน(โรงงาน), 2553)

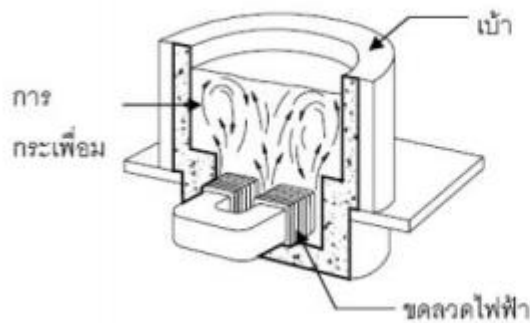
##### 2.6.2.1.1 เตาเหนี่ยวนำ (Induction Furnace)

เตาเหนี่ยวนำใช้งานหลอมโลหะทั้งในกลุ่มเหล็กและนอกกลุ่มเหล็ก เตาเหนี่ยวนำจำแนกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ เตาเหนี่ยวนำแบบไม่มีแกน (Coreless Type) และ เตาเหนี่ยวนำแบบช่อง (Channel Type) ตามภาพประกอบ 14 แสดงรูปร่างของเตาเหนี่ยวนำทั้งสองแบบ เตาเหนี่ยวนำแบบไม่มีแกนมีขดลวดพันอยู่รอบแก้ว ในขณะที่เตาเหนี่ยวนำแบบช่องมีขดลวดพันอยู่รอบแกนที่ติดตั้งอยู่ส่วนนอกของแก้วหลอม

เตาเหนี่ยวนำให้ความร้อนแก่โลหะที่ใช้หลอมโลหะโดยอาศัยการจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับแก่ขดลวดเพื่อกำเนิดสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสที่โลหะ ความต้านทานของโลหะที่มีต่อกระแสเหนี่ยวนำเป็นแหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ในการหลอมโลหะ



(ก)



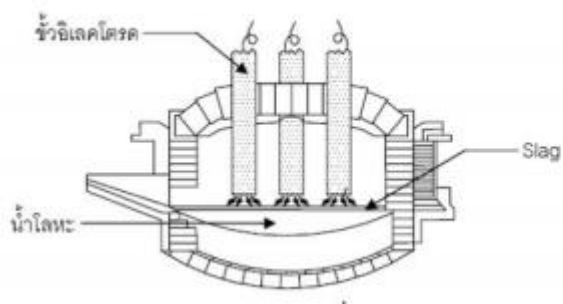
(ข)

ภาพประกอบ 14 เตาเหนี่ยวนำแบบไม่มีแกน (Coreless type) (ก) เตาเหนี่ยวนำแบบช่อง (Induction Furnace)

ที่มา: <http://energyauditorthai.com/wp-content/uploads/2017/01/12.html> (2017)

#### 2.6.2.1.2 เตาอาร์คไฟฟ้า (Electric-Arc Furnace)

ความร้อนที่เกิดจากการอาร์คทางไฟฟ้าเพื่อหลอมโลหะ เตาอาร์คไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ เตาอาร์คไฟฟ้าทางอ้อม (Indirect-Arc Furnace) และ เตาอาร์คไฟฟ้าทางตรง (Direct-Arc Furnace) ซึ่งเตาอาร์คไฟฟ้าทางอ้อม การอาร์คจะเกิดขึ้นระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 2 ขั้ว ส่วนเตาอาร์คไฟฟ้าทางตรง การอาร์คเกิดขึ้นระหว่างขั้วอิเล็กโทรดและโลหะที่ใช้หลอม ภาพประกอบ 15 แสดงเตาอาร์คไฟฟ้าทางตรง



ภาพประกอบ 15 เต้าอาร์คไฟฟ้าทางตรง

ที่มา: <http://energyauditorthai.com/wp-content/uploads/2017/01/12.html> (2017)

### 2.6.2.2 เต้าหลอมใช้พลังงานเชื้อเพลิง

เต้าหลอมที่ใช้เชื้อเพลิงให้ความร้อนจากการสันดาปหลอมโลหะ เต้าหลอมเชื้อเพลิงที่ใช้อย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรมประเภทหล่อหลอมโลหะ ได้แก่ เต้าบ้า เต้าคิว โบลา และเต้าสะท้อนความร้อน

## 2.7 การระบายอากาศ

### 2.7.1 ความหมายของการระบายอากาศ

การระบายอากาศเป็นวิธีการควบคุมมลพิษอากาศที่ได้ผลดีเยี่ยมวิธีหนึ่งอาศัยหลักการเคลื่อนย้ายอากาศที่มีส่วนผสมของมลพิษนำออกไปจากสถานที่ทำงาน การระบายอากาศจึงหมายถึงการจัดการเคลื่อนย้ายอากาศด้วยปริมาณที่กำหนดให้ไหลไปในทิศทางและด้วยความเร็วที่ต้องการดังนั้นการระบายอากาศจึงสามารถกำจัดสิ่งปนเปื้อนในอากาศอันไม่พึงประสงค์

### 2.7.2 ประโยชน์จากการระบายอากาศ

1) การระบายอากาศสามารถควบคุมสิ่งปนเปื้อนที่อยู่ในอากาศ เช่น ฝุ่นละอองในห้องปฏิบัติงานให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยได้ ซึ่งถ้าได้รับเข้าสู่ร่างกายก็จะมีผลกระทบทำให้เป็นอันตรายต่อร่างกายได้ ถ้ามีระบบการระบายอากาศที่ดี สิ่งปนเปื้อนเหล่านี้จะถูกลดลงได้ในระดับที่ปลอดภัย



2) การระบายอากาศที่ดียังสามารถควบคุมอุณหภูมิและความชื้นให้อยู่ในระดับที่รู้สึกสบายได้ เพราะ ความร้อน และความชื้น ถ้าไม่เหมาะสมจะทำให้ป่วย หงุดหงิด อึดอัด และไม่สามารถทำงานได้แล้ว ยัง เป็นสาเหตุของอุบัติเหตุได้

### 2.7.3 ชนิดของการระบายอากาศ

การระบายอากาศที่ใช้เพื่อป้องกันอันตรายต่อสุขภาพ และป้องกันความเดือดร้อนต่อผู้ปฏิบัติงานในอาคารแบ่งได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่ 1) ระบบระบายอากาศพื้นที่ทั่วไป 2) ระบบระบายอากาศเฉพาะที่

#### 1) การระบายอากาศพื้นที่ทั่วไป

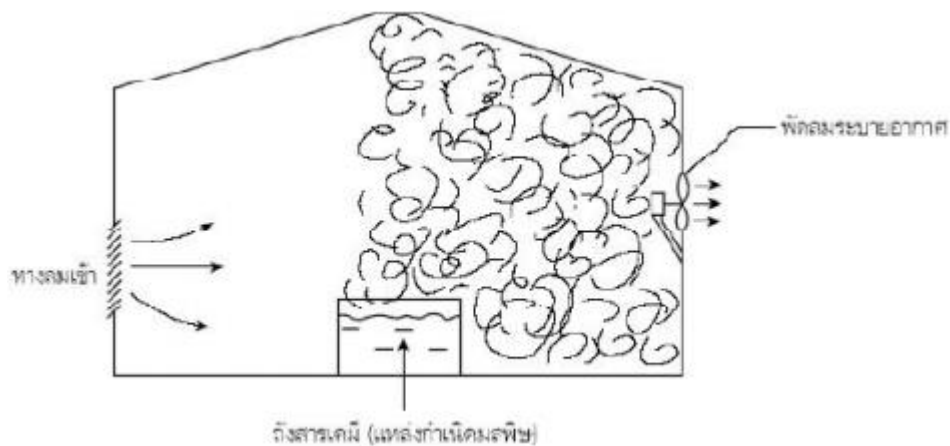
เป็นการระบายอากาศเพื่อลดความเข้มข้นของมลพิษที่ปนเปื้อนอยู่ในอากาศ โดยการทำให้เจือจางลงด้วยอากาศบริสุทธิ์จากภายนอก ทำให้มลพิษเหล่านั้นมีความเข้มข้นอยู่ในระดับที่ไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพหรือ ทำให้ไม่เกิดความเดือดร้อนรำคาญ

#### ข้อดี

1. การจัดทำกรอากาศง่ายกว่าแบบเฉพาะที่
2. เป็นวิธีการที่ประหยัด
3. ใช้ได้ดีกับมลพิษที่เป็นก๊าซ

#### ข้อจำกัด

1. ไม่สามารถที่จะกำจัดปริมาณมลพิษได้เพราะต้องใช้อากาศบริสุทธิ์ที่มากเพื่อเจือจาง



ภาพประกอบ 16 การระบายอากาศแบบทำให้เจือจาง

ที่มา: <http://www.kmgcasia-tech.com/wp-content/uploads/2019/01/Emission-Control-STD.pdf> (2012)

## 2) การระบายอากาศแบบเฉพาะที่

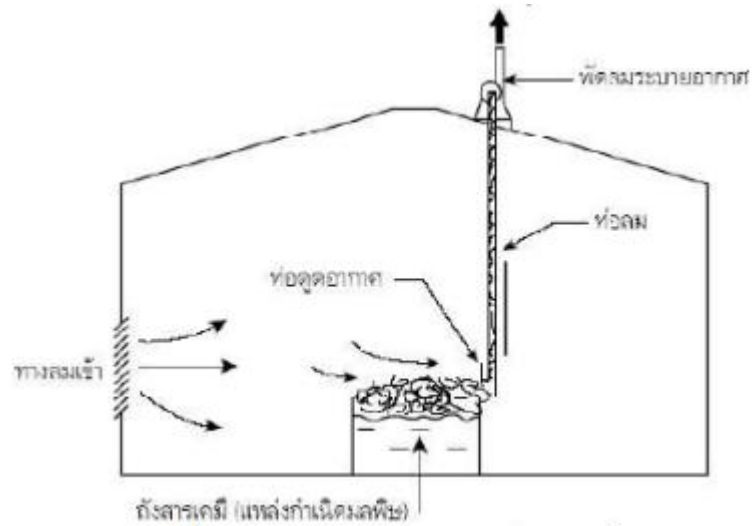
เป็นการระบายอากาศที่มีวัตถุประสงค์เหมือนกับการระบายอากาศแบบทั่วไป ซึ่งมีหลักการไป คือ การระบายอากาศแบบเฉพาะที่ใช้หลักการดูดระบายอากาศที่ถูกปนเปื้อนออกจากบริเวณที่เป็นจุดกำเนิดโดยตรง

### ข้อดี

1. เป็นการใช้ระบบระบายอากาศซึ่งกำจัดมลพิษที่ต้นกำเนิดทำให้มลพิษไม่ปนไปกับอากาศในห้อง
2. ใช้ได้ผลดีกับมลพิษ สิ่งปนเปื้อนหลายๆชนิดยิ่งกว่านั้นยังใช้ได้กับระดับความเป็นพิษมาก
3. ปริมาณอากาศที่ต้องนำออกไป หรือนำเข้ามาแทนมีไม่มากทำให้ประหยัดพลังงาน

### ข้อจำกัด

1. การจัดทำยากกว่า มีราคาแพงกว่า



ภาพประกอบ 17 การระบายอากาศแบบเฉพาะที่

ที่มา: <http://www.kmgcasia-tech.com/wp-content/uploads/2019/01/Emission-Control-STD.pdf> (2012)

## 2.8 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

### 2.8.1 กล้องจุลทรรศน์ (Microscope)

กล้องจุลทรรศน์คือเครื่องมือที่ขยายภาพ สิ่ง (Object หรือ substance) ที่มีขนาดเล็กที่ไม่สามารถเห็นด้วยตาเปล่าได้ ทำให้เห็นรายละเอียดมากขึ้นกว่าที่ตาเปล่าจะมองเห็นได้ กล้องจุลทรรศน์แบบเป็น simple one lens เป็นชนิดง่ายที่สุด ใช้เลนส์ 1 อัน คือ แว่นขยาย (magnifying lens) และ compound (multiple lens) ใช้เลนส์หลายอันเป็นเครื่องมือที่ใช้ขยายวัตถุ เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างภายในเซลล์ให้ละเอียดมากยิ่งขึ้น (วีระศักดิ์ และ อุดมกิจเดชา, 2543) กล้องจุลทรรศน์มีความสามารถที่จะขยาย (magnification) ได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับสิ่งต่อไปนี้

**2.8.1.1 Resolution (Resolving power)** คือความสามารถของเลนส์ของกล้องจุลทรรศน์ในการแยกจุดสองจุด ซึ่งอยู่ใกล้กันที่สุดให้เห็นแยกออกเป็นสองจุด เรียกความสามารถนี้

ว่า two points of discrimination ของคนมีค่า 0.2 มิลลิเมตร ซึ่งกำหนดโดย space ของ photoreceptor cells ใน Retina, Resolution ขึ้นอยู่กับ

- ระบบของแสง (optical system)
- ความยาวของคลื่นแสง (wavelength of the light source) ที่ผ่านเลนส์
- Numerical aperture (NA) ของเลนส์ที่อยู่ใกล้วัตถุ

นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นอีก เช่น ความหนาของ specimen (specimen thickness) คุณภาพของเนื้อเยื่อ (quality of fixation) และความเข้มของการย้อมสี (staining intensity) การหาค่าความสามารถของเลนส์ของกล้อง Limit of Resolution =  $0.61\lambda/NA$  ( $\lambda$  = wavelength, NA = numerical aperture)

**2.8.1.2 Numerical aperture (NA)** คือความสามารถของเลนส์ที่อยู่ใกล้วัตถุ (objective lens) ที่มีประสิทธิภาพในการเก็บรวบรวมแสงที่หักเหจากภายในวัตถุได้ละเอียด ดังสูตร

$$NA = n \sin \alpha$$

เมื่อ n = refractive index ของ medium

Sin  $\alpha$  = Sin ของ semi angle ของ aperture

Limit of resolution ให้ค่าเป็นตัวเลข และมีค่าเป็นส่วนกลับกับ resolving power เช่น เมื่อกล้องจุลทรรศน์มี resolving power ดี ค่าตัวเลขของ limit of resolution จะต่ำ คือ limit of resolution ยิ่งมีค่าน้อยก็ยิ่งทำให้เห็นภาพชัดเจนขึ้น

กล้องจุลทรรศน์โดยทั่วไป ประกอบด้วย 3 ระบบ คือ

**1. Illuminating system** เป็นระบบผลิตลำแสงให้พุ่งตรงไปตกยังชิ้นเนื้อ ประกอบด้วย

1.1 แหล่งผลิตลำแสง ได้แก่ หลอดไฟฟ้าและดวงอาทิตย์ แหล่งผลิตลำอิเล็กตรอน คือ เส้นทังสเตนที่ใช้กำลังไฟฟ้าแรงสูงผ่าน

1.2 Condenser lens คือ lens ที่ช่วยรวบรวมลำแสงที่กระจายออกจากแหล่งผลิต ให้เป็นลำพุ่งตรงไปตกที่ชิ้นเนื้อ เพื่อให้เกิดความเข้มของแสงมากที่สุด

1.3 Iris Diaphragm เพื่อควบคุมคุณภาพของแสงที่ผ่านทะลุ specimen

2. **Imaging system** คือระบบที่ประกอบด้วยเลนส์ชนิดต่าง ๆ มาประกอบกัน เพื่อรวบรวมลำแสงที่ผ่านออกจากชิ้นเนื้อนั้น เกิดเป็นภาพขยายใหญ่มากขึ้นตามลำดับ ได้แก่

2.1 Objective lens เป็นเลนส์ที่อยู่ใกล้วัตถุหรือชิ้นเนื้อ รวบรวมแสงที่ผ่านออกจากชิ้นเนื้อ แล้วให้ภาพขยายขึ้นมีขนาดกลาง

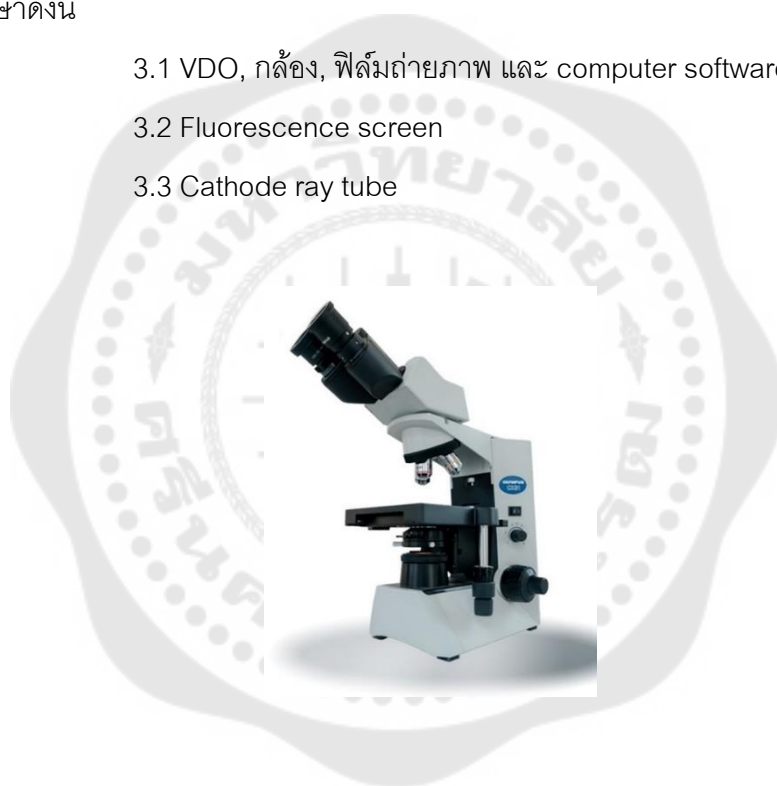
2.2 Projector lens (ocular lens หรือ eyepiece lens) เป็นเลนส์ที่อยู่ใกล้ตา และสามารถขยายภาพขนาดกลาง เพื่อให้ภาพสุดท้ายขยายใหญ่ขึ้น

3. **Image recording system** คือระบบที่บันทึกภาพที่ขยายสุดท้ายที่เกิดขึ้น เพื่อนำมาศึกษา ดังนี้

3.1 VDO, กล้อง, ฟิล์มถ่ายภาพ และ computer software

3.2 Fluorescence screen

3.3 Cathode ray tube



ภาพประกอบ 18 กล้องจุลทรรศน์ (Microscope)

ที่มา: <https://maritime.cmu.ac.th> (2020)

### 2.8.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (electron microscope) เกิดการคิดค้นเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพในการมองเห็นวัตถุของกล้องจุลทรรศน์ให้สามารถแจจแจงรายละเอียดของภาพได้มากขึ้นกว่าเดิม โดยการประยุกต์นำอิเล็กตรอนที่มีช่วงคลื่นสั้นกว่าคลื่นแสง นำมาใช้แทนคลื่นแสง

และใช้เลนส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้ามาแทนเลนส์กระจก และมีตัวตรวจวัดที่มาจับสัญญาณอิเล็กตรอนที่เกิดจากการที่ลำอิเล็กตรอนไปกระทบผิวตัวอย่าง

ในกรณีที่เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุประกอบอยู่ด้วย เรียกว่า กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนวิเคราะห์ (analytical electron microscope) โดยในการวิเคราะห์ธาตุจะเป็นการวิเคราะห์เฉพาะจุด (spot analysis) หรือพื้นที่เล็กๆ ที่ใช้อิเล็กตรอนเป็นหัววัด เรียกว่า อิเล็กตรอนโพรบไมโครแอนาไลซิส (Electron Probe Microanalysis, EPMA) โดยใช้ในการวิเคราะห์ธาตุด้วยการวัดรังสีเอกซ์เฉพาะตัว (characteristic x-ray) ซึ่งมีทั้งแบบเวฟเลงท์ดิสเพอร์ซีฟเอกซ์เรย์สเปกโทรโตเมทรี (Wavelength Dispersive X-ray Spectrophotometry, WDS) และแบบเอนเนอร์ยีดิสเพอร์ซีฟเอกซ์เรย์สเปกโทรโฟโตเมทรี (Energy Dispersive X-ray Spectrophotometry, EDS) (Goldstein และคนอื่น ๆ, 2017)

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เตรียมตัวอย่างโดยการขัดด้วยกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 320, 600, 800 และ 1,200 ตามลำดับ จากนั้นขัดด้วยผงอลูมินา ( $Al_2O_3$ ) ขนาด 1  $\mu m$  บนผ้าสักหลาด และตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 100 เท่า ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงยี่ห้อ Motic รุ่น BA310MET สำหรับการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยายสูง (1,000 เท่า) จะใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) และ (Energy dispersive X-ray spectrometry ,EDS) ยี่ห้อ BRUKER รุ่น Xflash 6160

## ทฤษฎีและหลักการเบื้องต้น

### หลักการเกิดภาพ

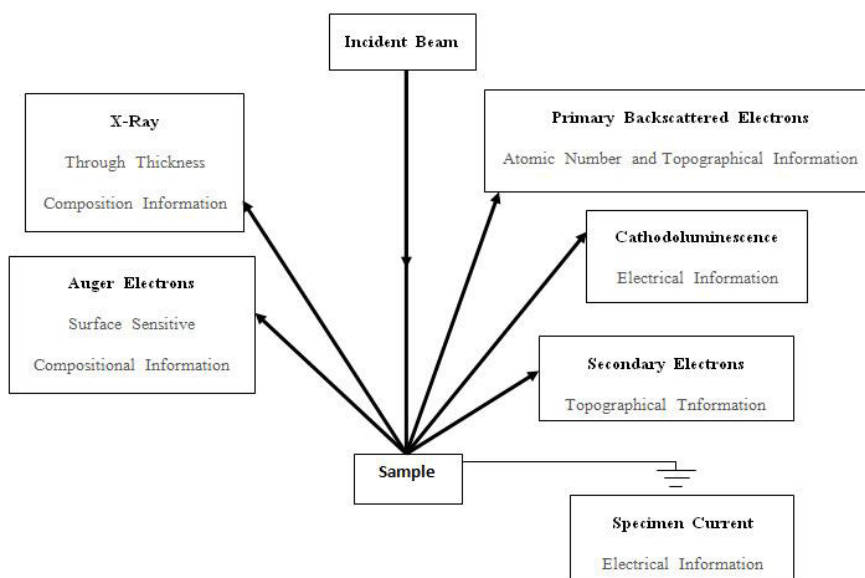
อิเล็กตรอนปฐมภูมิ (primary electron) จากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (electron gun) จะถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าสูง (1,000 ถึง 3,000 อิเล็กตรอนโวลต์ หรือมากกว่า) ที่สามารถปรับค่าได้จากนั้นจึงถูกดูดลงสู่เบื้องล่างโดยแผ่นอานอด (anode plate) ภายใต้ภาวะความดันสุญญากาศ  $10^{-5}$  ถึง  $10^{-7}$  ทอร์ และมีชุดคอนเดนเซอร์เลนส์ที่จะปรับอิเล็กตรอน (electron beam) ให้มีขนาดเล็กลงเพื่อเป็นการเพิ่มความเข้มของลำอิเล็กตรอน จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะวิ่งผ่านเลนส์วัตถุ ซึ่งทำหน้าที่ในการปรับลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิให้มีจุดโฟกัสบนผิวตัวอย่างพอดี และลำอิเล็กตรอนที่ตกกระทบผิววัตถุหรือตัวอย่างจะมีขนาดในช่วง 5 ถึง 200 นาโนเมตร โดยมีชุดขดลวดควบคุมการส่องกราด (scan coil) ของลำอิเล็กตรอนทำหน้าที่ในการควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนบนพื้นผิวตัวอย่าง ซึ่งผู้ใช้สามารถกำหนดได้โดยผ่านทางชุดควบคุม (control unit) ขณะที่ลำอิเล็กตรอนกระทบผิวตัวอย่างจะเกิดอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอะตอมธาตุในวัตถุหรือตัวอย่างและเกิดการถ่ายโอนพลังงานที่ขึ้นความลึก

