

การศึกษาความเป็นไปได้ในการลดต้นทุนในเครื่องประดับเงินโดยใช้เทคนิคการหล่อกึ่งแข็ง



นายปัญญา วิโรจน์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการและวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Feasibility Study Of Shrinkage Porosity Reduction In Silver Jewelry By Semi-Solids
Casting Technique



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Metallurgical and Materials

Engineering

Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2014

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาความเป็นไปได้ในการลดต้นทุนในเครื่องประดับเงินโดยใช้เทคนิคการหล่อกึ่งแข็ง
โดย	นายปัญญา วิโรจน์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโลหการและวัสดุ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ดร.บุญรัตน์ โล่ห์วงศ์วัฒน์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ดร.มาวิน สุประดิษฐ์ ณ อยุธยา)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ดร.บุญรัตน์ โล่ห์วงศ์วัฒน์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ราชธีร์ เตชไพศาลเจริญกิจ)

ปัญญา วิโรจน์ : การศึกษาความเป็นไปได้ในการลดรูพรุนในเครื่องประดับเงินโดยใช้เทคนิคการหล่อกึ่งแข็ง (Feasibility Study Of Shrinkage Porosity Reduction In Silver Jewelry By Semi-Solids Casting Technique) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ดร.บุญรัตน์ โล่ห์วงศ์วัฒน์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ. ดร. เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร, 110 หน้า.

ในปัจจุบันกระบวนการผลิตเครื่องประดับจากโลหะเงินผสม เป็นกระบวนการผลิตด้วยกรรมวิธีการหล่อไส้ผึ้ง (Lost wax casting) ในกระบวนการผลิตในปัจจุบันพบว่าเกิดปัญหาในการผลิตชิ้นงานที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้คือ รูพรุนที่เกิดจากการหดตัวของน้ำโลหะจากสถานะน้ำโลหะหลอมเหลวไปยังโลหะในสถานะของแข็ง

ในการหล่อโลหะกลุ่มอื่นๆ เช่น โลหะอลูมิเนียมผสม กระบวนการหล่อวิธีใหม่ที่มีการพัฒนาขึ้นเพื่อลดปัญหารูพรุนที่เกิดจากการหดตัวของน้ำโลหะคือกระบวนการหล่อกึ่งแข็ง (Semi-solid casting) ซึ่งเป็นกระบวนการหล่อน้ำโลหะในสถานะกึ่งแข็งกึ่งเหลว (Slurry) เข้าสู่แบบ ขณะวิจัยได้พยายามประยุกต์นำวิธีการหล่อกึ่งแข็งมาใช้ในกระบวนการผลิตเครื่องประดับเพื่อพัฒนากระบวนการผลิตให้ดียิ่งขึ้น โดยเลือกใช้กระบวนการหล่อกึ่งแข็งโดยการกวนด้วยแก๊ส (Gas Induced Semi-Solid process, GISS) ซึ่งเป็นการสร้างของแข็งในน้ำโลหะหลอมเหลวจากการเป่าแก๊สเฉื่อยอุณหภูมิต่ำผ่านทางแท่งกราไฟต์ลงไปใต้น้ำโลหะหลอมเหลว เมื่อแก๊สสัมผัสกับน้ำโลหะที่มีอุณหภูมิสูง จะเป็นการลดอุณหภูมิของน้ำโลหะลงเข้าสู่สถานะกึ่งแข็งกึ่งเหลว

จากผลการทดลองพบว่าสามารถลดปัญหารูพรุนจากการหดตัวของน้ำโลหะได้ การเพิ่มเวลาในการกวนด้วยแก๊สจะส่งผลให้ปริมาณของสัดส่วนของแข็งในน้ำโลหะเพิ่มขึ้นซึ่งจะส่งผลต่อความสามารถในการเติมเต็มแบบ นอกจากนี้สมบัติทางกลของชิ้นงานก็ดีขึ้นทั้งค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้น 2 เท่าและความแข็งแรงแรงดึงเพิ่มขึ้นจาก 150 MPa เป็น 210 MPa ซึ่งเป็นผลมาจากโครงสร้างจุลภาคที่เปลี่ยนไป

ภาควิชา วิศวกรรมโลหการ
สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการและวัสดุ
ปีการศึกษา 2557

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5570281321 : MAJOR METALLURGICAL AND MATERIALS ENGINEERING

KEYWORDS: STERLING SILVER / SEMI-SOLID CASTING / SHRINKAGE POROSITY / GAS INDUCED SEMI-SOLID PROCESS

PUN WIROT: Feasibility Study Of Shrinkage Porosity Reduction In Silver Jewelry By Semi-Solids Casting Technique. ADVISOR: BOONRAT LOHWONGWATANA, Ph.D., CO-ADVISOR: ASST. PROF. EKASIT NISARATANAPORN, Ph.D.}, 110 pp.

Silver jewelry manufacturers mostly use investment casting or lost wax casting technique. During solidification of molten silver alloys, shrinkage porosity is a common inherited problem which occurs during the transformation of liquid metal state to solid metal state.