จากพื้นผิวที่ระดับต่างๆ ทำให้เกิดการปลดปล่อยสัญญาณอิเล็กตรอน (electron signal) ชนิดต่างๆออกมา ซึ่งใช้ประโยชน์ต่างๆในการศึกษาลักษณะผิวของตัวอย่างและวิเคราะห์ธาตุที่มีในตัวอย่างได้ตามลักษณะสัญญาณภาพที่ได้จากสัญญาณอิเล็กตรอนชนิดต่างๆที่เกิด คือ

1. สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron Image , SEI) หรือเป็นกลุ่มอิเล็กตรอนพลังงานต่ำ 3 ถึง 5 อิเล็กตรอนโวลต์ เกิดที่พื้นผิวระดับไมลิก (ไม่เกิน 10 นาโนเมตร) โดยเกิดกับธาตุที่มีแรงยึดเหนี่ยวที่ผิวต่ำ

2. สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Backscattered Electron Image , BEI) หรือเป็นกลุ่มอิเล็กตรอนที่สูญเสียพลังงานให้กับอะตอมในชิ้นงานเพียงบางส่วน และกระเจิงกลับออกมา ซึ่งมีพลังงานสูงกว่าทุติยภูมิ เกิดที่พื้นผิวระดับลึกกว่า 10 นาโนเมตรโดยเกิดได้ดีกับธาตุที่มีเลขอะตอมสูง

3. สัญญาณภาพจากรังสีเอกซ์ (X-Ray Image , XRI) ชนิดที่เป็นรังสีเอกซ์เฉพาะตัวเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากอิเล็กตรอนในระดับชั้นโคจรต่างๆ ( K, L, M;....) ถูกกระตุ้น (excite) หรือได้รับพลังงานมากพอจนหลุดวงโคจรออกมา ทำให้อะตอมต้องรักษาสสมดุลของโครงสร้างรวมภายในอะตอมโดยการดึงอิเล็กตรอนจากชั้นโคจรถัดไปเข้ามาแทนที่



ภาพประกอบ 19 แสดงการเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอะตอมตัวอย่าง

ที่มา: <https://www.slideshare.net/ganesh904/scanning-electron-microscopy-79403904>

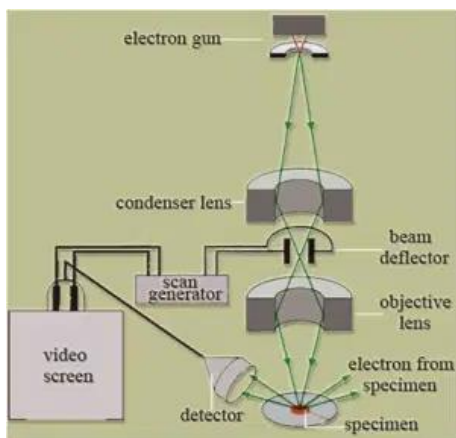
(2020)



ภาพประกอบ 20 แสดงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ที่มา: [http://science.buu.ac.th/p\\_art/mc/index.php/service-tools/sem.html](http://science.buu.ac.th/p_art/mc/index.php/service-tools/sem.html) (2016)

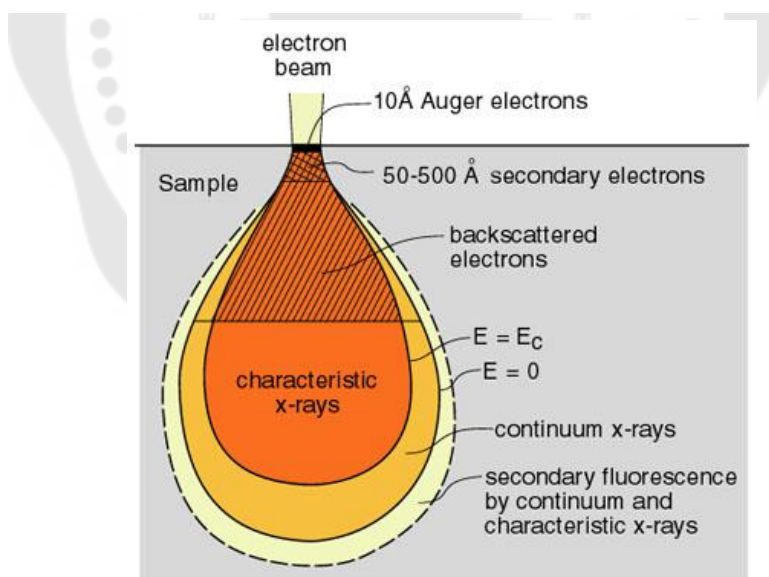




ภาพประกอบ 21 แสดงส่วนประกอบและการทำงานของเครื่อง SEM

ที่มา: <http://www.nano.kmitl.ac.th/index.php/tool/39-2009-06-05-03-28-18/218-scanning->

[eletron-microscopysem-.html](http://www.nano.kmitl.ac.th/index.php/tool/39-2009-06-05-03-28-18/218-scanning-) (2009)



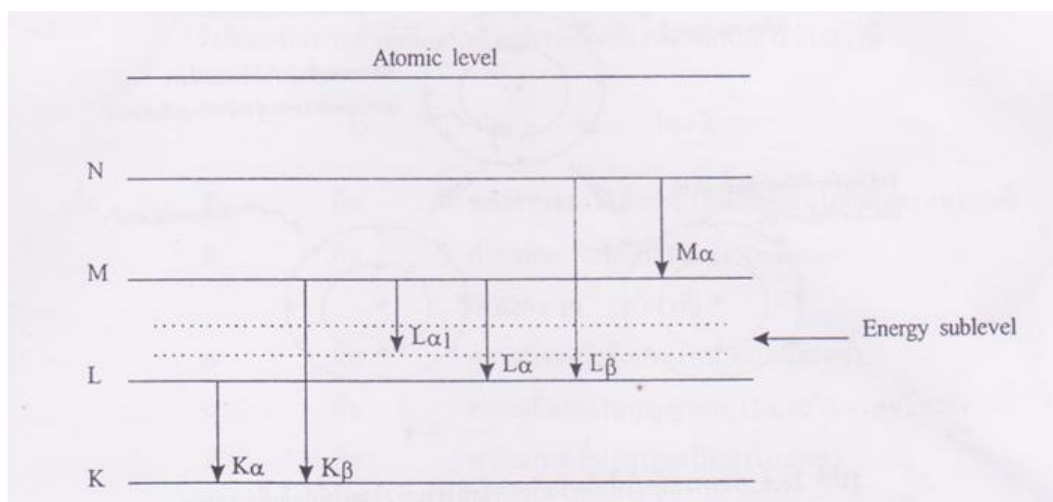
ภาพประกอบ 22 แสดงหลักการทำงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ที่มา: [http://mic.eng.ku.ac.th/facilities-detail.php?id\\_sub=42&id=39](http://mic.eng.ku.ac.th/facilities-detail.php?id_sub=42&id=39) (2020)

สัญญาณภาพจากอิลีคตรอนเหล่านี้จะถูกเปลี่ยนมาเป็นสัญญาณภาพปรากฏบนจอรับภาพได้โดยต้องเลือกใช้อุปกรณ์ในการตรวจวัดให้เหมาะสมกับสัญญาณแต่ละชนิด โดยทั่วไปสัญญาณอิลีคตรอนทุติยภูมิใช้ตัวตรวจวัดชนิดพลาสติกเรืองแสง (plastic scintillation detector) สัญญาณภาพจากอิลีคตรอนกระเจิงกลับจะใช้ตัวตรวจวัดที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีเอ็นจังก์ชัน (PN junction detector) หรือตัวตรวจวัดชนิดโรบินสัน (Robinson detector) และในสัญญาณภาพจากรังสีเอกซ์จะใช้หัววัดรังสีชนิดสารกึ่งตัวนำประเภทซิลิคอนลิเทียม (Lithium drifted silicon, Si(Li) ทำงานร่วมกับอุปกรณ์ในการวิเคราะห์พลังงานของรังสีเอกซ์เฉพาะตัว

### หลักการวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์

ในระบบวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์สำหรับ SEM นี้ใช้ระบบวิเคราะห์แบบ EDS ซึ่งเป็นระบบที่นิยมใช้กันมากในกล้องจุลทรรศน์อิลีคตรอนทั้งแบบส่องกราด เนื่องจากสามารถวิเคราะห์ธาตุที่มีอยู่ได้และใช้เวลาไม่นานเพียงไม่กี่นาทีซึ่งแตกต่างกับระบบการวิเคราะห์แบบ WDS ที่ใช้เวลาเป็นชั่วโมง โดยในแบบ EDS มีหลักการวิเคราะห์ คือ เมื่อลำอิลีคตรอนพลังงานสูงเคลื่อนที่เข้าชนอิลีคตรอนในวงโคจรชั้นในของอะตอม เช่น ชั้น K หรือ L แล้วเกิดการถ่ายโอนพลังงานให้แก่อิลีคตรอน ทำให้อิลีคตรอนในชั้นที่ได้รับพลังงานดังกล่าวมีพลังงานสูงขึ้นเกินพลังงานยึดเหนี่ยว (binding energy) ของชั้นโคจรจึงหลุดออกจากวงโคจรและทำให้เกิดที่ว่างของอิลีคตรอนในชั้นโคจร จากนั้นอะตอมที่อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นลดระดับพลังงานลงสู่สภาวะปกติในช่วงระยะเวลาอันสั้น (10-15 วินาที) โดยอิลีคตรอนของวงโคจรชั้นถัดออกไปจะลดระดับพลังงานลงมาให้เท่ากับพลังงานยึดเหนี่ยวของวงโคจรที่เกิดที่ว่างของอิลีคตรอน ด้วยการปล่อยพลังงานส่วนเกินในรูปของรังสีเอกซ์ แล้วอิลีคตรอนจะเข้ามาแทนที่พลังงานส่วนเกินนี้มีพลังงานเท่ากับค่าความต่างของระดับพลังงานยึดเหนี่ยวเฉพาะชั้นโคจรของอิลีคตรอน และเฉพาะของธาตุนั้นๆจึงมีค่าพลังงานเฉพาะค่า เราเรียกรังสีเอกซ์ชนิดนี้ว่า “รังสีเอกซ์เฉพาะตัว”



ภาพประกอบ 23 การเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่ระดับพลังงานของชั้นโคจรต่างๆ

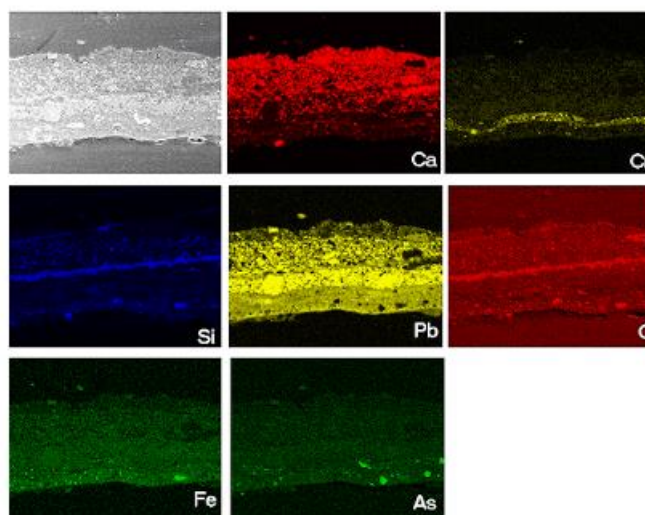
ที่มา: <http://www.nst.or.th/article/article494/article49418.htm> (2020)

ในระบบการวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์แบบ EDS หัววัดรังสีที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือ หัววัดรังสีแบบ Si(Li) ซึ่งเหมาะสำหรับการวัดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่มีพลังงานในช่วง 1 ถึง 30 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ หรือหัววัดชนิดเจอร์มาเนียมความบริสุทธิ์สูง (High Purity Germanium, HPGe) ซึ่งสามารถวัดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวได้ช่วงกว้างคือ 3 ถึง 200 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ อย่างไรก็ตาม แม้ว่าหัววัด HPGe จะสามารถวัดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวได้ช่วงกว้างกว่า แต่ในการวิเคราะห์ธาตุเบาหัววัดชนิด Si(Li) ซึ่งสามารถวัดได้ในย่านพลังงานต่ำ 1 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ก็ยังคงมีความจำเป็นอยู่มาก ทั้งนี้หัววัดรังสีเอกซ์ทั้ง 2 แบบ จะเปลี่ยนพลังงานของรังสีให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าในรูปของศักย์ไฟฟ้า โดยขนาดของสัญญาณไฟฟ้าที่ทางออกของหัววัดจะเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับพลังงานของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบบนหัววัด จากนั้นวงจรขยายแบบช่องเดียวหรือหลายช่องจะเก็บสัญญาณไฟฟ้าจากหัววัดในหน่วยความจำที่อยู่ภายในเครื่อง และแสดงผลวิเคราะห์บนจอภาพในรูปของสเปกตรัม พร้อมทั้งผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณและคุณภาพโดยโปรแกรมสำเร็จรูปที่มีอยู่ซึ่งมีความซับซ้อนแตกต่างกันไป

## รูปแบบการวิเคราะห์ธาตุในตัวอย่าง

การวิเคราะห์ธาตุในตัวอย่างโดยวิธี EPMA ในระบบ EDS หรือ WDS กระทำได้ 3 วิธีด้วยกัน คือ

1. การวิเคราะห์ส่องกราดเฉพาะพื้นที่ (area scan analysis) เรียกว่าเป็นการทำเอกซเรย์แมปปีง (X-ray mapping) เป็นการวิเคราะห์โดยใช้ลำอิเล็กตรอนส่องกราดบนผิวตัวอย่างเป็นพื้นที่เล็กๆ โดยความกว้างของพื้นที่ขึ้นกับกำลังขยายที่ใช้ และมีลักษณะการส่องกราดเป็นแนวจากซ้ายไปขวา และบนลงล่างเหมือนโทรทัศน์ รังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่พุ่งออกมาจากตัวอย่างจะเป็นจุดต่อจุด ภาพที่ได้จากการวิเคราะห์แบบนี้จะแสดงถึงลักษณะการกระจายของธาตุนั้นๆ



ภาพประกอบ 24 แสดงลักษณะการวิเคราะห์ด้วยวิธี X-ray Mapping

ที่มา: [https://www.researchgate.net/figure/a-SEM-micrograph-and-X-ray-mapping-along-the-cross-section-of-the-HVOF-sprayed-80Ni20Cr\\_fig3\\_321193126](https://www.researchgate.net/figure/a-SEM-micrograph-and-X-ray-mapping-along-the-cross-section-of-the-HVOF-sprayed-80Ni20Cr_fig3_321193126) (2021)

2. การวิเคราะห์ส่องกราดตามแนวเส้น (line scan analysis) เป็นการวิเคราะห์โดยใช้การส่องกราดลำอิเล็กตรอนเป็นแนวนอนบนตัวอย่าง ณ ตำแหน่งที่สนใจ เพื่อวัด

ความเข้มของรังสีเอกซ์เฉพาะตัว นิยมใช้ในกรณีที่ต้องการจะหาขอบเขต (boundary) ของรอยต่อหรือเฟสของโครงสร้าง

3. การวิเคราะห์เฉพาะจุด เป็นการวิเคราะห์ที่ให้ลำอิเล็กตรอนกระทบอยู่หนึ่งกับที่บนผิวตัวอย่าง ณ จุดที่ต้องการวิเคราะห์เพื่อวัดปริมาณรังสีเอกซ์เฉพาะตัวตรงจุดที่ต้องการ ความสามารถในการแจกแจงพลังงานในที่นี้ (energy resolution) สิ่งที่ต้องการวัด คือ รังสีเอกซ์เฉพาะตัวของแต่ละธาตุในตัวอย่างนั่นเอง

รังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่เกิดจากตัวอย่างจะมีพลังงานตามสมการข้างล่างนี้

$$E = hv = hc/\lambda$$

เมื่อ E คือ พลังงานของรังสีเอกซ์ (หน่วยเป็นกิโลอิเล็กตรอนโวลต์)

h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant) ( $6.626 \times 10^{-34}$  จูลวินาที)

V คือ ความถี่ของรังสีเอกซ์ (หน่วยเป็นเฮิรตซ์)

C คือ ความเร็วแสงในสุญญากาศ ( $3 \times 10^8$  เมตรต่อวินาที)

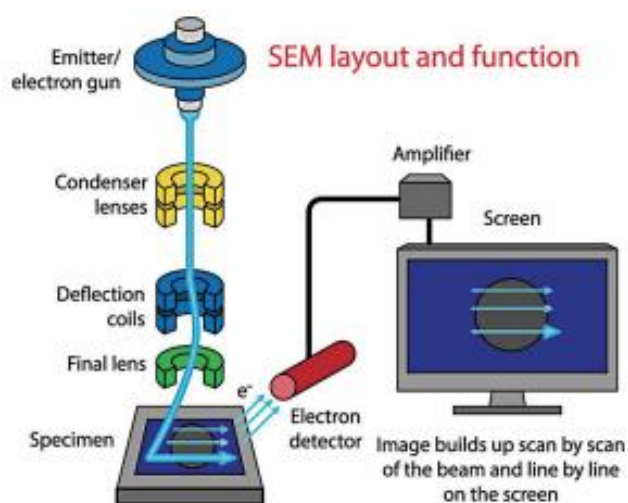
$\lambda$  คือ ความยาวคลื่น (หน่วยเป็นนาโนเมตร)

หลังจากผ่านหัววัดรังสีเข้าไปพลังงานถูกเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของปริมาณไฟฟ้า (ศักย์ไฟฟ้าหรือ กระแสไฟฟ้า) สเปกตรัมที่ได้จะมีลักษณะผิดไปคือแทนที่จะเป็นเส้นเดี่ยวๆห่างกันเป็นระยะๆตามค่าพลังงาน พีค (peak) ที่แสดงพลังงานของรังสีเอกซ์กลับมีลักษณะกว้างและทอดต่อเนื่องกันไปคล้ายเทือกเขา แต่ตำแหน่งของจุดสูงสุดของแต่ละพีคยังคงตรงกับพลังงานของรังสีเอกซ์ ความผิดเพี้ยนไปของสเปกตรัมดังกล่าวนี้เกิดจากความสามารถในการแจกแจงรายละเอียดของหัววัดแต่ละชนิด

### ส่วนประกอบและการทำงานของเครื่อง

ในเครื่อง SEM ประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลักๆที่สำคัญดังต่อไปนี้

1. แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (electron source)
2. อิเล็กโทรแมกเนติกเลนส์ (electromagnetic lens) หรือ ขดลวดทำหน้าที่ควบคุมการส่องกราดของลำอิเล็กตรอน
3. บั๊มสุญญากาศและระบบควบคุมความดัน (control pressure system)
4. ช่องใส่ตัวอย่าง (specimen chamber)
5. ตัวตรวจวัดสัญญาณอิเล็กตรอน (electron signal detector)
6. อุปกรณ์สร้างภาพ (imaging devices)



ภาพประกอบ 25 แสดงส่วนประกอบและหลักการทำงานเบื้องต้นของ SEM

ที่มา: <http://www.ammrf.org.au/myscope/sem/practice/principles/layout.php> (2020)

### ชนิดตัวอย่าง

1. วัสดุนำไฟฟ้า (conducting materials) จำพวกโลหะต่างๆที่ผ่านการขัดผิว (polishing) หรือ กัดผิว (etching) เรียบร้อยแล้ว สามารถนำมาวางติดบนแผ่นวางตัวอย่างเพื่อนำเข้าศึกษาโดย SEM ได้เลย

2. วัสดุไม่นำไฟฟ้า (non-conducting materials) ได้แก่ วัสดุจำพวกพอลิเมอร์ เซรามิก และวัสดุชีวภาพ เป็นต้น โดยวัสดุที่เป็นฉนวนนี้จะก่อให้เกิดความผิดปกติจากประจุ (charging artifacts) คือปรากฏการณ์ที่มีประจุไฟฟ้าสถิต หรือการสะสมของประจุอิเล็กทรอนิกส์จำนวนมากที่ผิวของวัสดุ ทำให้ภาพที่ได้มีความสว่างผิดปกติจนมองรายละเอียดในส่วนอื่นๆไม่เห็น ในการศึกษาตัวอย่างจำพวกนี้จึงต้องแก้ไขโดยลดการสะสมของประจุจำนวนมากเหล่านี้ ซึ่งทำได้โดยการให้แรงดันไฟฟ้าจำนวนน้อย (5 ถึง 15 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์) หรือการทำให้ตัวอย่างสามารถนำไฟฟ้าได้ดีขึ้นโดยการฉาบผิวตัวอย่างด้วยโลหะหนักที่มีโมเลกุลขนาดเล็กๆ เช่น ทอง คาร์บอน พัลลาเดียม และ โลหะผสมทอง – พัลลาเดียม เป็นต้น

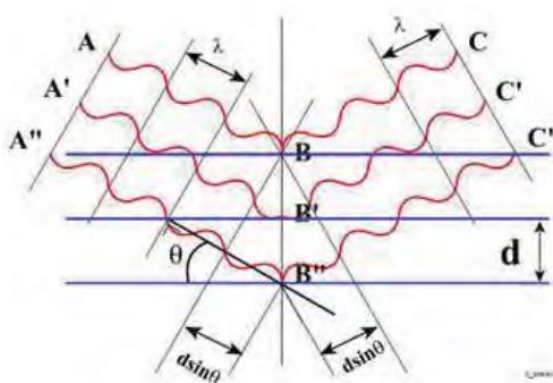
#### 2.8.4 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer ; XRD)

X-ray diffractometer (XRD) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุโดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สามารถทำการวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างได้อีกด้วย ในผลึกของตัวอย่างแต่ละชนิด จะมีขนาดของ Unit Cell ที่ไม่เท่ากัน ทำให้รูปแบบของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ที่ออกมาไม่เท่ากันทำให้เราสามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่างๆ กับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ได้ซึ่งจะทำให้เราทราบว่าในตัวอย่างนั้นมีสารประกอบอะไรอยู่บ้าง (Epp, 2016)

#### ทฤษฎีและหลักการ

หลักการทำงาน ใช้หลักการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เมื่อผ่านชั้นต่างๆของอะตอมหรือโมเลกุลภายในวัสดุหรือสารตัวอย่างนั้น แล้วทำการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มุมต่างๆ ข้อมูลที่ตรวจวัดได้เมื่อผ่านการแปรผลแล้ว ทำให้สามารถพิสูจน์เอกลักษณ์ (identification) โครงสร้างผลึกของวัสดุหรือสารตัวอย่างนั้นๆได้

เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างผลึกที่ไม่ลายชิ้นงานตัวอย่าง โดยรังสีเอกซ์จะเลี้ยวเบนไปตามช่องว่างระหว่างอะตอมภายในผลึกและถูกบันทึกค่า ซึ่งทำการวิเคราะห์ของโครงสร้างผลึก โดยระยะห่างระหว่างอะตอมนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการของ Bragg ดังภาพประกอบ 26 และจะเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์อีกครั้งรังสีเอกซ์ ซึ่งสามารถอธิบายและเขียนเป็นสมการดังภาพประกอบ 27 ตามกฎของเซอร์ ดับบลิว เอช แบรกก์ นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษ โดยอาศัยหลักการฟิสิกส์โดยการเลี้ยวเบนโดยใช้รังสีเอกซ์ XRD เพื่ออธิบายโครงสร้างของผลึกเมื่อ ตกกระทบเข้ากับรังสีเอกซ์ ด้วยมุมตกกระทบที่แตกต่างกัน โดยระยะห่างและความยาวคลื่นที่เปลี่ยนแปลงไป (ศุภฤกษ์ เห็นประเสริฐแท้, 2555)

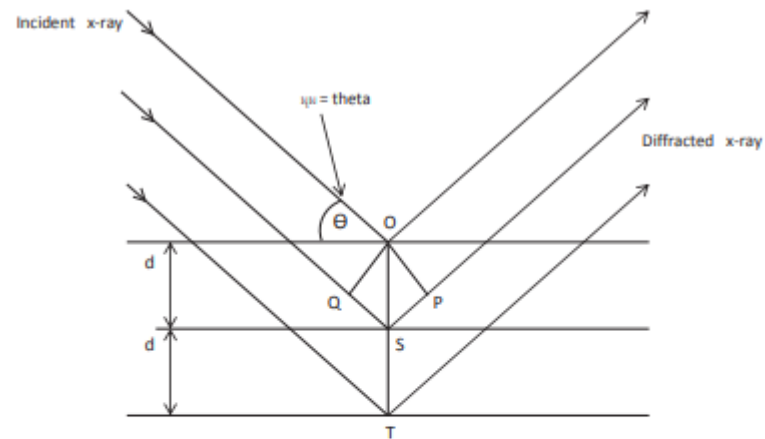


ภาพประกอบ 26 หลักการของ Bragg's law ในการคำนวณค่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

ที่มา: <http://www.mfu.ac.th/center/stic/index.php/x-ray-analysis-instrument> (2557)







$$\sin \theta = \frac{QS}{d} = \frac{SP}{d}$$

$$d \sin \theta = QS = SP$$

$$QS + SP = 2d \sin \theta$$

$$n\lambda = QS + SP$$

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

โดยกำหนดให้ ดังนี้

$\lambda$  = ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

$\theta$  = มุมตกกระทบระหว่างรังสีเอกซ์กับระนาบในผลึก

$d$  = ระยะห่างระหว่างระนาบในผลึก

$n$  = ลำดับการเลี้ยวเบน โดยเป็นเลขจำนวนเต็ม

ภาพประกอบ 27 การกำเนิดรังสีเอกซ์

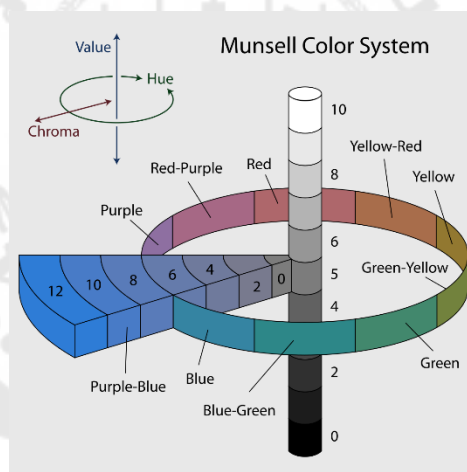
ที่มา: <http://www.vijairid.com/x-ray%technic.htm> (2014)

## 2.8.5 ระบบการวัดสี

แสงจากแหล่งกำเนิดแสง เมื่อตกกระทบวัตถุที่มีสีจะเกิดปรากฏการณ์การสะท้อนของแสงที่พื้นผิวของวัตถุ ที่มีความเงามัน เรียกว่า การสะท้อนที่สมบูรณ์ (Specular reflection) ถ้าพื้นผิวไม่เรียบ ไม่มีความเงามัน เมื่อแสงส่องผ่านเข้าไปกระทบกับวัตถุนั้นจะเกิดการกระเจิงของแสง และอนุภาคของสีในบางช่วงคลื่นจะถูกดูดกลืนเอาไว้ บางช่วงคลื่นจะถูกสะท้อนออกมาทำให้เกิดการมองเห็นสีแตกต่างกันตามความยาวช่วงคลื่นที่มีการสะท้อนออกมา (Berns, Motta, และ Gorzynski, 1993)

### 2.8.5.1 ระบบ Munsell

เป็นระบบที่ได้มีการพัฒนามาก่อนการนำเครื่องมือวัดสีมาใช้ในการวัดสี โดยการใช้สายตา และอาศัยสมบัติของการมองเห็นสี ซึ่งต้องอาศัยประสบการณ์ความคิดมนุษย์ในการวัดสี ระบบนี้จัดเป็นระบบที่ตรงกับที่สายตามนุษย์

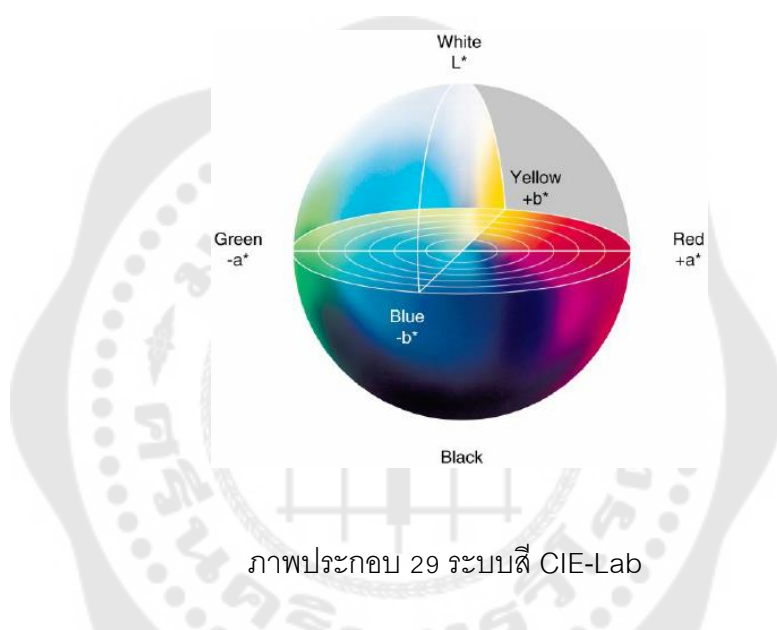


ภาพประกอบ 28 ระบบสี Munsell

ที่มา: [https://en.wikipedia.org/wiki/Munsell\\_color\\_system](https://en.wikipedia.org/wiki/Munsell_color_system) (2006)

### 2.8.5.1 ระบบ CIE

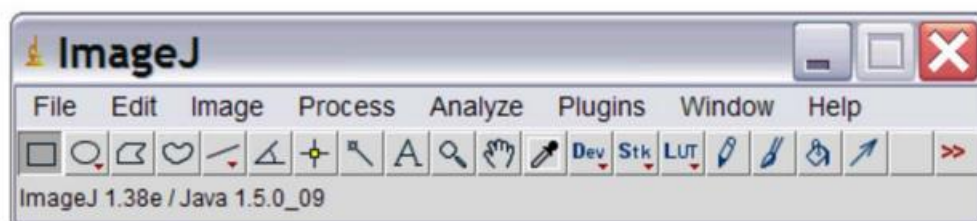
คณะกรรมการวิชาการระหว่างประเทศของแสง (Commission International de l' Eclairage :CIE) ได้พัฒนาระบบของการวัดสีในรูปของวัตถุ โดยไม่ต้องอาศัยประสบการณ์ หรือความคิดของมนุษย์ในการวัดสี โดยการเลียนแบบการมองเห็นสีของมนุษย์ และกำหนดตัวแปรของสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน พร้อมฟังก์ชันที่ใช้ปรับค่าสี (Berns และคนอื่น ๆ, 1993) มีการสร้างฟังก์ชันสำหรับ “ผู้สังเกต” เป็นมาตรฐานสำหรับเม็ดสีทั้ง 3 คือ  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$  ดังภาพประกอบ 29



ภาพประกอบ 29 ระบบสี CIE-Lab

ที่มา: [researchgate.net/figure/CIE-LAB-1976-color-space\\_fig2\\_263697963](https://www.researchgate.net/figure/CIE-LAB-1976-color-space_fig2_263697963) (2014)

## 2.8.6 โปรแกรม ImageJ



ภาพประกอบ 30 หน้าต่างโปรแกรม ImageJ

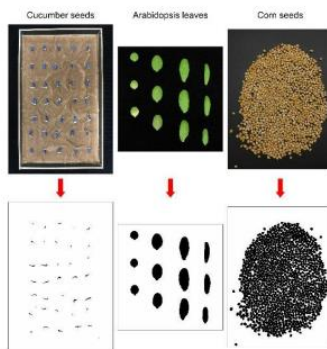
ที่มา: <https://imagej.en.softonic.com> (2022)

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองนี้จะใช้โปรแกรม “ImageJ” ซึ่ง ImageJ เป็นโปรแกรมที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดย Wayne Rasband (Schneider, Rasband, และ Eliceiri, 2012) และ The national Institute of Health (NIH) ประเทศสหรัฐอเมริกา โปรแกรมนี้ถูกเขียนมาเพื่ออำนวยความสะดวกในการวิเคราะห์ข้อมูลจากรูปภาพ ตัวอย่างเช่น การนับจำนวนเซลล์ที่ได้จากการหาพื้นที่ของวัตถุ เป็นต้น โดยทำการวัดอนุภาคที่ปรากฏอยู่ในรูปภาพ นอกจากนี้ยังได้มีการพัฒนาขนาดของการวิเคราะห์และการกระจายตัวของภาคตัดขวางของวัตถุ และประยุกต์ใช้เพื่อหาคุณสมบัติของวัสดุอีกวิธีหนึ่ง เป็นโปรแกรมวิเคราะห์ภาพที่ให้ผลการดาวน์โหลดได้ฟรีและยังมีการเปิด Source Code ให้มีการพัฒนาอีกด้วย

ในปัจจุบันได้มีการนำมาใช้มากขึ้นในการวิเคราะห์ทางวิทยาศาสตร์ มีข้อดีโดยสังเขปดังนี้

1. การนำภาพมาวิเคราะห์ สามารถเลือกภาพถ่ายที่มีขนาด 8 บิต , 16 บิต และ 32 บิต
2. สกุลไฟล์ภาพที่นำมาวิเคราะห์ได้แก่ TIFF, GIF, JPEG, BMP, DICOM, FITS และ Raw
3. สามารถคำนวณพื้นที่และปริมาณ pixel ตามการเลือกพื้นที่ของผู้ใช้ กำหนดรูปแบบผ่านโหมด constant manipulation, sharpening, smoothing, edge detection และ median filtering
4. ดาวน์โหลด Plugin ตามลักษณะที่สนใจได้
5. เปิดกว้างการพัฒนา source code สำหรับผู้สนใจและพัฒนาโปรแกรม

นอกจากนี้ ImageJ เป็นโปรแกรมที่มีประโยชน์อย่างมากในงานวิจัยที่จำเป็นต้องวัดระยะหรือพื้นที่ของวัตถุบนภาพที่ถ่ายจากกล้อง microscope หรือ Scanning electron microscope (SEM) อีกด้วย



ภาพประกอบ 31 แสดงภาพที่วิเคราะห์จากโปรแกรม ImageJ

ที่มา: <https://edis.ifas.ufl.edu/publication/HS1405> (2021)

### 2.8.6 การวัดความเงา

ความมันหรือความเงา คือ ปริมาณทางกายภาพที่ใช้ประเมินความสามารถในการสะท้อนแสงของพื้นผิวของวัสดุภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด โดยในงานวิจัยนี้ทางผู้วิจัยได้ใช้ เครื่องวัดความเงา (Gloss meter) ในการทำการทดลองดังภาพประกอบ 32



ภาพประกอบ 32 เครื่องวัดค่าความเงา (Gloss meter)

ที่มา: <http://www.3nh.com/en/product/209-299.html> (2022)

เครื่องวัดความเงา (Gloss meter) คือ เครื่องวัดคุณสมบัติการสะท้อนแสงบนพื้นผิวของวัตถุ วัตถุที่ใช้ทดสอบมีหลากหลายประเภทซึ่งมีคุณลักษณะที่แตกต่างกัน เช่น อโลหะ (Non-

metal) มีคุณสมบัติการสะท้อนมากเมื่อมีมุมในการวัดมาก (วัดจากเส้นตั้งฉากวัตถุ) หรือโลหะ (Metal) มีคุณสมบัติการสะท้อนแสงได้จากมุมเล็ก เห็นได้ว่าวิธีการวัดค่าความเงาจึงมีมุมที่แตกต่างกันไปตามประเภทวัตถุทดสอบ การประยุกต์ใช้งาน Gloss meter มีใช้งานกันอย่างแพร่หลายสำหรับควบคุมคุณภาพสินค้าในภาคอุตสาหกรรม เช่นอุตสาหกรรมรถยนต์ สแตนเลส เป็นต้น (Arney, Ye, และ Banach, 2006)

ส่วนประกอบทั่วไปของเครื่องวัดความเงา (Gloss meter) จะมีส่วนประกอบดังนี้

1.หลอดไฟ (Lamp) ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงฉายบนผิวทดสอบ โดยแสงจากหลอดไฟนั้นต้องผ่านเลนส์ 2 ชั้นเพื่อควบคุมลักษณะแสงที่ตกกระทบผิวทดสอบให้เป็นเส้นขนาน

2.Filter Detector ทำหน้าที่ตรวจวัดแสงที่สะท้อนจากผิวตัวอย่าง

หน่วยการวัดความเงาของ Gloss meter

หน่วยการวัดความเงาใช้สัญลักษณ์ GU (Gloss Unit) ในอุตสาหกรรมที่วัดความเงาในช่วง 0-100 GU ได้แก่ อุตสาหกรรมพลาสติก เคลือบสี (Non-metallic Coating) ส่วนอุตสาหกรรมที่วัดความเงาของวัสดุที่มีความสูงกว่า เช่น กระจกเงา ต้องใช้ Gloss meter ที่มีย่านการวัดความเงาสูงถึง 2000 GU หากวัสดุที่มีความเงาสูงกว่า 2000 GU เช่น วัสดุโปรงใส จะไม่ใช่หน่วยวัด GU แต่จะใช้เป็นค่าเปอร์เซ็นต์ของแสงที่ตกกระทบ

### บทที่ 3

## วิธีดำเนินงานวิจัย

#### แผนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยที่สามารถนำประยุกต์ไปใช้ได้จริงในอุตสาหกรรม มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาการผลิตแท่งถลุงดำปราศจากตะกั่ว เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยการเย็นตัวที่ส่งผลต่อคุณภาพของแท่งถลุงดำปราศจากตะกั่ว และเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของยาถลุงที่ไปใช้ในเชิงพาณิชย์โดยมีขั้นตอนดังนี้

- 1.ศึกษาค้นคว้าหาข้อมูลเกี่ยวกับเรื่องแท่งถลุงแบบดั้งเดิมและแท่งถลุงดำปราศจากตะกั่ว
- 2.จำแนกวัตถุดิบออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้
  - 2.1 สูตรการผลิตแท่งถลุงดำปราศจากตะกั่วที่มีการจดสิทธิบัตร
  - 2.2 สูตรที่ทำการเพิ่มธาตุอินเดียมลงไปในส่วนผสม
  - 2.3 สูตรที่ทำการเพิ่มสารบัดกรีเข้าไปในส่วนผสม
- 3.ผลิตแท่งถลุงดำปราศจากตะกั่วโดยกระบวนการหลอมมือโดยใช้หัวเป่าไฟ (Torch Melting) และผลิตด้วยกระบวนการหลอมด้วยเครื่องเตาหลอมเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Induction Melting Furnace)
- 4.ทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติเครื่องมือของเตาหลอมเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Induction Melting Furnace) เพื่อที่จะได้ทราบคุณสมบัติที่แท้จริงในการผลิต
- 5.วิเคราะห์หาชนิดของธาตุและปริมาณของธาตุที่อยู่ในแท่งถลุงดำปราศจากตะกั่วที่ทำการหลอมด้วยหัวเป่าไฟ (Torch Melting) และกระบวนการหลอมด้วยเครื่องเตาหลอมเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Induction Melting Furnace) ด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence Spectroscopy)
- 6.ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของแท่งถลุงดำปราศจากตะกั่ว ด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดแสง (Light microscope)
- 7.สร้างชุดทดสอบสำหรับงานวิจัย คือ ชุดแบบสอบถามในการวัดความพึงพอใจของช่างหลังจากใช้งานจริง
- 8.ทดลองการใช้งานจริง แท่งถลุงดำปราศจากตะกั่วที่ผลิตโดยใช้วัตถุดิบทั้ง 3 สูตร และเก็บข้อมูลจากแบบสอบถามโดยแบ่งแบบสอบถามไว้ทั้งหมด 3 ด้าน คือ

8.1 ด้านการไหลของแก๊สยาถม

8.2 ด้านการติดแน่นของแก๊สยาถม

8.3 ด้านสีภายหลังจากการลงถม

9. นำชิ้นงานเงินที่ทำการทดลองการใช้งานจริง ทำการหาคุณภาพของชิ้นงานด้วยเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ โดยแบ่งไว้ทั้งหมด 3 ด้าน คือ

9.1 ด้านสีของชิ้นงาน

9.2 ด้านรูพรุนของชิ้นงาน

9.3 ด้านความเงาของชิ้นงาน

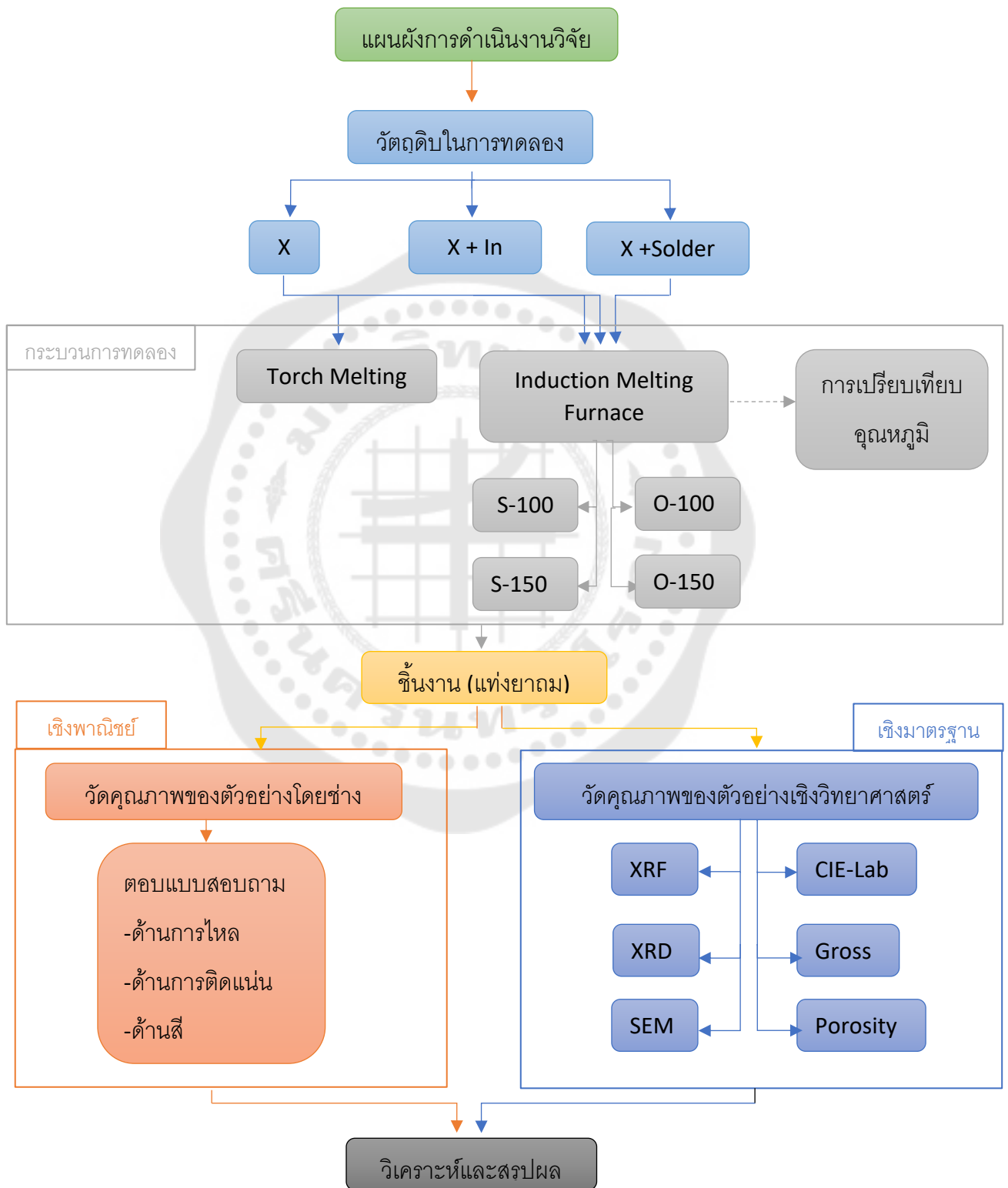
10. ศึกษาโครงสร้างจุลภาคในแก๊สยาถมดำปราศจากตะกั่วด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope)

11. รวบรวม วิเคราะห์ผลการทดลอง และสรุปผลการทดลอง





การทดลองทั้งหมดแสดงให้เห็นดังแผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน



ภาพประกอบ 33 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงาน

### 3.1 วิธีการทำแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่วด้วยกระบวนการหลอมมือโดยใช้หัวเป่าไฟ (Torch Melting) และศึกษาลักษณะหน้าตัดแท่งยาถม

#### 3.1.1 การทำแท่งยาถมด้วยกระบวนการหลอมมือโดยใช้หัวเป่าไฟ (Torch Melting)

เพื่อให้ทราบกระบวนการทำแท่งยาถมดำแบบดั้งเดิม (การใช้หัวเป่าไฟในการให้ความร้อนแก่แบ็กกราไฟต์) และดูผลลัพธ์เพื่อนำมาวิเคราะห์ผลการทดลอง

ตาราง 3 แสดงส่วนผสมของแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่ว

ยาถมดำปราศจากตะกั่ว	Sn (wt %)	Ag (wt %)	Cu (wt %)	S (wt %)
สูตร	8 – 10	17 – 20	22 – 24	49 – 51

#### วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

##### 1. ดีบุกแท่ง



ภาพประกอบ 34 แสดงลักษณะของดีบุกแท่ง

## 2. เม็ดเงิน



ภาพประกอบ 35 แสดงลักษณะของเม็ดเงิน

## 3. เม็ดทองแดง



ภาพประกอบ 36 แสดงลักษณะของเม็ดทองแดง

## 4.ผงกำมะถัน



ภาพประกอบ 37 แสดงลักษณะของผงกำมะถัน

## 5.แท่งกราไฟต์



ภาพประกอบ 38 แสดงลักษณะของแท่งกราไฟต์

## 6. เบ้ากระดาศ



ภาพประกอบ 39 แสดงลักษณะของเบ้ากระดาศ

## 7. หัวเป่าไฟ



ภาพประกอบ 40 แสดงลักษณะของหัวเป่าไฟ

## 8.รางเทเหล็ก



ภาพประกอบ 41 แสดงลักษณะของรางเทเหล็ก

## วิธีการทำการทดลอง

1. นำส่วนผสมของแดง เงิน ดีบุก และผงกำมะถันตามอัตราส่วนในตารางที่ 3
2. การใช้หัวเป่าไฟ เป่าไฟที่เข้ากระดาษ สังเกตเห็นว่าโลหะเงินกับโลหะทองแดงละลายเข้ากัน จะสังเกตเห็นด้วยสายตานั้นโลหะจะมีลักษณะเป็นน้ำโลหะใส จึงทำการใส่โลหะดีบุก
3. ทำการใส่ผงกำมะถันลงในให้ครบตามที่กำหนดแล้วควนด้วยแท่งแกรไฟต์
4. ทำการเทลงรางเท



ภาพประกอบ 42 แสดงขั้นตอนการหลอมแท่งยาถมดำด้วยกระบวนการหลอมมือ

### 3.2 วิธีการทำแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่วด้วยกระบวนการหลอมด้วยเตาหลอมเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Induction Melting Furnace)