Semi-solid casting has been developed around the turn of the 19th century to help reduce shrinkage porosity in aluminum alloys casting. The casting process takes place when the molten liquid partially transforms into semi-solid or slurry prior to casting into the mold. We have developed the semi-solid casting process in silver jewelry manufactory by gas induced semi-solid (GIIS) process. The GIIS process utilizes the principle of rapid heat extraction and vigorous local stirring using the injection of fine gas bubbles through a graphite diffuser.

We have demonstrated the shrinkage porosity was indeed decreased. The bubbling time, which is one of the parameters determining the solid fraction, has been optimized for mold-filling capability. Key mechanical properties have been improved that are the hardness increasing by a factor of two and the ultimate tensile strength (UTS) increasing from 150 MPa to 210 MPa due to the microstructural changed.

Department: Metallurgical Engineering Student's Signature

Field of Study: Metallurgical and Advisor's Signature

Materials Engineering Co-Advisor's Signature

Academic Year: 2014

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัทบิวตี้เจมส์ แพคตอรี จำกัด สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย และสมาคมผู้ค้าอัญมณีและเครื่องประดับ ที่ช่วยสนับสนุนเงินวิจัย

ขอขอบพระคุณ คุณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งกรุณาสละเวลาให้ความรู้ คำแนะนำ ความช่วยเหลือ การแก้ปัญหา ตลอดจนเจื้อเพื่อเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ตลอดการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ นางศิริรัตน์ นิสาร์ตนพร และ นายเสนีย์ มณีเพชร คุณครูปฏิบัติการ และ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่สำนักงาน (ธุรการ) ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการใช้งานสถานที่และอุปกรณ์ต่างๆ ของภาควิชาฯ และช่วยเหลือในการติดต่อประสานงานต่างๆ ขอขอบพระคุณ สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย และศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่เอื้อเพื่อเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดสอบ

ขอขอบพระคุณ นายจตุพล โอภาไพบูลย์ นายธนิศร์ มีบุปผา นายกำพล ลีลาฤดี นางสาวเชษฐาภาภา ยิบยิณธรรม และนิสิตปริญญาโทและเอก ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งกรุณาสละเวลา ให้ความรู้ คำแนะนำ และความช่วยเหลือตลอดการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ อาจารย์เชษฐา พันธุ์เครือบุตร ผู้ช่วยศาสตราจารย์อาจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ นิสาร์ตนพร และอาจารย์ ดร.บุญรัตน์ โล่ห์วงศ์วัฒน์ ผู้ประสิทธิ์ประสาทศาสตร์วิชาความรู้ ผู้ที่คอยช่วยเหลือให้คำปรึกษาจนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงมาได้ด้วยดี

ท้ายที่สุด ขอขอบคุณครอบครัวผู้เป็นที่รักและผู้ให้กำลังใจตลอดการทำงานวิจัยด้วยดีมาตลอด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์.....	3
2.1 โลหะเงิน (Silver).....	3
2.1.1 เงินสเตอร์ลิง (Sterling Silver).....	3
2.1.2 ปัญหาในกระบวนการผลิตในปัจจุบัน	4
2.2 การหล่อโลหะกึ่งแข็ง (Semi-Solid Casting).....	4
2.3 สัณฐานวิทยาของโลหะกึ่งแข็ง (Morphology of semi-solid metal).....	6
2.4 กระบวนการผลิตโลหะกึ่งแข็ง	6
2.4.1 การผลิตวัสดุตั้งต้น (Feedstock) ที่ไม่มีโครงสร้างเดนไดรต์	7
2.4.2 การกวนโดยใช้แก๊ส (Gas Induced Semi-Solid; GISS)	8
2.4.3 การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างแก๊สและของเหลว [18]	9
2.5 การโตของอนุภาคของแข็งในสภาวะกึ่งแข็งกึ่งเหลว (Growth morphology)	11
2.6 ผลของโครงสร้างจุลภาค (Effect of microstructure).....	13
2.6.1 ผลของโครงสร้างจุลภาคต่อสมบัติทางกล.....	13

2.6.2 ผลต่อสมบัติการต้านทานการกัดกร่อน.....	15
2.7 ลักษณะการแข็งตัวของน้ำโลหะหลอมเหลว	16
2.7.1 การแข็งตัวของน้ำโลหะในสภาวะสมดุล (Equilibrium Solidification)	17
2.7.2 การแข็งตัวของน้ำโลหะในสภาวะที่ไม่สมดุล (Non-Equilibrium solidification).....	17
2.8 การวัดค่าสัดส่วนของแข็ง (Solid fraction measurement).....	20
2.8.1 โลหะวิทยาเชิงปริมาณ (Quantitative metallography)	21
2.8.2 การวิเคราะห์ทางอุณหพลศาสตร์ (Thermal Analysis) [26]	22
2.8.2.1 อนุพันธ์อันดับที่หนึ่ง (First Derivative).....	22
2.8.2.2 เส้นฐานและสัดส่วนของแข็