#### 3.2.1 การทำแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่วโดยใช้กระบวนการหลอมด้วยเตาอินдукชัน (Induction Melting Furnace)

เพื่อทำการเรียนรู้พัฒนาฝีมือของผู้วิจัย โดยผู้วิจัยทำการสังเกตจากภาพทดลองที่ 3.1.1 คือ กระบวนการหลอมมือ (ใช้หัวเป่าไฟในการให้ความร้อน)

#### วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- 1.เตาอินдукชัน (Induction Melting Furnace) ทั้งหมด 2 เครื่อง



ภาพประกอบ 43 แสดงลักษณะของเตาอินдукชัน

- 2.เบ้ากราไฟต์จำนวน 2 อัน



ภาพประกอบ 44 แสดงลักษณะของเบ้ากราไฟต์

3. เบ้าเซรามิกจำนวน 2 อัน



ภาพประกอบ 45 แสดงลักษณะของเบ้าเซรามิก

4. แม่พิมพ์ขนาด 5 mm จำนวน 1 ชิ้น



ภาพประกอบ 46 แสดงลักษณะแม่พิมพ์ขนาด 5 mm

5. เม็ดเงิน แสดงดังภาพประกอบ 35

6. เม็ดทองแดง แสดงดังภาพประกอบ 36

7. แท่งดีบุก แสดงดังภาพประกอบ 34

8. ผงกำมะถัน แสดงดังภาพประกอบ 37



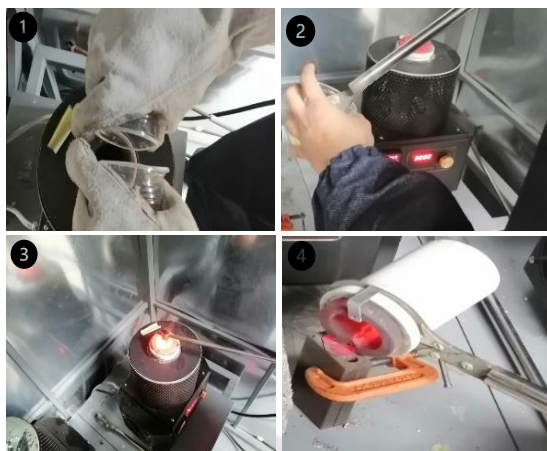
9. แท่งกราฟไฟต์พร้อมด้ามจับทั้งหมด 1 อัน
10. ภาชนะที่ใส่ส่วนผสมทั้งหมด 8 ใบ
11. ช้อนในการตักผงกำมะถันจำนวน 1 คัน
12. ฝาปิดเซรามิคเตาอินดักชั่นจำนวน 1 ชิ้น ดังภาพประกอบ 47



ภาพประกอบ 47 แสดงลักษณะของฝาปิดเซรามิคของเตาอินดักชั่น

#### วิธีการทดลอง

1. กำหนดอุณหภูมิของเตาอินดักชั่นเริ่มต้นที่  $800^{\circ}\text{C}$  จากนั้นทำการเติมโลหะเงินและโลหะทองแดงตามอัตราส่วนตารางที่ 3
2. ทำการปรับอุณหภูมิของเตาอินดักชั่นที่อุณหภูมิ  $750-800^{\circ}\text{C}$  จากนั้นทำการใส่โลหะดีบุกตามอัตราส่วนตามตารางที่ 3
3. ทำการปรับอุณหภูมิของเตาอินดักชั่นที่อุณหภูมิ  $650^{\circ}\text{C}$  หลังจากนั้นทำการใส่ผงกำมะถันตามอัตราส่วนที่กำหนดตามตารางที่ 3 และทำการกวนด้วยแท่งกราฟไฟต์
4. ทำการเพิ่มอุณหภูมิของรางเท แล้วนำยาถมจากเบ้าเทลงรางเท
5. ทำการทดลองเพิ่มเติมตามตารางที่ 4



ภาพประกอบ 48 ขั้นตอนการหลอมแท่งยาถมด้วยการใช้เตาอินดักชั่น

ตาราง 4 แสดงเงื่อนไขการทดลองทำแท่งยาถมหลอมโดยใช้เตาอินดักชั่น

ตัวอย่าง	อุณหภูมิเตาตุ กัมมะถัน (°C)	การทดลอง	อุณหภูมิ แม่พิมพ์ (°C)	เพิ่มเติม
A	650 °C	กวนอย่างเดียว	100 °C	N/A
B	650 °C	กวนอย่างเดียว	150 °C	N/A
C	650 °C	กวนและบ่ม	100 °C	N/A
D	650 °C	กวนและบ่ม	150 °C	N/A
E	650 °C	กวนและบ่ม	150 °C	ธาตุอินเดียม
F	650 °C	กวนและบ่ม	150 °C	สารบัดกรี

### 3.2.2 การทำแท่งยามดำปราศจากตะกั่วโดยใช้เตาอินดักชั่น (Induction Melting Furnace) โดยทำการกำหนดเวลาในการผลิตแท่งยามดำปราศจากตะกั่วให้ชัดเจน

ผู้วิจัยทำการตรวจสอบผลของแท่งยามดำโดยทางผู้วิจัยได้ทำการออกแบบกระบวนการทดลองชัดเจนในการผลิตเพื่อสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้

#### วิธีการทำการทดลอง

ทางผู้วิจัยทำการแบ่งเงื่อนไขการทดลองทั้ง 4 การทดลอง ได้แก่

1. การกวนอย่างเดี่ยวและเทลงอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ 100 °c
2. การกวนอย่างเดี่ยวและเทลงอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ 150 °c
3. การกวนและปั๊มและเทลงอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ 100 °c
4. การกวนและปั๊มและเทลงอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ 150 °c

ในกระบวนการทดลองของการกวนและปั๊มและเทลงอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ 150 °c จะมีการทดลองเพิ่มเติมโดยจะมีการเพิ่มธาตุอินเดียม (Indium) และเพิ่มสารบัดกรีเชื่อม (Solder) เข้ามาในกระบวนการผลิตซึ่งในแต่ละการทดลองนั้นจะนำไปทดสอบคุณภาพของชิ้นงานในเชิงคุณภาพของการลงถม และการตรวจสอบคุณภาพของชิ้นงานในเชิงวิทยาศาสตร์

### 3.3 ทำการวัดอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) โดยทำการเปรียบเทียบกับอินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์ (Infrared Thermometer)

ผู้วิจัยทำการตรวจสอบอุณหภูมิที่แสดงที่เตาอินดักชั่นวัดโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลในการวัด โดยทำการเปรียบเทียบกับอินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์

#### วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

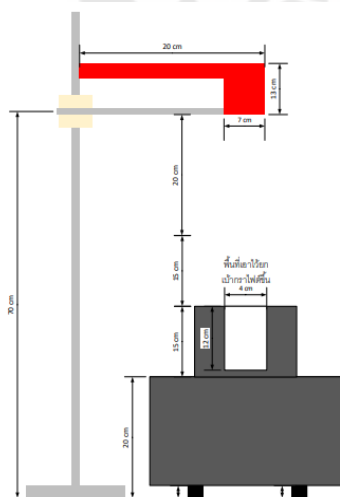
1. เตาดินดักชั่นทั้งหมด 1 เครื่อง ดังภาพประกอบ 43
2. เบ้ากรราไฟต์จำนวน 1 อัน ดังภาพประกอบ 44
3. เบ้าเซรามิคจำนวน 1 อัน ดังภาพประกอบ 45
4. เม็ดเงิน ดังภาพประกอบ 35
5. ตีบุกแท่ง ดังภาพประกอบ 34
6. อินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์ ดังภาพประกอบ 49



ภาพประกอบ 49 แสดงลักษณะของอินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์

### วิธีการทดลอง

1. ทำการติดตั้งอุปกรณ์ตามภาพประกอบ 50
2. ทำการทดลองโดยใช้ธาตุดีบุก (จุดหลอมเหลว  $231.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) และ ธาตุเงิน (จุดหลอมเหลว  $962\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) หลังจากนั้นทำการเพิ่มอุณหภูมิของเตาอินดักชั่น (Induction Melting Furnace) จนถึงจุดหลอมเหลวของธาตุที่กล่าวมาข้างต้น
3. อ่านค่าอุณหภูมิของเตาอินดักชั่น (Induction Melting Furnace) แล้วทำการเปรียบเทียบกับอินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์ (Infrared Thermometer) หลังจากนั้นบันทึกค่าโดยทำการบันทึก 5 ครั้ง ใน 1 นาที



ภาพประกอบ 50 การติดตั้งการวัดอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ในการเทียบกับอินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์ (Infrared Thermometer)

### 3.4. การนำแท่งยาถมที่ทำการผลิตนำส่งไปทดสอบให้ช่างลงถมทำการทดสอบ

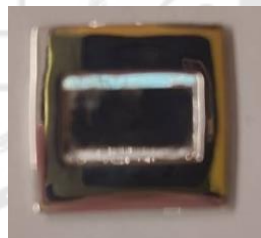
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการให้ตรวจสอบในคุณภาพในเชิงช่างซึ่งผู้วิจัยได้ทำการทำสร้างแบบประเมินลักษณะที่ดีของแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่วเพื่อสามารถที่จะรับรู้ถึงคุณภาพของแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่ว

#### วิธีทำการทดลอง

1.ทำการเตรียมแท่งยาถมเพื่อจะนำส่งให้ช่างลงถม พร้อมกับแบบสอบถามให้ช่างลงถมเพื่อที่ช่างลงถมจะได้ทำการกรอกคะแนนซึ่งจะบ่งบอกถึงคุณภาพของแท่งยาถม มีช่างประเมินทั้งหมด 3 ท่าน โดยผู้วิจัยทำการเตรียมชิ้นงานเงินให้ช่างลงถม ได้แก่ 1. ชิ้นงานเงินแผนที่ประเทศไทย 1 ชิ้น 2. ชิ้นงานเงินแผ่นสี่เหลี่ยม 3 ชิ้น โดยทั้งหมดที่กล่าวมา คือต่อ 1 เงื่อนไขการทดลอง โดยชิ้นงานแสดงดังภาพประกอบ 51ก) และ 51ข) และตัวอย่างแบบสอบถามที่ทำการให้ช่างตอบแบบประเมินดังภาพประกอบ 52



ก.



ข.

ภาพประกอบ 51 ก)ลักษณะชิ้นงานเงินแบบแผนที่ประเทศไทย ข)ชิ้นงานเงินแบบสี่เหลี่ยม

เกณฑ์การประเมินลักษณะที่ดีของแท่งยาตามคำปราศจากตะกั่ว

ข้อชี้แจง เกณฑ์การประเมินลักษณะที่ดีของแท่งยาตามคำปราศจากตะกั่ว

- เกณฑ์การประเมินมีจุดประสงค์ คือ
  - สามารถประเมินลักษณะที่ดีของแท่งยาทั้งหมด 8 ระดับ
  - สามารถประเมินการเปลี่ยนแปลงของสีตามเมื่อทำการละลายในน้ำ 5 ระดับ
  - สามารถประเมินสีของตะกั่วที่ตกตะกอนหลังจากการละลายแล้ววัดความเข้มข้นสีทั้งหมด 5 ระดับ
- ผู้ประเมินได้แก่ ช่างฉลุ
- ผู้ประเมินต้องไม่ระมัดระวังในการประเมินไม่ต่ำกว่า 10 ปี
- เกณฑ์การประเมินประกอบด้วยดังนี้

ระดับดีมาก	ได้คะแนน	8 คะแนน
ระดับดี	ได้คะแนน	4 คะแนน
ระดับปานกลาง	ได้คะแนน	3 คะแนน
ระดับพอใช้	ได้คะแนน	2 คะแนน
ระดับไม่พอใช้	ได้คะแนน	1 คะแนน

ตารางแสดงเกณฑ์การประเมินแบบ Scoring Rubrics สำหรับการใช้วิธีสีของแท่งยา

ประเมินการใช้ประเมิน	ดีมาก (5)	ดี (4)	ปานกลาง (3)	พอใช้ (2)	ไม่พอใช้ (1)
การประเมินสีของยาในตัวอย่าง	แท่งยาเดิมความเข้มข้นสีของตะกั่ว มีประจักษ์ชัด	แท่งยาเดิมความเข้มข้นสีของตะกั่ว มีประจักษ์ไม่ชัด	แท่งยาเดิมความเข้มข้นสีของตะกั่ว ไม่ชัดเจน	แท่งยาเดิมความเข้มข้นสีของตะกั่ว ไม่ชัดเจน	แท่งยาเดิมความเข้มข้นสีของตะกั่ว ไม่ชัดเจน

แนวข้อสังเกตการประเมินการประเมินแบบ Scoring Rubrics สำหรับการใช้วิธีสีของแท่งยา

- ไม่ใช่วิธีการประเมินสีของแท่งยา  ในระดับคุณภาพซึ่งจะประเมินจากสีที่การประเมินแล้ว
- ไม่ใช่วิธีการประเมินสีของแท่งยาในภาชนะอื่น

รายการ	ระดับคุณภาพ					รวมในการประเมิน
	ดีมาก	ดี	ปานกลาง	พอใช้	ไม่พอใช้	
แผ่นซีลงาน						
สีที่ประเมินสีที่ 1						
แผ่นซีลงาน						
สีที่ประเมินสีที่ 2						
แผ่นซีลงาน						
สีที่ประเมินสีที่ 3						
ซีลงานประเทศไทย						

ภาพประกอบ 52 แบบประเมินลักษณะที่ดีของแท่งยาตามคำปราศจากตะกั่ว

### 3.5. การนำชิ้นงานเงินที่ทำการให้ข้างลงถมนำมาใช้ทดสอบด้วยกระบวนการทางวิทยาศาสตร์เพื่อนำมาหาคุณภาพของแท่งยา

ทางผู้วิจัยได้ทำการจำแนกผลทางวิทยาศาสตร์เพื่อทำการวัดชิ้นงานในเชิงคุณภาพของชิ้นงานโดยแบ่งออกเป็น 3 ประเภท

- การวัดสีของชิ้นงานเงินหลังจากการลงถม

#### วิธีการทดลอง

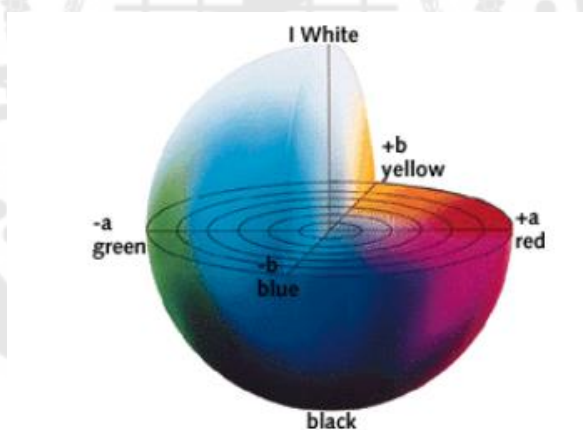
- ทำการนำชิ้นงานเงินแบบแผ่นสีเหลืองนำมาทดสอบกับเครื่องวิเคราะห์คุณภาพสี (Spectrophotometer) ดังภาพประกอบ 53



ภาพประกอบ 53 UltraScan VIS Spectrophotometer

ที่มา: <https://color-gb.com/product/ultrascan-visspectrophotometer>

2.แบบทดสอบการวัดสีนั้นเป็นการวัดสีระบบ CIE ซึ่งผลของการวัดสีของชิ้นงานเงินนั้นมีผลลัพธ์ทั้งหมดออกมาเป็น 3 ค่า คือ  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  แต่แต่ละผลลัพธ์แสดงสีเป็นไปตามภาพประกอบ 54



ภาพประกอบ 54 Color space ของสีในระบบ CIE-LAB

ที่มา: <http://www.sightgrip.co.uk/bbstest.htm>

จะสังเกตเห็นว่าผลลัพธ์  $L^*$  นั้นจะแสดงค่าทั้งหมด 2 สี คือ สีดำและสีขาว ซึ่งจะบ่งบอกถึงคุณภาพของเครื่องถม ดังนั้นทางผู้วิจัยจะใช้ค่าของ  $L^*$  เป็นหลักในการวิเคราะห์ผล

2) การวัดปริมาณการเกิดตามดของชิ้นงานเงินภายหลังจากการลงถม

## วิธีการทดลอง

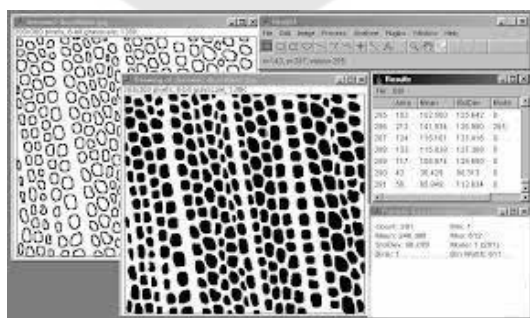
1. ทำการนำชิ้นงานเงินแบบแผ่นสี่เหลี่ยมนำมาถ่ายรูปด้วยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล ภาพประกอบ 55



ภาพประกอบ 55 กล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล

ที่มา: <http://www.microscopes.in.th/2408/usb-digital-microscope-1000x.html>

2. นำภาพถ่ายที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลนำมาหาปริมาณรูพรุน (Porosity) ด้วยโปรแกรม ImageJ ดังภาพประกอบ 56 โดยผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นเปอร์เซ็นต์ของปริมาณรูพรุนที่เปรียบเทียบกับพื้นที่ชิ้นงานเงินที่ได้ทำการลงถมทั้งหมด



ภาพประกอบ 56 โปรแกรม ImageJ



3) การวัดค่าความเงาของชิ้นงานเงินภายหลังจากการลงถม

1. นำชิ้นงานเงินที่ทำการลงจากช่างลงถมนำมาขัดด้วยยาขัดเงาโดยแต่ละชิ้นนำมาขัดเงาเป็นเวลา 2 นาทีต่อ 1 ชิ้นงาน

2. นำชิ้นงานเงินที่ผ่านการขัดเงา ทำการตรวจสอบค่าความเงาด้วยเครื่อง Gloss meter ดังภาพประกอบ 57 ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะมีค่าเป็นหน่วย Gloss unit



ภาพประกอบ 57 Gloss meter

ที่มา: <https://inquality.gr/en/product/nhg60-gloss-meter-3nh/>

3.6 วิธีการเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบคุณสมบัติของแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่วด้วยเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ขั้นสูง

3.6.1 วิธีการวิเคราะห์แท่งยาถมดำปราศจากตะกั่วโดยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray Diffractometer)

หาโครงสร้างของแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่วได้จากการเทียบกับมาตรฐาน JCPDS FILE โดยนำตัวอย่างมาบดให้ละเอียดแล้วอัดลงไปแบบบรรจุสารด้วยเปอร์สเปคแล้วปาดหน้าผิวให้เรียบจากนั้นนำไปตรวจวิเคราะห์โครงสร้างผลึกวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ( X-ray diffraction , XRD ) โดยใช้เครื่อง XRD ยี่ห้อ Rigaku รุ่น SmartLab ดังภาพประกอบ 58 และ Radiation เป็น  $\text{CuK}\alpha$  ( $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ ) โดยเก็บข้อมูลในช่วง  $2\theta$  เท่ากับ  $15^\circ$  ถึง  $85^\circ$



ภาพประกอบ 58 เครื่อง XRD ยี่ห้อ Rigaku รุ่น SmartLab

ที่มา: <https://www.thelabworldgroup.com/product/rigaku-smartlab-xrd-x-ray-diffractometer>

### 3.6.1 วิธีการวิเคราะห์ยาลมตำปρασจากตะกั่วโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope)

การเตรียมตัวอย่างโดยการขัดด้วยกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 320, 600, 800 และ 1,200 ตามลำดับ จากนั้นขัดด้วยผงอลูมินา ( $Al_2O_3$ ) ขนาด 1  $\mu m$  บนผ้าสักหลาด และตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยาย 100 เท่า ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงยี่ห้อ Motic รุ่น BA310MET สำหรับการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคที่กำลังขยายสูงจะใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) และ (Energy dispersive X-ray spectrometry, EDS) ยี่ห้อ BRUKER รุ่น Xflash 6160 ดังภาพประกอบ 59



ภาพประกอบ 59 เครื่อง SEM-EDS ยี่ห้อ BRUKER รุ่น Xflash 6160

ที่มา: <https://www.surfacesciencwestern.com/analytical-services/scanning-electron-microscopy-coupled-with-energy-dispersive-x-ray-semedx-spectroscopy/>

## บทที่ 4

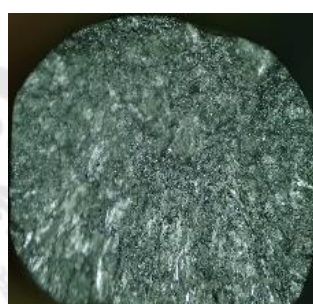
### การนำเสนอผลข้อมูลและการวิเคราะห์ผล

#### 4.1 การหลอมแท่งยาถมด้วยกระบวนการใช้หัวเป่าไฟ

ในกระบวนการทำแท่งยาถมด้วยกระบวนการหลอมมือนั้น ทางผู้วิจัยได้ทำการกำหนดระยะเวลาในการกวนของแท่งกราไฟต์เมื่อเติมธาตุกำมะถันต่อ 10 กรัม โดยทางผู้วิจัยทำการแบ่งเวลาการกวนเป็นเวลา 5 นาที และ 15 นาที



ก.



ข.

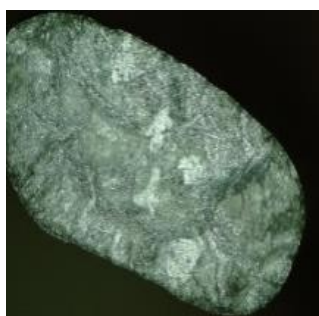
ภาพประกอบ 60 โครงสร้างจุลภาคที่ทำการกวนด้วยแท่งกราไฟต์เมื่อเติมธาตุกำมะถันเป็นเวลาต่าง ๆ ก.) 5 นาที ข) 15 นาที

#### ผลการวิเคราะห์

พบว่าการทดลองที่ทำการกวนด้วยแท่งกราไฟต์เมื่อเติมธาตุกำมะถันเป็นเวลา 5 นาที ดังภาพประกอบ 60ก) มีโครงสร้างพื้นผิวหน้าตัดมีลักษณะคล้ายๆ เส้นเข็มกระจายอยู่เต็มทั่วพื้นผิวหน้าตัด ส่วนการทดลองที่ทำการกวนด้วยแท่งกราไฟต์เมื่อเติมธาตุกำมะถันเป็นเวลา 15 นาที ดังภาพประกอบ 60ข) มีลักษณะโครงสร้างเป็นเกรนขนาดเล็กกระจายอยู่ในโครงสร้างมีลักษณะสีของพื้นผิวนั้นจะเข้มกว่าการกวนเป็นเวลา 5 นาที นั้นแสดงว่าระยะเวลาที่กวนเมื่อเติมธาตุกำมะถันที่ผลต่อโครงสร้างจุลภาคของแท่งยาถม

#### 4.2 การหลอมแท่งยางมด้าด้วยกระบวนการเตาอินดักชั่น (Induction Melting Furnace)

กระบวนการทดลองโดยใช้เตาอินดักชั่นนั้นเป็นเครื่องมือในการหลอมโลหะซึ่งผู้วิจัยได้ทำการกำหนดอุณหภูมิที่ทำการใส่ดีบุกที่อุณหภูมิ 700 °C , 750 °C และ 800 °C และกำหนดเวลาในการกรวนด้วยแท่งกราไฟต์เมื่อเติมธาตุกัมมะถัน 10 กรัม มีระยะเวลาการกรวน คือ 2 นาที , 5 นาที และ 20 นาทีตามลำดับ



ก.



ข.



ค.



ง.

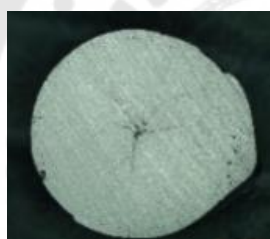
ภาพประกอบ 61 โครงสร้างจุลภาคของแท่งยางมด้าเมื่อเติมดีบุกที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ก) ที่อุณหภูมิ 700 °C เวลากรวน 5 นาที ข) ที่อุณหภูมิ 700 °C เวลากรวน 20 นาที ค) ที่อุณหภูมิ 750 °C เวลากรวน 20 นาที ค) ที่อุณหภูมิ 800 °C เวลากรวน 2 นาที ง) ที่อุณหภูมิ 800 °C เวลากรวน 5 นาที

พบว่าโครงสร้างจุลภาคของแท่งยางมด้าเมื่อเติมดีบุกที่ 700 °C และทำการกรวนเมื่อเติมธาตุกัมมะถันเป็นเวลา 5 นาทีนั้นมีโครงสร้างจุลภาคมีผลึกกระจายและสีเทาไม่เป็นสีดำสังเกตจากภาพประกอบ 61 ก) ซึ่งลักษณะโครงสร้างจุลภาคของพื้นผิวนั้นจะคล้ายคลึงกับ ภาพประกอบ 61 ข) โครงสร้างจุลภาคอุณหภูมิที่ใส่ดีบุก 750 °C และทำการกรวนเมื่อเติมธาตุกัมมะถันเป็นเวลา 20 นาที โครงสร้างจุลภาคเมื่อเติมดีบุก 800 °C การกรวนเมื่อเติมธาตุกัมมะถันเป็นเวลา 5 นาทีดัง

ภาพประกอบ 61ค) พบว่ามีการกระจายของเส้นเข็มเต็มทั่วทั้งพื้นผิวของแท่ง ส่วนในภาพประกอบ 61ง) มีลักษณะโครงสร้างเป็นลักษณะที่เป็นเม็ดกระจายอยู่เต็มพื้นผิว ดังนั้นระยะเวลาการกวนเมื่อเติมผงกำมะถันส่งผลต่อโครงสร้างของแท่งยาถบโดยเวลาในการกวนเมื่อเติมธาตุผงกำมะถัน ถ้าใช้เวลา 2 นาทีจะทำให้เกิดโครงสร้างผลึกเป็นเส้นเข็มกระจายตัวอยู่ทั่วทั้งแท่งยาถบ

#### 4.3 การทำแท่งยาถบดำปราศจากตะกั่วโดยใช้เตาหลอมอินดักชันโดยทำการกำหนดเวลาในการผลิตแท่งยาถบดำปราศจากตะกั่ว

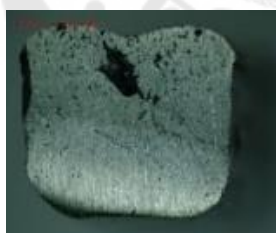
การทดลองนี้ผู้วิจัยได้ทำการกำหนดอุณหภูมิทำการเติมโลหะเงิน, โลหะทองแดง และโลหะดีบุกที่อุณหภูมิ 1080 °C, อุณหภูมิในการเติมธาตุกำมะถันที่อุณหภูมิ 600 °C และ 650 °C และระยะเวลาในการกวนธาตุกำมะถัน คือ 2 นาที



ก.



ข.



ค.



ง.

ภาพประกอบ 62 โครงสร้างจุลภาคของแท่งยาถบเมื่อเติมดีบุกที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ก) 600 °C ลักษณะเป็นทรงกลม ข) 650 °C มีลักษณะเป็นทรงกลม ค) 600 °C ลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยม ง) 650 °C ลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยม

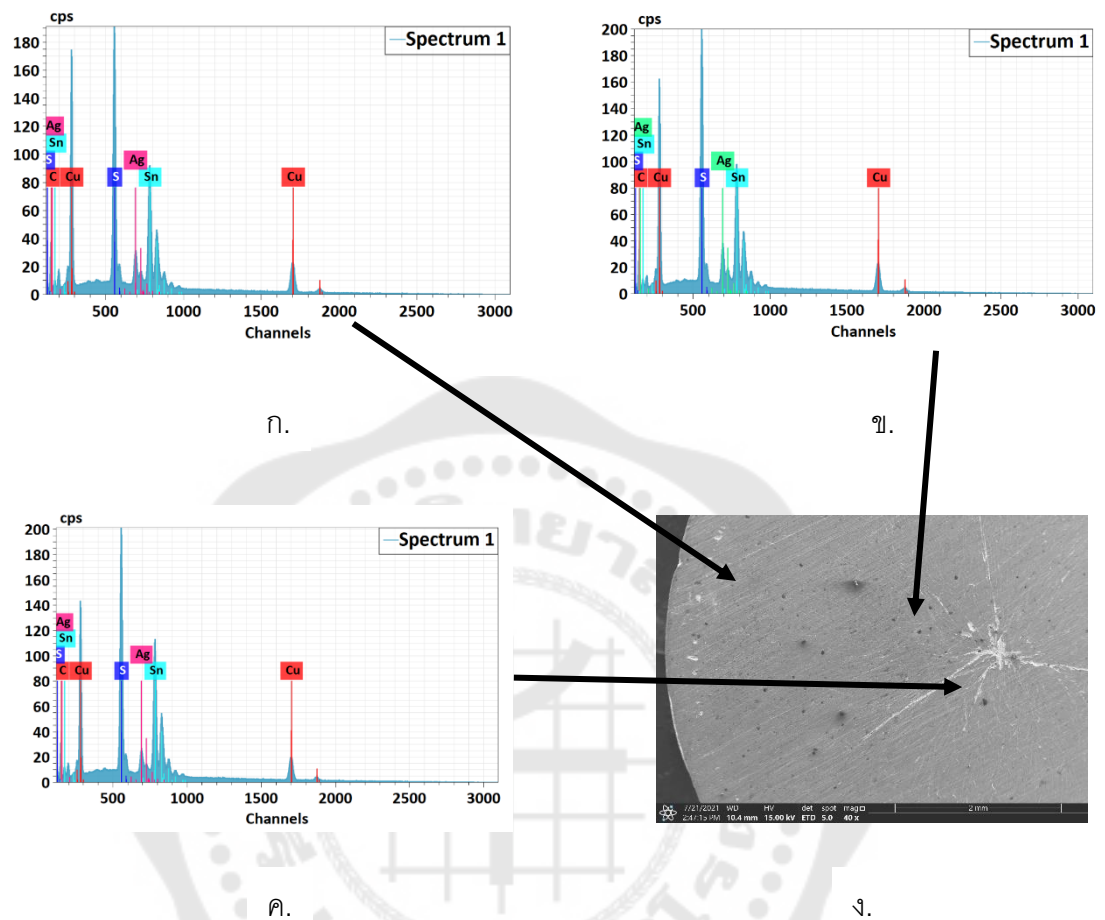
จากภาพประกอบ 62ก) พบว่าอุณหภูมิในการเติมธาตุกำมะถันที่ 600 °C พบว่าโครงสร้างของแท่งยาถบนั้นจะมีลักษณะมีรูพรุนบริเวณศูนย์กลางของแท่ง เช่นเดียวกันกับการของ

อุณหภูมิการเติมธาตุกำมะถันที่  $650^{\circ}\text{C}$  จะมีลักษณะโครงสร้างจุลภาคของแท่งยาถมมีรูพรุนบริเวณศูนย์กลางของแท่งดังภาพประกอบ 62ข) เป็นผลจากการเย็นตัวยาถมที่หลอมเหลวเมื่อทำการเทยาถมลงไปแม่พิมพ์ ทำให้การเย็นตัวจะเริ่มจากขอบของแท่งและเย็นตัวเข้าสู่ศูนย์กลาง และการทดลองที่เติมอุณหภูมิ  $600^{\circ}\text{C}$  และ  $650^{\circ}\text{C}$  โดยมีลักษณะพื้นที่หน้าตัดของแท่งเป็นสี่เหลี่ยมดังภาพประกอบ 62ค) และ 62ง) พบรูพรุนกระจายอยู่เต็มพื้นผิวหน้าตัดของแท่งยาถม

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค EDS เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบและความสม่ำเสมอของธาตุภายในชิ้นงานที่มีการจัดรูปทรงของแท่งยาถมที่แตกต่างกันแบ่งรูปลักษณะทั้งหมด 2 แบบ คือ 1) วงกลม 2) สี่เหลี่ยมพื้นผ้า จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีที่ลักษณะพื้นผิววงกลมจะตรวจทั้ง 3 บริเวณ 1) บริเวณขอบของชิ้นงาน 2) บริเวณกึ่งกลางของพื้นผิว 3) บริเวณศูนย์กลางของพื้นผิว ในส่วนของลักษณะพื้นผิวที่เป็นสี่เหลี่ยมพื้นผ้านั้นจะทำการตรวจสอบทั้งหมด 2 บริเวณ ดังภาพประกอบ 63

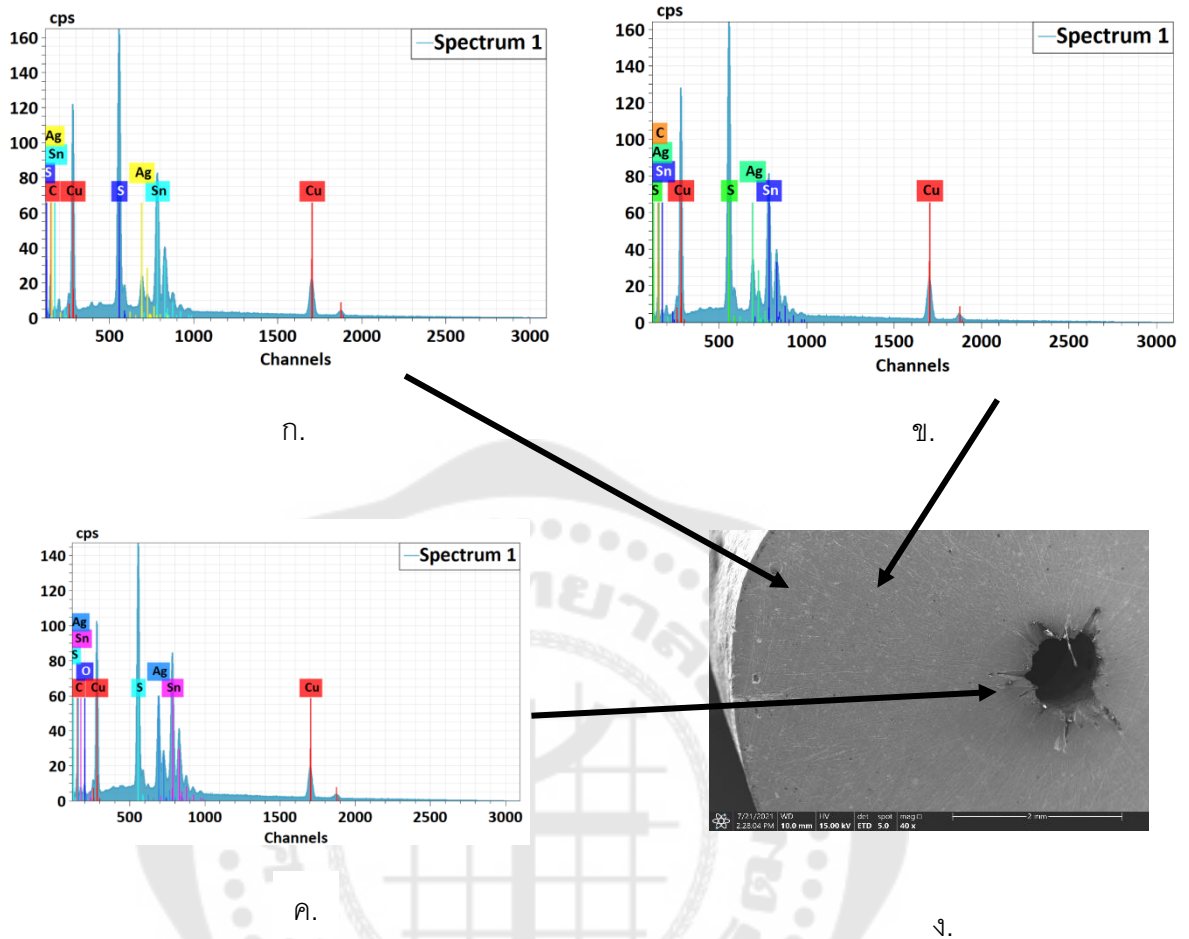


ภาพประกอบ 63 บริเวณที่ทำการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค EDS โดยระบุตำแหน่งในการตรวจวัด



ภาพประกอบ 64 องศาประกอบทางเคมีของแท่งยาถมด้วยเทคนิค EDS เมื่อเติมธาตุกำมะถันที่อุณหภูมิ 650 °C มีลักษณะเป็นทรงกลม ก) สเปกตรัมที่บริเวณขอบของแท่งยาถม ข) สเปกตรัมที่บริเวณกึ่งกลางของแท่งยาถม ค) สเปกตรัมที่บริเวณจุดศูนย์กลางของแท่งยาถม ง) ภาพโครงสร้างจุลภาคของการทดลองเมื่อเติมดีบุกที่อุณหภูมิ 600 °C ลักษณะเป็นทรงกลม

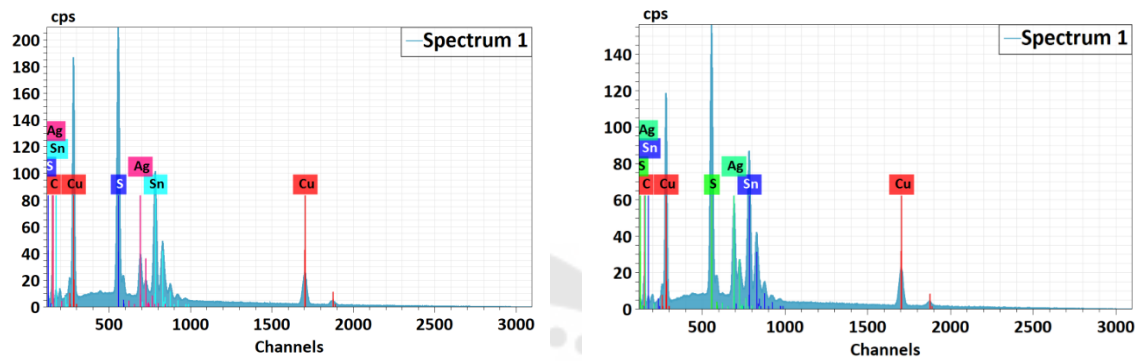




ภาพประกอบ 65 องค์ประกอบทางเคมีของแท่งยาถมด้วยเทคนิค EDS เมื่อเติมธาตุกำมะถันที่อุณหภูมิ 650 °C มีลักษณะเป็นทรงกลม ก) แสดงสเปกตรัมที่บริเวณขอบของแท่งยาถม ข) แสดงสเปกตรัมที่บริเวณกึ่งกลางของแท่งยาถม ค) แสดงสเปกตรัมที่บริเวณจุดศูนย์กลางของแท่งยาถม ง) ภาพโครงสร้างจุลภาคของการทดลองเมื่อเติมดีบุกที่อุณหภูมิ 650 °C ลักษณะเป็นทรงกลม

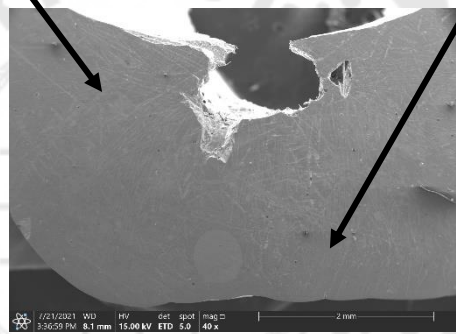
จากการทดลองของการเติมธาตุกำมะถันที่อุณหภูมิ 600 °C โดยลักษณะแท่งยาถมเป็นวงกลม จากการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิควิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ปรากฏธาตุ Ag, Cu, Sn, S และการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของแท่งยาถมทั้งในบริเวณขอบ บริเวณกึ่งกลาง และจุดศูนย์กลางของแท่งยาถม ดังภาพประกอบ 64ก) 64ข) และ 64ค) ตามลำดับ ส่วนลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่แสดงดังภาพประกอบ 64ง) พบรูพรุนตรงจุดศูนย์กลางของแท่งยาถม เมื่อเติมธาตุกำมะถันที่อุณหภูมิ 650 °C นั้นทำการตรวจสอบหาองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิควิเคราะห์ EDS พบธาตุ Ag, Cu, Sn, S มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอเช่นเดียวกับการทดลองที่ใส่ผงกำมะถันที่อุณหภูมิ 650 °C โดยลักษณะเป็นวงกลมและตำแหน่งการตรวจวัดดัง

ภาพประกอบ 65ก) 65ข) และ 65ค) ตามลำดับ และยังพบรูพรุนตรงจุดศูนย์กลางแท่งยาถมดั่งภาพประกอบ 65ง)



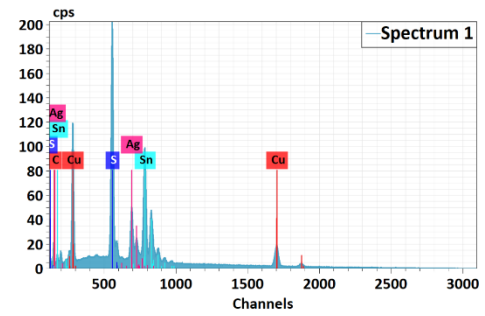
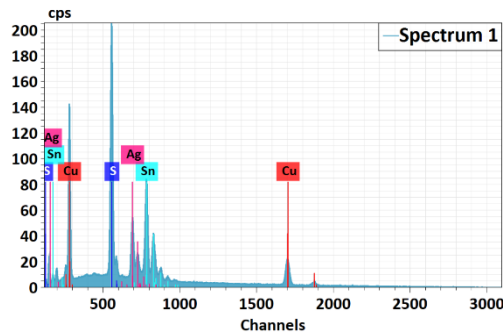
ก.

ข.



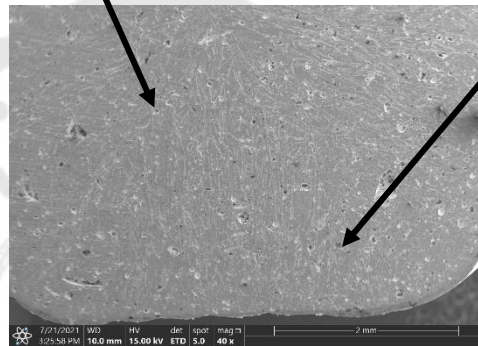
ค.

ภาพประกอบ 66 องค์ประกอบทางเคมีของแท่งยาถมด้วยเทคนิค EDS เมื่อเติมธาตุกำมะถันที่อุณหภูมิ 600 °C มีลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยม ก) สเปกตรัมที่บริเวณส่วนบนแท่งยาถม ข) สเปกตรัมบริเวณส่วนล่างแท่งยาถม ค) ภาพโครงสร้างจุลภาคของการทดลองเมื่อเติมดีบุกที่อุณหภูมิ 600 °C ลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยม



ก.

ข.



ค.

ภาพประกอบ 67 องค์ประกอบทางเคมีของแท่งยาถมด้วยเทคนิค EDS เมื่อเติมธาตุกำมะถันที่อุณหภูมิ 650 °C มีลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยม ก) แสดงสเปกตรัมที่บริเวณส่วนบนของแท่งยาถม ข) แสดงสเปกตรัมที่บริเวณส่วนล่างของแท่งยาถม ค) ภาพโครงสร้างจุลภาคของการทดลองเมื่อเติมดีบุกที่อุณหภูมิ 650 °C ลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยม

จากการทดลองเติมธาตุกำมะถันที่อุณหภูมิ 600 °C โดยแท่งยาถมมีลักษณะสี่เหลี่ยม จากการวิเคราะห์การกระจายตัวด้วยเทคนิค EDS โดยตำแหน่งการตรวจดังภาพประกอบ 66ก) และ 66ข) วิเคราะห์บริเวณส่วนบนของแท่งและส่วนล่างของแท่งพบธาตุ Ag, Cu, Sn, S การกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และโครงสร้างจุลภาคที่ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดนั้นดังภาพประกอบ 66ค) ปรากฏมีรูพรุนบริเวณส่วนบนของแท่งยาถม และการเติมธาตุกำมะถันที่อุณหภูมิ 650 °C โดยลักษณะเป็นสี่เหลี่ยม นั้นพบว่าการกระจายตัวของธาตุที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS พบธาตุ Ag, Cu, Sn, S มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอเช่นเดียวกับวิเคราะห์เมื่อเติมธาตุกำมะถันที่อุณหภูมิ 650 °C โดยลักษณะเป็นสี่เหลี่ยม ดังภาพประกอบ 67ก) และ 67

ข) พบรูพรุนกระจายอยู่เต็มทั่วพื้นผิวหน้าตัดของแท่งยาถมดงภาพประกอบ 67ค) ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิของการเติมธาตุกำมะถันและลักษณะรูปร่างของแท่งยาถมไม่ส่งผลต่อการกระจายตัวของธาตุในแท่งยาถม

#### 4.4 การวัดอุณหภูมิของเตาอินดักชั่นที่วัดด้วยเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) เปรียบเทียบกับอินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์ (Infrared Thermometer)

การสอบเทียบเครื่องมือ (Calibration) เป็นหนึ่งในกระบวนการที่สำคัญที่ช่วยสร้างความมั่นใจให้กับผู้ผลิต เพราะเป็นกระบวนการที่ช่วยรักษาความถูกต้อง ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงมีการสอบเทียบอุณหภูมิภายในเตาอินดักชั่นเพื่อหาอุณหภูมิที่แท้จริงในกระบวนการผลิต ซึ่งใช้เครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด (Infrared Thermometer) ซึ่งเป็นเทอร์โมมิเตอร์แบบดิจิทัลที่วัดอุณหภูมิแบบไม่สัมผัส (Non-Contact) ด้วยรังสีอินฟราเรด (IR: Infrared) เป็นการวัดอุณหภูมิจากการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุ เครื่องวัดอุณหภูมิอินฟราเรดจึงถูกเรียกว่า เทอร์โมมิเตอร์แบบไม่สัมผัส, เทอร์โมมิเตอร์แบบปืน หรือเลเซอร์ เทอร์โมมิเตอร์ (Laser Thermometer) ในกรณีที่แสงเลเซอร์ถูกใช้ในการช่วยวัดอุณหภูมิ คุณสมบัติของเทอร์โมมิเตอร์อินฟราเรด คือ สามารถวัดอุณหภูมิวัตถุในระยะไกลได้ โดยเป็นการวัดอุณหภูมิพื้นผิว (Surface Temperature) ของวัตถุที่เราต้องการวัดเท่านั้น แม้จะวัดอุณหภูมิของของเหลวก็ตาม จะทราบเพียงอุณหภูมิพื้นผิวของของเหลว ไม่ใช่อุณหภูมิภายใน (Core Temperature)

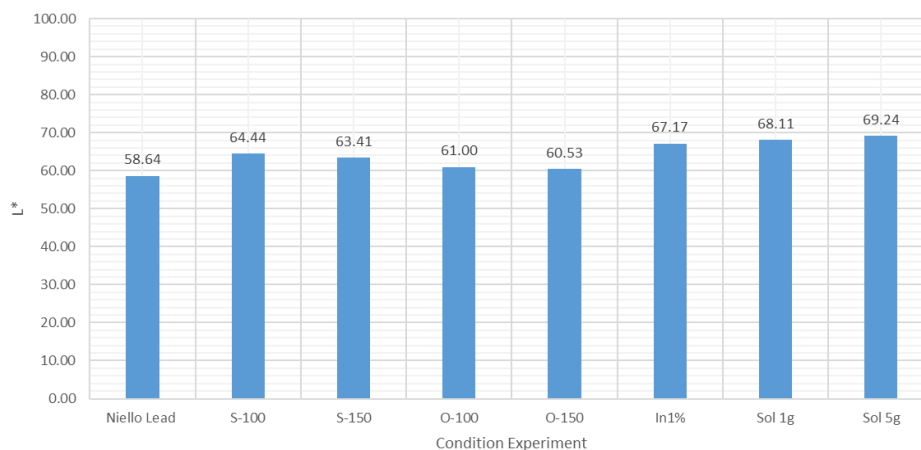
ตาราง 5 เปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิของการตรวจวัดด้วยเครื่องอินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์และเทอร์โมคัปเปิลเทียบกับจุดหลอมเหลวของธาตุเงินและธาตุดีบุก

ธาตุ	จุดหลอมเหลวของธาตุ (°C)	IR (°C)	Thermocouple (°C)
Ag	961.8 °C	983.44 °C	719.42 °C
Sn	231.9 °C	240.00 °C	149.73 °C

จากตารางที่ 5 พบว่าอุณหภูมิที่ตรวจวัดจากเทอร์โมคัปเปิลเท่ากับ 240.00°C และค่าที่อ่านได้จากอินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์ในกรณีการใช้จุดหลอมเหลวของโลหะดีบุกเป็นจุดอ้างอิงนั้นเท่ากับ 149.73°C ส่วนในกรณีของโลหะเงินเป็นจุดอ้างอิง ค่าที่อ่านได้จากเทอร์โมคัปเปิลเท่ากับ 719.42 °C และค่าที่อ่านได้จากอินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์เท่ากับ 983.41 °C ซึ่งจากการตรวจสอบพบว่า จุดหลอมเหลวของธาตุดีบุกอยู่ที่ 231.9 °C และธาตุเงิน อยู่ที่ 961.8 °C จะเห็นได้ว่า ค่าที่ได้ อ่านได้จากอินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์ใกล้เคียงกับจุดหลอมเหลวของโลหะเงินและโลหะดีบุกมากกว่าค่าที่อ่านได้จากเทอร์โมคัปเปิล แสดงว่าค่าจากอินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์มีความน่าเชื่อถือมากกว่า ด้วยเหตุนี้อุณหภูมิที่แสดงในรายงานวิจัยนี้มาจากอินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์

## 4.5 ผลของการตรวจสอบชิ้นงานเงินภายหลังจากการลงถม

### 4.5.1 วิเคราะห์ค่าสีด้วยเครื่อง CIE Lab




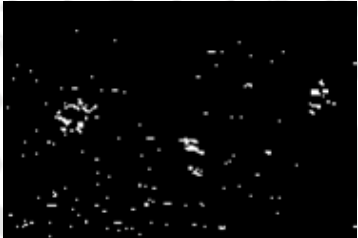


ภาพประกอบ 68 แผนภูมิการเปรียบเทียบระหว่างค่า  $L^*$  กับเงื่อนไขการทดลองต่างๆ

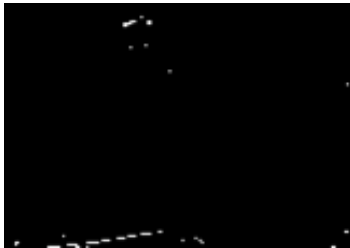



การหาค่า  $L^*$  นั้นเป็นการวัดค่าสีของชิ้นงานเงินภายหลังจากการลงถม เนื่องจากค่า  $L^*$  บ่งบอกค่าสีดำและสีขาว เพราะว่าเครื่องถมไทยนั้นจะมีเอกลักษณ์ที่ชัดเจนต้องคือ เมื่อลงถมต้องมีสีดำ จึงได้ทำการเปรียบเทียบกับการลงถมด้วยสารตะกั่ว เพราะว่า ในปัจจุบันการใช้งานแท่งยาถมยังนิยมใช้แบบมีสารตะกั่วอยู่ ดังนั้นต้องทำการหาแท่งยาถมที่ไร้สารตะกั่วที่มีคุณสมบัติของสีใกล้เคียงกับแท่งยาถมที่มีสารตะกั่ว ในภาพประกอบ 68 เป็นแผนภูมิการเปรียบเทียบระหว่างค่า  $L^*$  กับเงื่อนไขการทดลองต่างๆซึ่งแกน X จะแสดงค่าเงื่อนไขการทดลองต่างๆ และ แกน Y จะแสดงค่า  $L^*$  ผลการวิเคราะห์พบว่าค่า  $L^*$  ของชิ้นงานเงินที่ลงถมด้วยแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่ว คือ การทดลองกวนและบ่มที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 100 °C และ 150 °C ซึ่งใกล้เคียงกับชิ้นงานเงินที่ลงถมด้วยแท่งยาถมที่มีสารตะกั่วมากที่สุด (Niello-Lead)

#### 4.5.2 วิเคราะห์ค่าปริมาตรรูพรุน (Porosity) ด้วยโปรแกรม ImageJ

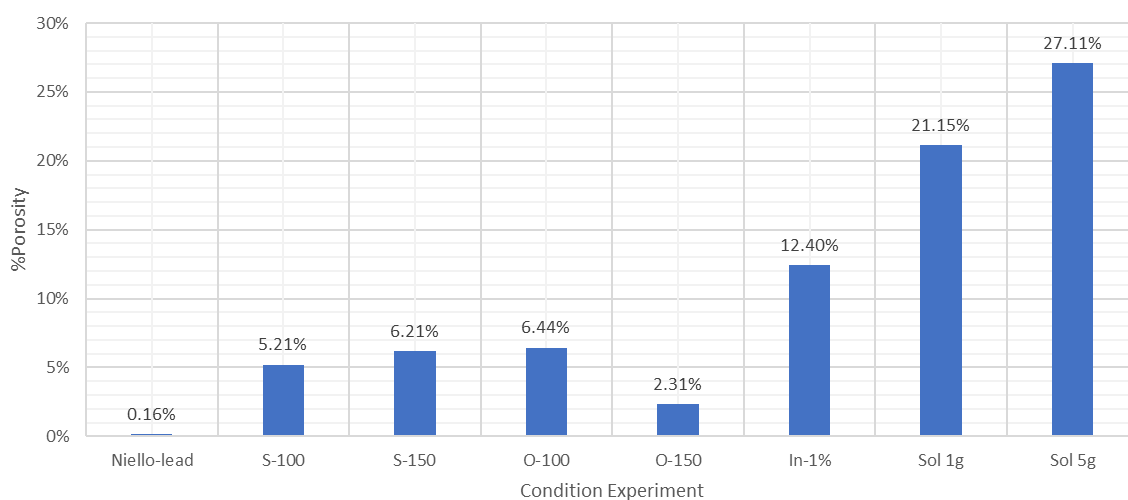
จากการวิเคราะห์หาปริมาณรูพรุน (Porosity) ที่ชิ้นงานเงินที่มีขนาดกว้าง 3 มิลลิเมตร ยาว 7 มิลลิเมตร หนา 2 มิลลิเมตร โดยทำการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงยี่ห้อ Motic รุ่น BA310MET และทำการวิเคราะห์หาค่าร้อยละของปริมาณรูพรุนด้วยโปรแกรม ImageJ

ตาราง 6 แสดงรูปถ่ายชิ้นงานตัวอย่างพร้อมกับร้อยละปริมาณรูพรุนของชิ้นงาน

เงื่อนไขการทดลอง ชิ้นงานที่ลงถม	รูปถ่ายชิ้นงานตัวอย่าง	%Porosity
Niello-Lead		0.16 %
S-100		8.21 %
S-150		6.21 %
O-100		6.44 %

O-150		2.31 %
In-1%		12.40%
Sol 1g		21.15%
Sol 5g		27.11%

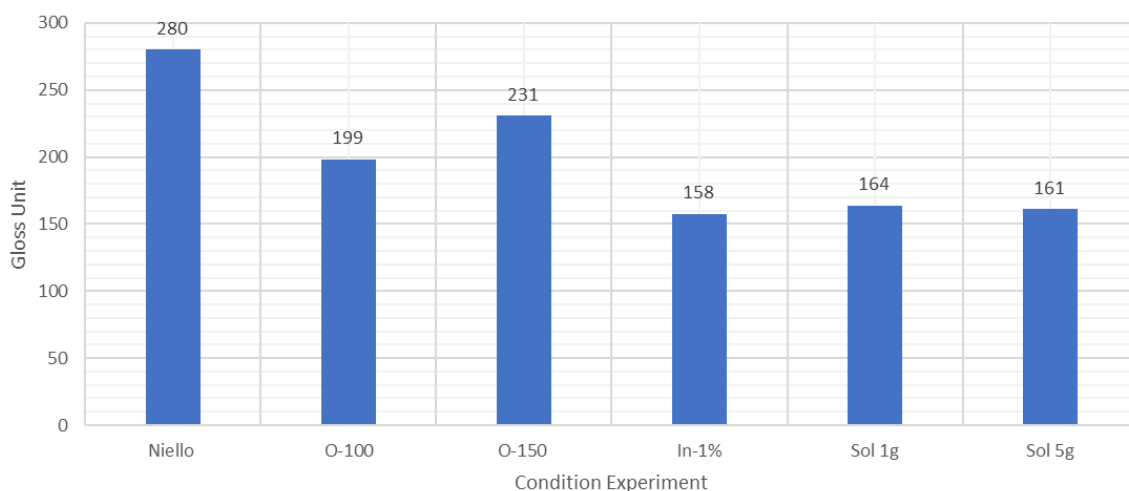




ภาพประกอบ 69 การเปรียบเทียบระหว่างปริมาณร้อยละรูพรุนภายในชิ้นงาน (%Porosity) ที่ผ่านการลงถม กับเงื่อนไขการทดลองต่างๆ

จากภาพประกอบ 69 ชิ้นงานที่ลงถมด้วยแท่งยาถมที่มีสารตะกั่ว (Niello-lead) มีค่าเท่ากับปริมาณร้อยละแสดงรูพรุนในชิ้นงาน 0.16 % มีปริมาณใกล้เคียงกับชิ้นงานที่ลงถมด้วยแท่งยาถมที่มีสารตะกั่วพบว่าการกวาดและปัดที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 150 °C มีค่าเท่ากับ 2.31% และจากตารางที่ 6 แสดงจุดสีขาว คือ รูพรุนที่เกิดจากเย็นตัวของแท่งยาถมที่โดนความร้อนจนหลอมเหลว และเกิดการเย็นตัวของยาถม โดยชิ้นงานที่ลงถมด้วยแท่งยาถมที่มีสารบัดกรีเชื่อมเป็นสารเพิ่มเติมจะพบว่ามีค่าปริมาณร้อยละรูพรุนมากที่สุด (%Porosity) เพราะว่าในสารบัดกรีเชื่อมตะกั่ว นั้นมีองค์ประกอบหลายธาตุ ได้แก่ เช่น ธาตุตะกั่ว, ธาตุพลวง และ ธาตุดีบุก เป็นต้น ทำให้เกิดเป็นรูพรุนหลังจากการลงถม

#### 4.5.3 วิเคราะห์ค่าความเงา



ภาพประกอบ 70 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความเงากับเงื่อนไขการทดลองต่างๆ

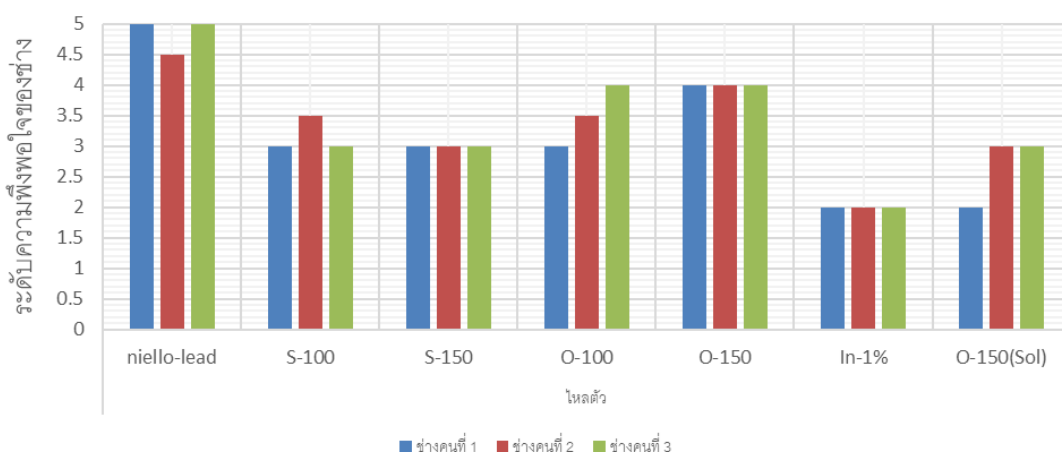
ภาพประกอบ 70 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความเงากับเงื่อนไขการทดลองต่างๆ ซึ่งค่าความเงา (Gloss Unit) นั้นมีความสำคัญต่อเครื่องถลุงเป็นอย่างมาก ในกระบวนการผลิตของเครื่องถลุงจะมีกระบวนการขัดเงา ซึ่งเป็นการบ่งบอกถึงคุณภาพของเครื่องถลุงที่ผ่านการขัดเงา จึงได้ทำการเปรียบเทียบชิ้นงานเงินที่ลงถลุงด้วยแท่งยาถลุงที่มีสารตะกั่ว (Niello-lead) มีค่าความเงาเท่ากับ 280 GU (หน่วยวัดค่าความเงา) ซึ่งเงื่อนไขการทดลองที่ใกล้เคียงกับชิ้นงานเงินที่ลงถลุงด้วยแท่งยาถลุงที่มีสารตะกั่วมากที่สุด คือ กระบวนการถลุงและบ่มที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 150 °C มีค่าเท่ากับ 231 GU

#### 4.6 ระดับความพึงพอใจของช่างลงถลุงที่ทำการลงถลุงด้วยแท่งยาถลุงดำปราศจากตะกั่ว

ผู้วิจัยได้ทำการเตรียมแบบสอบถามวัดระดับความพึงพอใจของช่างลงถลุงโดยมีช่างลงถลุงทั้งหมด 3 ท่าน ซึ่งในแต่ละท่านมีประสบการณ์ด้านการลงถลุงไม่น้อยกว่า 5 ปี และมีเงื่อนไขการทดลองที่ช่างลงถลุงทั้งหมด 7 เงื่อนไขการทดลองดังนี้ คือ 1) แท่งยาถลุงที่มีสารตะกั่ว 2) การถลุงอย่างทีอุณหภูมิแม่พิมพ์ 100 °C (S-100) 3) การถลุงอย่างทีอุณหภูมิแม่พิมพ์ 150 °C (S-150) 4)

การทอและบ่มที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 100 °C (O-100) 5) การทอและบ่มที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 150 °C (O-150) 6) การทอและบ่มที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 150 °C เพิ่มธาตุอินเดียม 7) การทอและบ่มที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 150 °C

#### 4.6.1 ผลแสดงความพึงพอใจของช่างด้านการไหลของแท่งยาถมที่ลงถมชิ้นงาน

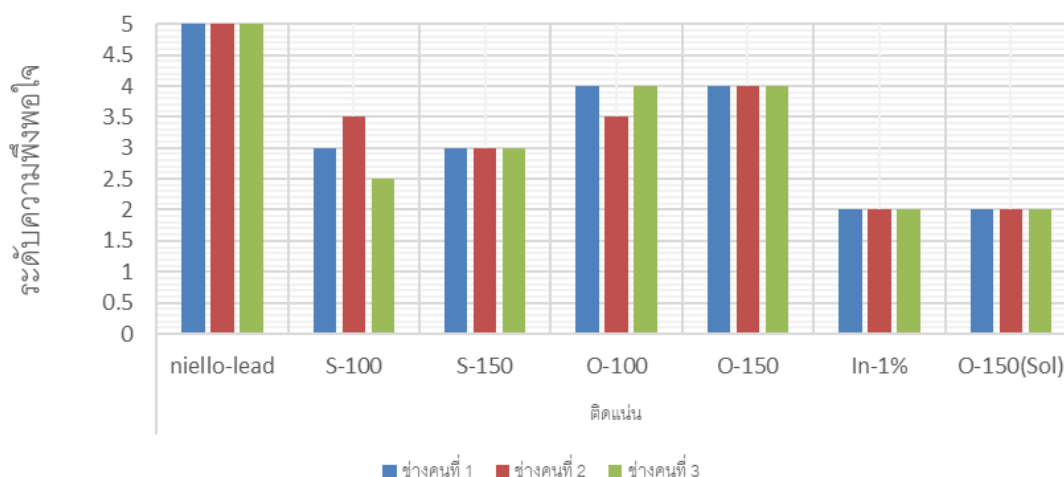


ภาพประกอบ 71 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบระหว่างระดับความพึงพอใจของช่างลงถมในด้านการไหล กับเงื่อนไขต่างๆในกระบวนการทดลอง

ภาพประกอบ 71 แสดงแผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบระหว่างระดับความพึงพอใจของช่างลงถมในด้านการไหลของชิ้นงานเงินภายหลังจากการลงถมกับเงื่อนไขต่างๆในกระบวนการทดลอง โดยในแผนภูมิแท่งนี้จะมีการตอบแบบสอบถามของช่างทั้งหมด 3 คน ซึ่งแท่งยาถมที่มีสารตะกั่ว (Niello-lead) จะได้รับความพึงพอใจคะแนนเฉลี่ยอยู่ที่ 4.5 คะแนน จากผลการวิเคราะห์พบว่า มีเงื่อนไขการทดลอง O-150 คือ กระบวนการทอและบ่มที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 150 °C ได้คะแนนเฉลี่ยอยู่ที่ 3.12 คะแนน ซึ่งมีความใกล้เคียงกับ Niello-lead มากที่สุดมากกว่าเงื่อนไขการทดลองอื่นๆ ผลแบบสอบถามระดับความพึงพอใจของช่างในด้านการติดตั้งของชิ้นงานเงินภายหลังจากการลงถม ซึ่งกระบวนการทอและบ่มที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 150 °C มีระดับ

ความพึงพอใจของช่างใกล้เคียงกับการลงถมด้วยแท่งยาถมที่มีสารตะกั่ว (Niello-lead) มากกว่าเงื่อนไขการทดลองอื่นๆ

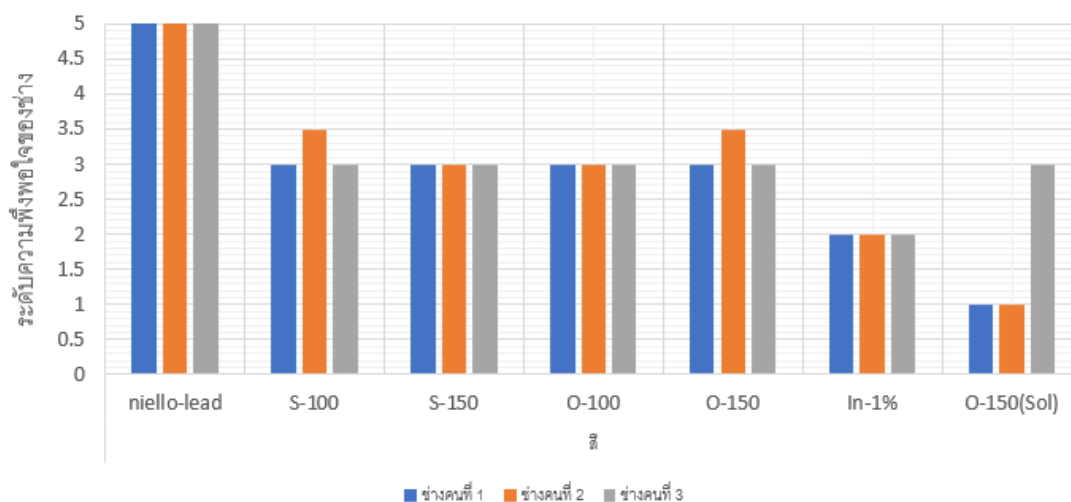
#### 4.6.2 ผลแสดงความพึงพอใจของช่างด้านการติดแน่นของยาถมกับชิ้นงาน



ภาพประกอบ 72 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบระหว่างระดับความพึงพอใจของช่างลงถมในด้าน การติดแน่น กับเงื่อนไขต่างๆในกระบวนการทดลอง

ในภาพประกอบ 72 แสดงแผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบระหว่างระดับความพึงพอใจของช่างลงถมในด้านการติดแน่นของชิ้นงานเงินภายหลังจากการลงถมกับเงื่อนไขต่างๆในกระบวนการทดลอง โดยในแผนภูมิแท่งนี้จะมีการตอบแบบสอบถามของช่างทั้งหมด 3 คน ซึ่งแท่งยาถมที่มีสารตะกั่ว (Niello-lead) จะได้รับความพึงพอใจคะแนนเฉลี่ยอยู่ที่ 5 คะแนน ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ดีมาก ถ้าสังเกตในแผนภูมิแท่งจะพบว่า มีเงื่อนไขการทดลอง O-150 ก็คือ กระบวนการกรวนและบ่มที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 150 °C ได้คะแนนเฉลี่ยอยู่ที่ 4 คะแนน ซึ่งมีความใกล้เคียงกับ Niello-lead มากที่สุดมากกว่า เงื่อนไขการทดลองอื่นๆ ผลแบบสอบถามระดับความพึงพอใจของช่างในด้านการติดแน่นของชิ้นงานเงินภายหลังจากการลงถม ซึ่งกระบวนการกรวนและบ่มที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 150 °C มีระดับความพึงพอใจของช่างใกล้เคียงกับการลงถมด้วยแท่งยาถมที่มีสารตะกั่ว (Niello-lead) มากกว่าเงื่อนไขการทดลองอื่นๆ

#### 4.6.3 ผลแสดงความพึงพอใจของช่างด้านสีของชิ้นงานเงินที่ทำการลงถมด้วย แท่งยาถมในกระบวนการทดลองในแบบต่างๆ



ภาพประกอบ 73 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบระหว่างระดับความพึงพอใจของช่างลงถมในด้านสีของชิ้นงานกับเงื่อนไขต่างๆในกระบวนการทดลอง

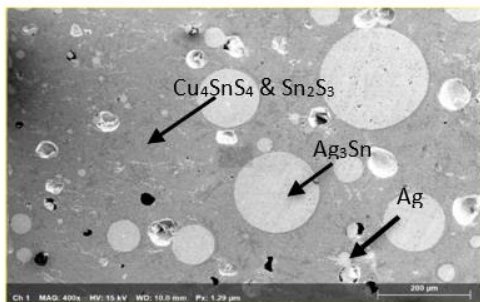
ในภาพประกอบ 73 แสดงแผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบระหว่างระดับความพึงพอใจของช่างลงถมในด้านการติดแน่นของชิ้นงานเงินภายหลังจากการลงถมกับเงื่อนไขต่างๆในกระบวนการทดลอง โดยในแผนภูมิแท่งนี้จะมีการตอบแบบสอบถามของช่างทั้งหมด 3 คน ซึ่งแท่งยาถมที่มีสารตะกั่ว (Niello-lead) จะได้รับความพึงพอใจคะแนนเฉลี่ยอยู่ที่ 5 คะแนน ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ดีมาก ถ้าสังเกตในแผนภูมิแท่งจะพบว่าเงื่อนไขการทดลอง O-150 คือ กระบวนการกรวนและบ่มที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 150 °C ได้คะแนนเฉลี่ยอยู่ที่ 3.2 คะแนน ซึ่งมีความใกล้เคียงกับชิ้นงานเงินที่ลงถมด้วยสารตะกั่วมากที่สุดมากกว่า เงื่อนไขการทดลองอื่นๆ ผลแบบสอบถามระดับความพึงพอใจของช่างในด้านสีของชิ้นงานเงินภายหลังจากการลงถม ซึ่งกระบวนการกรวนและบ่มที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 150 °C มีระดับความพึงพอใจของช่างใกล้เคียงกับการลงถมด้วยแท่งยาถมที่มีสารตะกั่ว (Niello-lead) มากกว่าเงื่อนไขการทดลองอื่นๆ

จากระดับความพึงพอใจทั้งด้านการไหลของแท่งยาถมของชิ้นงาน ด้านการติดแน่นของชิ้นงานและ ด้านสีของชิ้นงานภายหลังจากการลงถมพบว่าแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่วที่มีระดับ

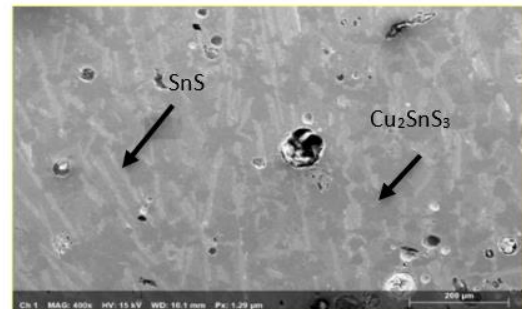
ความพึงพอใจใกล้เคียงกับแท่งยาที่มีสารตะกั่ว นั้น คือ การทดลองกวนและบ่มที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 150 °C

#### 4.7 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมี

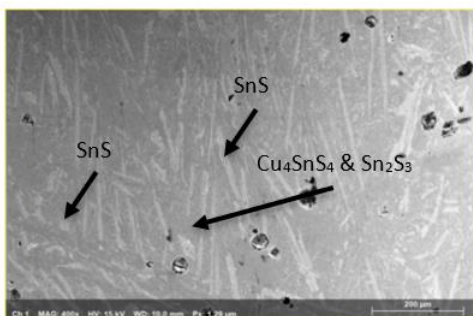
เมื่อนำแท่งยาดมด้าปราศจากตะกั่วทั้ง 5 ตัวอย่างคือ 1.หัวเป่าไฟ (Torch Melting) , 2. การทดลองกวนอย่างเดียวที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 100 °C , 3.การทดลองกวนอย่างเดียวที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 150 °C , 4.การทดลองกวนและบ่มที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 100 °C , 5.การทดลองกวนและบ่มที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 150 °C นำมาถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิค EDS



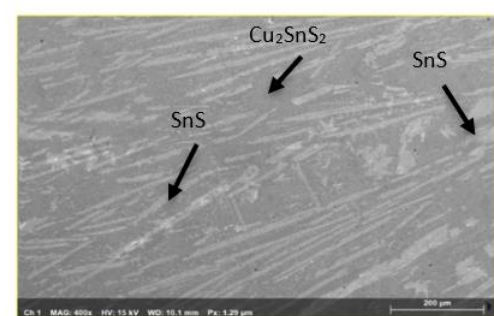
ก.



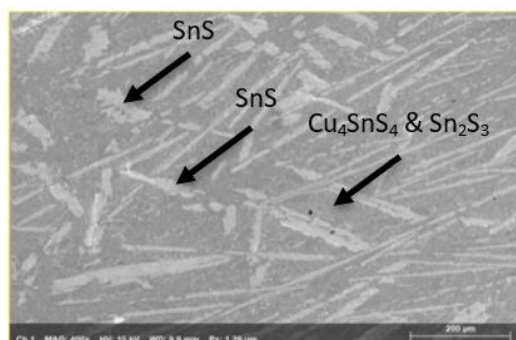
ข.



ค.



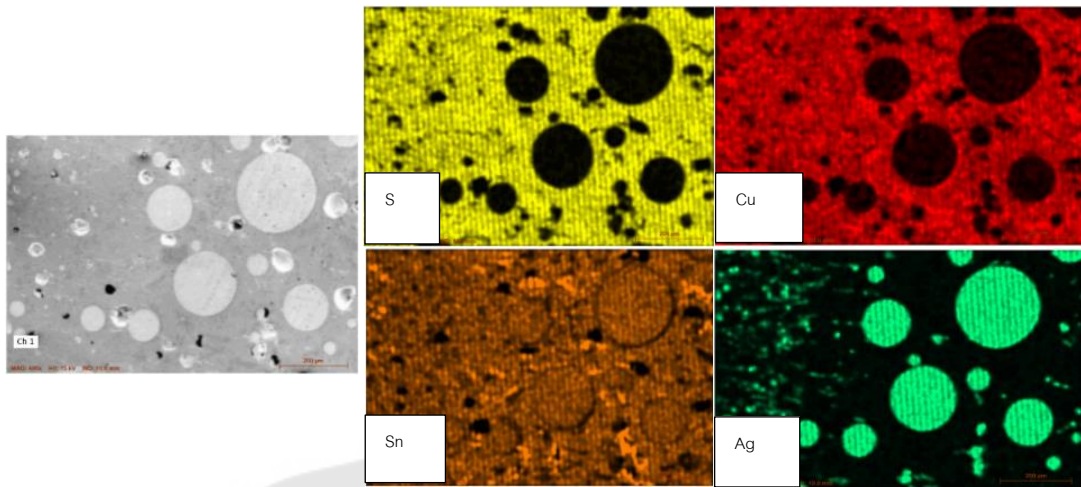
ง.



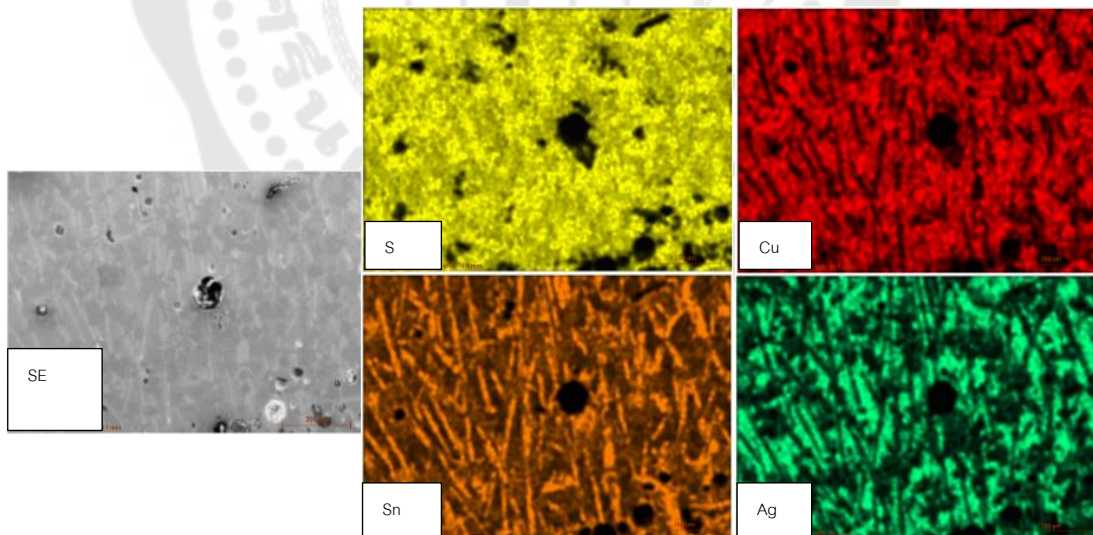
จ.

ภาพประกอบ 74 โครงสร้างจุลภาคของแท่งยาถมถมโดยการทดลองแบบต่างๆ ก) หัวเป่าไฟ (Torch Melting) ข) การทดลองกวนอย่างเดียวยุณหภูมิแม่พิมพ์ 100 °C ค) การทดลองกวนอย่างเดียวยุณหภูมิแม่พิมพ์ 150 °C ง) การทดลองกวนและบ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์ 150 °C จ) การทดลองกวนและบ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์ 150 °C

ผลของภาพถ่ายตัดขวางที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และการวิเคราะห์ธาตุด้วยระบบวิเคราะห์แบบ EDS แสดงในภาพประกอบ 74ก) ที่ทำการทดลองแบบ Torch Melting พบว่ายาถมดำปราศจากตะกั่วนั้นมีปริมาณ Cu และ Ag มากที่สุดและพบ  $Cu_4SnS_4$ ,  $Sn_2S_3$  และ  $Ag_3Sn$  ในภาพประกอบ 75 เป็นการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุแบบ Mapping Analysis จะสังเกตเห็นว่า ธาตุ Ag นั้นจะเกิดเป็นลักษณะทรงกลมกระจายอยู่เต็มในพื้นที่และภาพประกอบ 74ข) การทดลองแบบกวนอย่างเดียวยุณหภูมิแม่พิมพ์ 100 °C จะเห็นว่าการเกิดเส้นเข็มเป็นสารประกอบของ SnS และในภาพประกอบ 76 พบการกระจายตัวของธาตุ Sn มีลักษณะเป็นเส้นเข็มเต็มพื้นที่ ส่วนธาตุ Ag, Cu และ S กระจายอยู่เต็มในพื้นที่เช่นเดียวกัน และในภาพประกอบ 74ค) เป็นการทดลองกวนอย่างเดียวยุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ 150 °C เกิดเป็นลักษณะเส้นเข็มซึ่งเป็นสารประกอบ SnS แต่มีลักษณะพบที่ชัดเจนมากกว่าการทดลองแบบกระบวนการกวนอย่างเดียวยุณหภูมิแม่พิมพ์ 100 °C โดยการทดลองกวนอย่างเดียวยังพบเป็นรูพรุนทั่วทั้งบริเวณโครงสร้างจุลภาคของยาถมดำซึ่งจะสังเกตได้ในภาพประกอบ 77

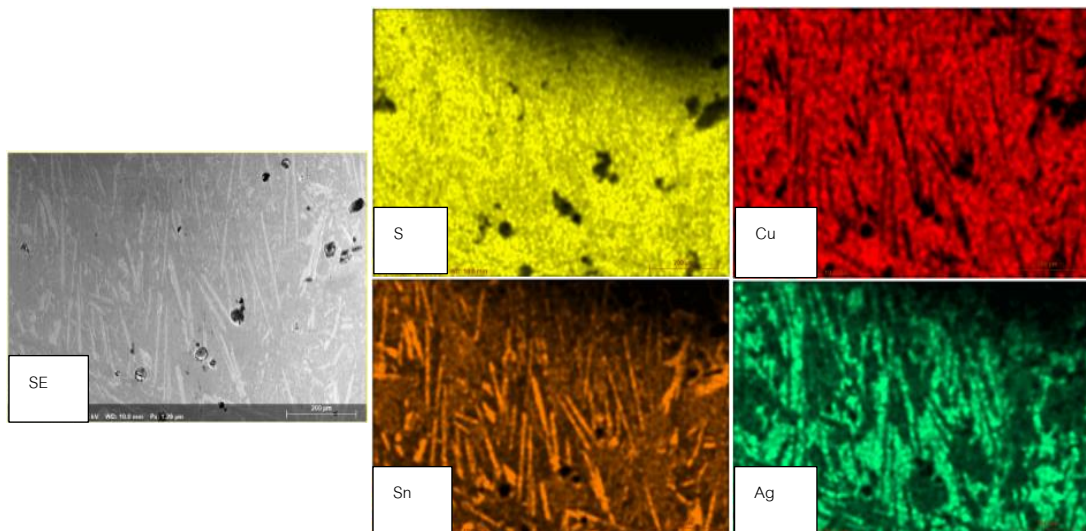


ภาพประกอบ 75 วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคแบบ Mapping Analysis การทดลองแบบ Torch Melting

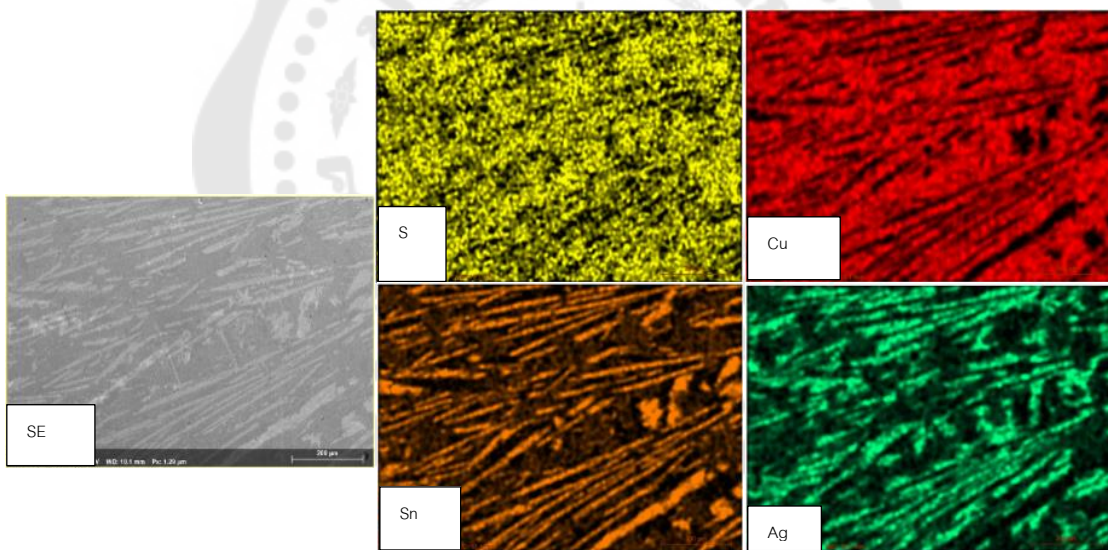


ภาพประกอบ 76 วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคแบบ Mapping Analysis การทดลองแบบกวนอย่าง  
เดียวที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 100 °C

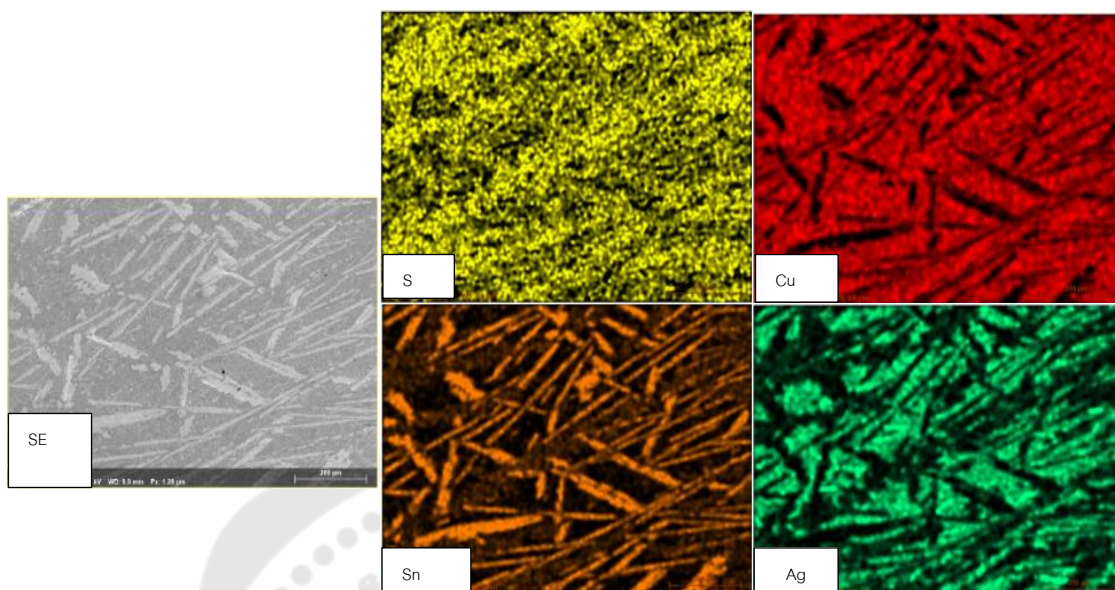




ภาพประกอบ 77 วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคแบบ Mapping Analysis การทดลองแบบกวนอย่าง  
เดียวที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 150 °C

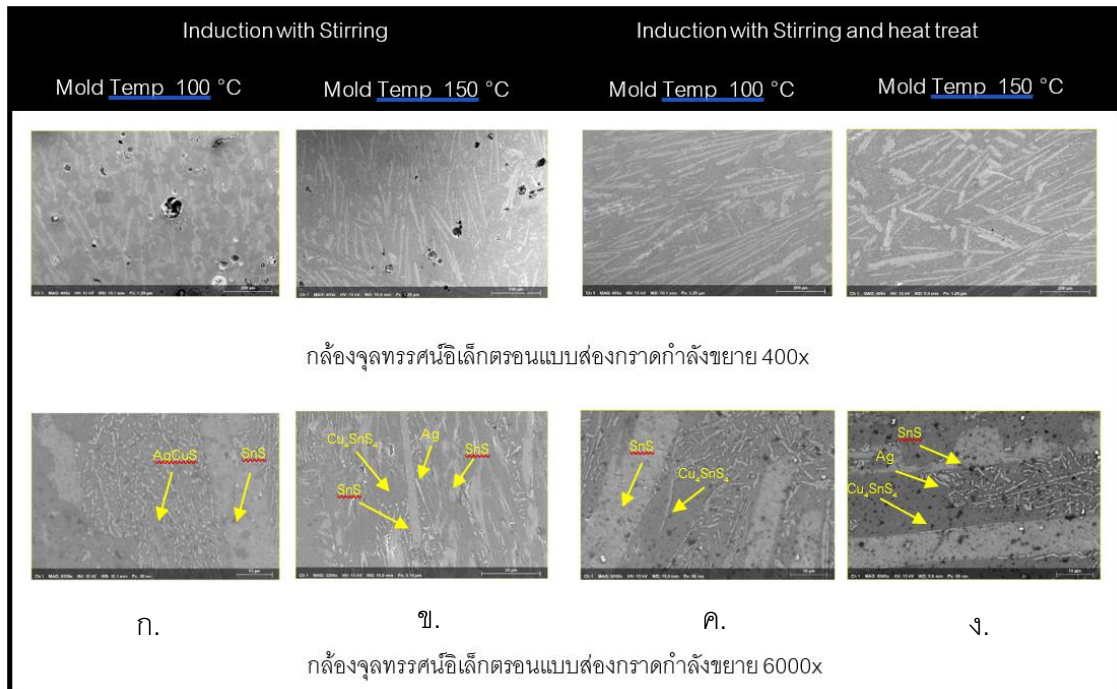


ภาพประกอบ 78 วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคแบบ Mapping Analysis การทดลองแบบกวนและ  
ป่มที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 100 °C



ภาพประกอบ 79 วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคแบบ Mapping Analysis การทดลองแบบกวนและบ่มที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 150 °C

ในภาพประกอบ 74ง) เป็นกระบวนการทดลองแบบกวนและบ่มที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 100 °C จะเห็นว่าเกิดเส้นเข็มซึ่งเป็นสารประกอบของ SnS กระจายอยู่เต็มพื้นที่ผิวของโครงสร้าง จากภาพประกอบ 78 พบธาตุ Sn มีลักษณะเป็นเส้นเข็มกระจายอยู่เต็มพื้นที่ของโครงสร้าง ส่วนธาตุอื่นๆกระจายอยู่เต็มพื้นที่เช่นเดียว และไม่เกิดรูพรุน ส่วนในภาพประกอบ 74จ) เป็นกระบวนการทดลองแบบการกวนและบ่มที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 150 °C เห็นว่าเกิดเส้นเข็มซึ่งเป็นสารประกอบของ SnS กระจายอยู่เต็มพื้นที่ผิวของโครงสร้างเช่นเดียวกัน ซึ่งจากวิเคราะห์ธาตุแบบ Mapping Analysis นั้นในภาพประกอบ 79 จะเห็นลักษณะเส้นเข็มของธาตุ Sn ที่จะสังเกตเห็นเส้นเข็มในตำแหน่งของธาตุ Sn กระจายอยู่เต็มพื้นที่ของโครงสร้าง ส่วนธาตุอื่นๆกระจายอยู่เต็มพื้นที่



ภาพประกอบ 80 โครงสร้างจุลภาคของแท่งยาถมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ กำลังขยาย 400x และกำลังขยาย 6000x ก) การทดลองกวนอย่างเดี่ยวที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 100°C ข) การทดลองกวนอย่างเดี่ยวที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 150°C ค) การทดลองกวนและป่มที่อุณหภูมิ แม่พิมพ์ 100 °C ง) การทดลองกวนและป่มที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 150 °C

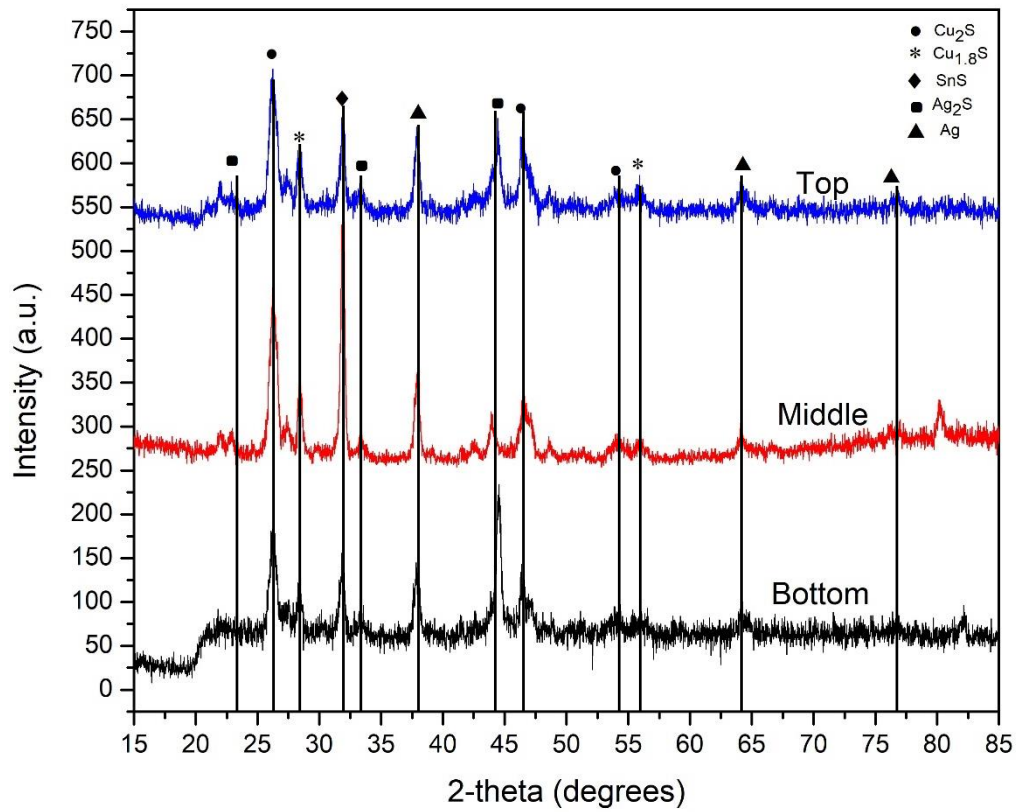
ในภาพประกอบ 80 แสดงโครงสร้างจุลภาคของแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่วใน กำลังขยาย 200 เท่า และ 3000 เท่าด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดโดยได้ทำการเปรียบเทียบ การทดลองแบบกวนอย่างเดียวกับกระบวนการกวนและป่มซึ่งพบว่าในกระบวนการกวนอย่าง เดี่ยวที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 100 °C ในภาพประกอบ 80ก) จะพบโครงสร้างจุลภาคที่เกิดสารประกอบ SnS มีลักษณะคล้ายเส้นเข็ม (Needle-like plates) และพบสารประกอบ AgCuS และส่วนการ ทดลองกระบวนการกวนอย่างเดี่ยวที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ ที่ 150 °C ซึ่งการทดลองแบบกระบวนการ กวนอย่างเดี่ยวที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 100 °C และ 150 °C ยังพบรูพรุนในพื้นที่ผิวของชิ้นงาน ใน ภาพประกอบ 80ข) พบสารประกอบ SnS มีลักษณะคล้ายเส้นเข็มเช่นเดียวกัน และยังพบ Ag ที่มี รูปร่างไม่แน่นอนแยกออกมาอยู่บริเวณขอบเกรน อีกทั้งยังมีสารประกอบ  $Cu_4SnS_4$  กระจายอยู่

เต็มพื้นผิวของโครงสร้าง ผลการทดลองกระบวนการกวนและป้อนที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 100 °C ในภาพประกอบ 80ค) พบสารประกอบ SnS มีลักษณะคล้ายเส้นเข็มที่ชัดเจนเป็นจำนวนมาก และพบสารประกอบ  $Cu_4SnS_4$  กระจายอยู่เต็มพื้นผิวของโครงสร้าง และในกระบวนการทดลองกระบวนการกวนและป้อนที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 150 °C ในภาพประกอบ 80ง) พบสารประกอบ SnS มีลักษณะคล้ายเส้นเข็มที่ชัดเจนเป็นจำนวนมากกระจายอยู่เต็มพื้นที่ อีกทั้งยังพบสารประกอบ  $Cu_4SnS_4$  แต่ทั้งในอุณหภูมิแม่พิมพ์ 100 °C และ 150 °C จะไม่พบรูพรุนในการทดลองแบบกระบวนการกวนและป้อนที่อุณหภูมิแม่พิมพ์

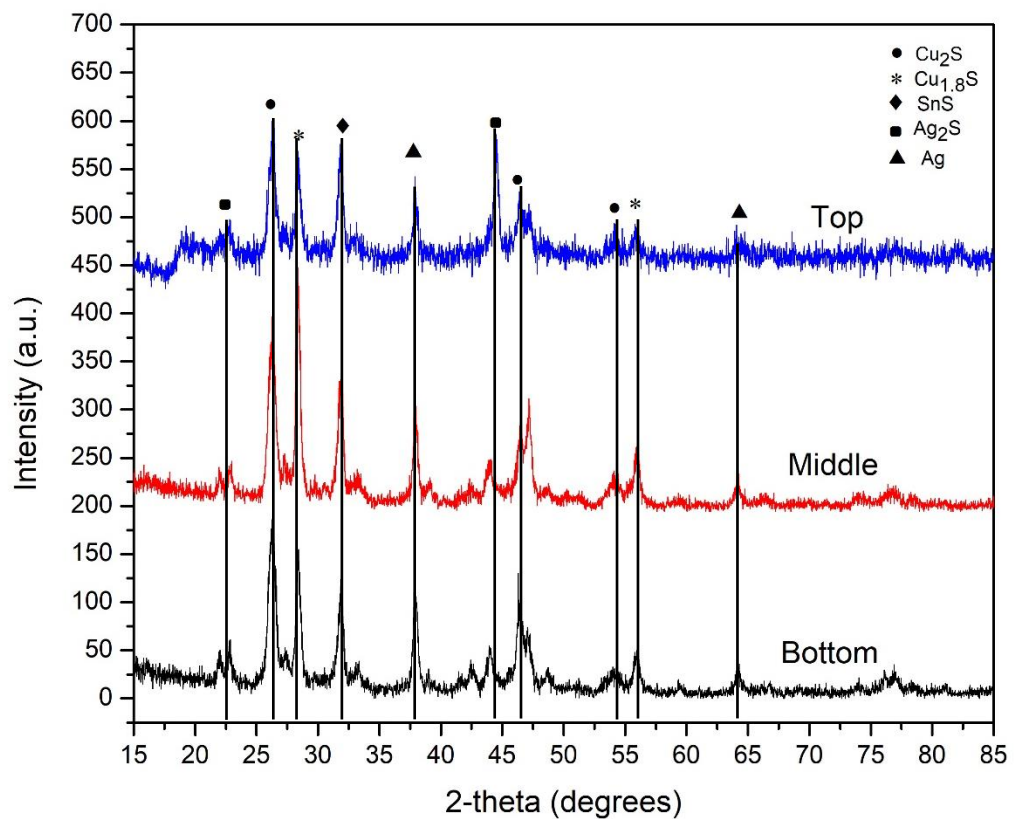
#### 4.8 วิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray Diffraction)

ผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบหาโครงสร้างทางผลึกโดยทำการตรวจสอบหาความสม่ำเสมอของแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่ว ได้มีการตรวจสอบแบ่งเป็น 3 ส่วนของแท่ง คือ 1) ส่วนบนของแท่ง 2) ส่วนกลางของแท่ง 3) ส่วนล่างของแท่ง ทำการวัดที่พื้นผิวหน้าตัดของแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่ว

4.8.1 ผลของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) ในการตรวจสอบแต่ละส่วนของแท่งยาถม



ภาพประกอบ 81 XRD ของแท่งยาถมที่เตรียมโดยการกวนและบ่มที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 100 °C และเปรียบเทียบส่วนบน ส่วนกลาง และส่วนล่างของแท่งยาถม

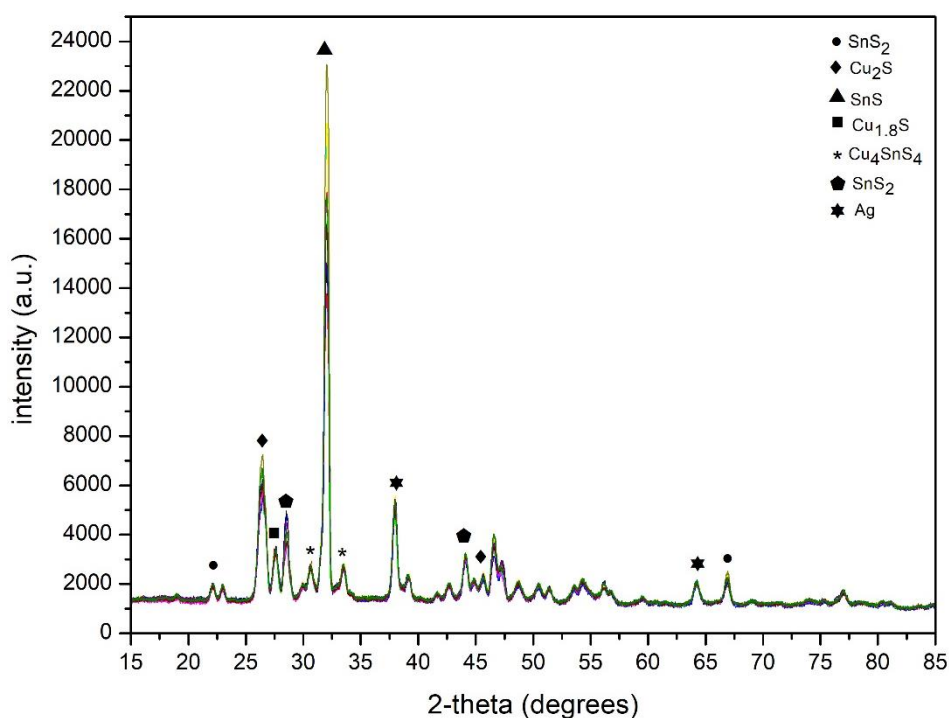


ภาพประกอบ 82 XRD ของแท่งยาถมที่เตรียมโดยการกรวนและบ่มที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 150 °C และเปรียบเทียบส่วนบน ส่วนกลาง และส่วนล่างของแท่งยาถม

จากภาพประกอบ 81 และ ภาพประกอบ 82 จากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกประกอบด้วยเฟส  $\text{Cu}_2\text{S}$  และ  $\text{Cu}_{1.8}\text{S}$  ทั้งส่วนบนของแท่งยาถม (Top) ส่วนกลางของแท่งยาถม (Middle) และส่วนล่างของแท่งยาถม (Bottom) พบว่าการกรวนและบ่มที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 150 °C มีค่าความเข้มของ  $\text{Cu}_2\text{S}$  ที่สูงกว่า ค่าความเป็นผลึกมีมากกว่าโดยสังเกตค่าความเข้ม (Intensity) ของโลหะผสม  $\text{Cu}_2\text{S}$  เมื่อเปรียบเทียบกับสารประกอบอื่นๆ ที่ในแท่งยาถมในทุกๆบริเวณ

#### 4.8.2 ผลของการตรวจสอบเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) ในการทดสอบซ้ำในเงื่อนไขการทดลองเดิม

จากการวิเคราะห์โครงสร้างทางผลึกการกวนและบ่มที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 150 °C ใช้เตาอินดักชันในการหลอมโลหะ ได้มีการทำซ้ำการทดลองทั้งหมด 8 ครั้ง และได้มีการนำผลเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันทั้ง 8 ครั้งนำมาทำเปรียบเทียบเพื่อทำการหาสิ่งแปลกปลอมที่เกิดจากการผลิต



ภาพประกอบ 83 การเปรียบเทียบโครงสร้างทางผลึกศาสตร์ของการทำการทดลองซ้ำ

ในภาพประกอบ 83 จากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) พบว่า เฟสของโลหะผสมนั้นประกอบไปด้วย  $\text{Cu}_2\text{S}$ ,  $\text{SnS}$ ,  $\text{Sn}_2\text{S}_3$  และ  $\text{Ag}$  เป็นองค์ประกอบหลัก นั้นแสดงให้เห็นว่าสารประกอบที่พบนั้นเป็นองค์ประกอบหลักของแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่ว เพราะว่าส่วนผสมหลักของแท่งยาถมดำปราศจากตะกั่ว คือ  $\text{Ag}$ ,  $\text{Cu}$ ,  $\text{Sn}$  และ  $\text{S}$  ซึ่งในผลโครงสร้างทางผลึกศาสตร์ (XRD) ได้มีการสอดคล้องกับผลที่วิเคราะห์แท่งยาถมด้วยเทคนิค EDS ดังภาพประกอบ 74 ซึ่งพบสารประกอบ  $\text{SnS}$  มีลักษณะโครงสร้างผลึกเป็นเส้นเข็มกระจายอยู่ทั่ว

แท่งยาถม และพบสารประกอบ  $\text{Cu}_4\text{SnS}_4$  เช่นเดียวกัน ซึ่งได้ทำการทดลองซ้ำเพื่อตรวจสอบสิ่ง  
แปลกที่เกิดจากกระบวนการ พบว่าในตัวอย่างของทุกการทดลองซ้ำนั้นพบสารประกอบที่  
เหมือนกันในทุกการทดลองมีรูปแบบโครงสร้างผลึกที่เหมือนกัน ซึ่งสารประกอบ  $\text{SnS}$  ที่กระจายอยู่  
ในโครงสร้างพบว่าตรงกับการตรวจสอบด้วยเทคนิค EDS ที่มีลักษณะเป็นเส้นเข็มกระจายอยู่ทั่ว  
โครงสร้างยาถมของการทดลองกวนและบ่มที่อุณหภูมิแม่พิมพ์  $150\text{ }^\circ\text{C}$





## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการดำเนินงานพัฒนาการผลิตแท่งถลุงดำปราศจากตะกั่วเพื่อใช้เชิงพาณิชย์ และสร้างมาตรฐานการผลิตด้วยการวิเคราะห์ปัจจัยการเย็นตัวที่ส่งผลต่อคุณภาพของแท่งถลุงดำปราศจากตะกั่ว งานวิจัยนี้สามารถบรรลุวัตถุประสงค์ในการ สร้างมาตรฐานการผลิต โดยได้แบ่งออกเป็น 4 การทดลอง คือ กระบวนการถลุงอย่างเดี่ยวที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 100 °C และ 150 °C กระบวนการถลุงและบ่มที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 100 °C และ 150 °C และมีการตรวจสอบ 2 รูปแบบ คือ การทดสอบการใช้งานจากช่างผู้เชี่ยวชาญในเชิงพาณิชย์และการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ เคมี และผลึกศาสตร์ โดยการใช้เครื่องมือชั้นสูง พบว่า ความพึงพอใจของการถลุงนั้นมีคะแนนความพึงพอใจที่มากที่สุด คือ กระบวนการทดลองถลุงและบ่มที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 100 °C ซึ่งมีความใกล้เคียงกับยาถลุงดำที่มีสารตะกั่วมากที่สุดด้วยคะแนนน้ำหนัก เฉลี่ยคะแนนด้านการไหล คือ 4 คะแนน ด้านสีหลังจากการถลุง คือ 4 คะแนน และด้านการตีตื้น คือ 3.27 คะแนน ส่วนผลการวิเคราะห์ด้วยมาตรฐานเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ พบว่า สีดำใกล้เคียงกับชิ้นงานเงินที่ถลุงด้วยแท่งยาถลุงดำที่มีสารตะกั่วมากที่สุด และมีรูพรุนของชิ้นงานที่น้อยที่สุดอยู่ที่ 2.31 % ส่วนค่าความเงาของชิ้นงานโดยใช้เครื่องวัดความเงา (Gloss meter) ได้ผลเท่ากับ 231 GU หมายถึงค่าความเงาที่ดีที่สุด ส่วนการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) พบว่าโครงสร้างจุลภาคของพื้นที่หน้าตัดของแท่งยาถลุงมีลักษณะที่เป็นการกระจายของเฟส SnS สม่ำเสมอ ซึ่งสอดคล้องกับผลเทคนิคเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (X-Ray Diffractometer) ซึ่งบ่งบอกถึงประสิทธิภาพในขั้นตอนการผลิตของการทดลองถลุงและบ่มที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 150 °C ซึ่งที่กล่าวมาทั้งหมดสามารถที่แบ่งได้เป็นหัวข้อดังนี้

##### 5.1.1 การกำหนดวัตถุดิบในการทดลองมาทั้งหมด 3 แบบ

- 1.1. X คือ ส่วนประกอบทั่วไปของการทำแท่งยาถลุงดำปราศจากตะกั่ว
- 1.2 X+In คือ มีการเพิ่มธาตุอินเดียมเข้ามาในส่วนประกอบของการทำแท่งยาถลุงดำปราศจากตะกั่ว
- 1.3 X+Solder คือ มีการเพิ่มบัดกรีเข้ามาในส่วนประกอบของการทำแท่งยาถลุงดำปราศจากตะกั่ว

### 5.1.2 การเลือกใช้อุปกรณ์ในการหลอมแท่งยาตามปราศจากตะกั่วทั้งหมด 2 แบบดังนี้

1 หัวเป่าไฟ (Torch Melting) ทางผู้วิจัยได้มีการเรียนรู้ในอุปกรณ์การหลอมนี้ เพื่อที่จะต่อยอดไปสู่อุปกรณ์การหลอมอื่นๆต่อไป โดยกระบวนการทดลองนั้นใช้กระบวนการทดลองคล้ายกับการทำแท่งยาตามแบบดั้งเดิมหรือแบบมีสารตะกั่วอยู่ในส่วนประกอบ

2 เตาอินดักชั่น (Induction Melting Furnace) อุปกรณ์นี้ใช้พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าในการให้ความร้อนโดยทางผู้วิจัยแบ่งการทดลองออกเป็นทั้งหมด 4 การทดลอง

2.1 กระบวนการกวนอย่างเดี่ยวที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 100 °C

2.2 กระบวนการกวนอย่างเดี่ยวที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 150 °C

2.3 กระบวนการกวนและบ่มที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 100 °C

2.4 กระบวนการกวนและบ่มที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 150 °C

### 5.1.3 การแบ่งการทดสอบแท่งยาเพื่อทำการวัดหาคุณภาพโดยแบ่งออกเป็น 2 แบบดังนี้

5.1.3.1 การวัดคุณภาพแท่งยาปราศจากตะกั่วนั้นโดยทำการส่งให้ช่างลงมทำการลงมและตอบบแบบสออบตามกลับมาเพื่อวัดผลคุณภาพของแต่ละกระบวนการทดลองในกระบวนการทดลอง

ผู้วิจัยทำการเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ลงมด้วยแท่งยาที่มีสารตะกั่วจะเห็นว่าการทดลองกวนและบ่มที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 150 °C จะมีคะแนนเฉลี่ยรวมทั้งหมดคือ 3.72 คือได้คะแนนความพึงพอใจจากช่างมากที่สุดในทุกกระบวนการทดลองอื่นๆ และมีความพึงพอใจใกล้เคียงกับชิ้นงานที่ลงมด้วยยาที่มีสารตะกั่วมากที่สุด

5.1.3.2 การวัดคุณภาพแท่งยาปราศจากตะกั่วโดยใช้เครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ในการวัดผลโดยทางผู้วิจัยได้ทำการวัดผลจากชิ้นงานที่ทำการลงมเรียบร้อยแล้ว

ผลของการวัดสีในระบบ CIE-Lab นั้นโดยค่าที่น้อยที่สุดจะมีความดำมากที่สุด เมื่อทำการเปรียบเทียบกับ ชิ้นงานที่ลงมด้วยแท่งยาที่มีสารตะกั่วที่ใกล้เคียงที่สุดก็คือกวนและบ่มที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 150 °C ต่อมาในส่วนการวัดรูพรุนของชิ้นงานโดยใช้โปรแกรม ImageJ ในการคำนวณหาร้อยละปริมาณรูพรุนในชิ้นงานลงม ถ้าค่ายิ่งน้อยจะมีร้อยละปริมาณรูพรุนในชิ้นงานลงม ที่ต่ำ โดยทำการเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ลงมด้วยแท่งยาที่มีสารตะกั่วที่ใกล้เคียงที่สุดคือชิ้นงานของการทดลองกวนและบ่มที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 150 °C ที่ลงมด้วยแท่งยา

ถมและในส่วนของการวัดค่าความเงาของชิ้นงานโดยใช้เครื่องวัดความเงาโดยข้อมูลถ้ามีค่ายิ่งมาก จะยิ่งมีค่าความเงาที่มาก ในการเปรียบเทียบกับชิ้นงานเงินที่ลงถมด้วยแท่งยาถมที่มีสภาวะที่เสถียรจะสังเกตเห็นว่าเงินที่ใกล้เคียงที่สุดคือ การทดลองกวนและบ่มที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 150 °C

#### 5.1.4 การตรวจสอบหาโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมี

##### 5.1.4.1 โครงสร้างจุลภาค

การทดลองการกวนอย่างเดี่ยวที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 100 °C และ 150° ยังเกิดรูพรุนอยู่ในโครงสร้างจุลภาคของแท่งยาถมอยู่ส่วนในกระบวนการทดลองการกวนและบ่มที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ 150 °C นั้นจะไม่เกิดรูพรุนในโครงสร้างจุลภาคของแท่งยาถม

##### 5.1.4.2 องค์ประกอบทางเคมี

โดยทำการเปรียบเทียบโดยใช้ เทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (XRD) ในการตรวจสอบทางผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบประสิทธิภาพในการผลิตนั้นว่าทุกส่วนของแท่งนั้นมีประสิทธิภาพเท่ากันหรือไม่ ผลของโครงสร้างทางผลึกศาสตร์นั้นจะเห็นว่าในทุกส่วนของแท่งมีโครงสร้างทางผลึกศาสตร์เหมือนกันในทุกส่วนไม่มีสิ่งแปลกปลอมอื่นๆเข้ามาในกระบวนการทดลอง

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัย ผู้วิจัยขอเสนอแนะดังต่อไปนี้

- 1.สามารถพัฒนาต่อยอดได้โดยนำเอาระบบการทำงานอัตโนมัติของเครื่องจักรในระดับโรงงาน (Automation Machine) เข้ามาในกระบวนการผลิต อาทิเช่น การกวนเมื่อเต็มธาตุกัมมันต์นั้นสามารถที่จะกวนได้โดยใช้เครื่องแทนการกวนของมนุษย์เพราะจะทำให้การกวนที่มีลักษณะเสถียรมากกว่า และสามารถกำหนดรอบการกวนได้

- 2.การลงถมอาจจะมีการสร้างเครื่องมือการลงถมที่สามารถที่กำหนดอุณหภูมิในช่วงระหว่างการลงถมจะได้ทราบจุดหลอมเหลวของแท่งยาถม และเพื่อให้ทราบว่าในแต่ละรูปแบบชิ้นงานเครื่องถมควรใช้อุณหภูมิในการลงถมเท่าไร



## บรรณานุกรม

- Arney, J. S., Ye, L., และ Banach, S. (2006). Interpretation of gloss meter measurements. *Journal of Imaging Science and Technology*, 50(6), 567-571.
- Berns, R. S., Motta, R. J., และ Gorzynski, M. E. (1993). CRT colorimetry. Part I: Theory and practice. *Color Research & Application*, 18(5), 299-314.
- Chen, W., Xue, S., Wang, H., และ Hu, Y. (2010). Effects of Ag on properties of Sn-9Zn lead-free solder. *Rare Metal Materials and Engineering*, 39(10), 1702-1706.
- E. Brepohl. (2001). The Theory & Practice of Goldsmithing. 370-372.
- Epp, J. (2016). X-ray diffraction (XRD) techniques for materials characterization *Materials characterization using nondestructive evaluation (NDE) methods* (81-124): Elsevier.
- Goldstein, J. I., Newbury, D. E., Michael, J. R., Ritchie, N. W. M., Scott, J. H. J., และ Joy, D. C. (2017). *Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis*: Springer.
- K.Wongpreedee, P. Sriukho, P.Ruethaitananon, S.Harbantan, และ S.Kedsin. (2558). Thai Patent number. 1101001747. สืบค้นจาก <https://ir.swu.ac.th/jspui/bitstream/123456789/22569/1/patent1101001747.pdf>
- Li, G.-y., และ Shi, X.-q. (2006). Effects of bismuth on growth of intermetallic compounds in Sn-Ag-Cu Pb-free solder joints. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 16, s739-s743.
- Pathra Srisukho, และ Kageeporn Wongpreedee. (2013). The Effects of Depositing Sn-Ag-Cu-S Systems at Different Temperatures on Silver Substrates. *Advanced Materials Research*, 787, 167-171.
- Pathra Srisukho, Panphot Ruethaitananon, และ Kageeporn Wongpreedee. (2011). *Microstructure and Segregation of Sn-Ag-Cu-S Nielli-Inlay Alloys for Jewelry Industry*.
- Schneider, C. A., Rasband, W. S., และ Eliceiri, K. W. (2012). NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature methods*, 9(7), 671-675.
- Yu, D. Q., และ Wang, L. (2008). The growth and roughness evolution of intermetallic

compounds of Sn–Ag–Cu/Cu interface during soldering reaction. *Journal of Alloys and Compounds*, 458(1-2), 542-547.

Zou, H. F., Zhang, Q. K., และ Zhang, Z. F. (2009). Eliminating interfacial segregation and embrittlement of bismuth in SnBi/Cu joint by alloying Cu substrate. *Scripta Materialia*, 61(3), 308-311.

คู่มือผู้รับผิดชอบด้านพลังงาน(โรงงาน). (2553). บทที่ 3 เตาอุตสาหกรรม.

ณัฐกฤตา เพ็ญแสง และคณะ. (2552). การศึกษาของค์ประกอบและสมบัติของยาถม. (วทบ.วัสดุศาสตร์ (อัญมณีเครื่องประดับ)). มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, กรุงเทพฯ.

วีระศักดิ์, และ อุดมกิจเดชา. (2543). เครื่องมือวิจัยทางวัสดุศาสตร์ : ทฤษฎีและหลักการทำงานเบื้องต้น = *Materials science research instruments : theories and basic principles*. กรุงเทพฯ: สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ศุภฤกษ์ เห็นประเสริฐแท้. (2555). ทำไมต้องมีเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์. เอกสารประกอบการอบรมเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน และเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์, 12-18.

สมาคมเครื่องถมและเครื่องเงินไทย. (2512). สมาคมเครื่องถมและเครื่องเงินไทย : *Thai Niello & Silver Ware Association*. กรุงเทพฯ: พระนคร.

สมาคมเครื่องถมไทย. (2509). สมาคมเครื่องถมไทย. กรุงเทพฯ: พระนคร : ม.ป.พ.



ประวัติผู้เขียน

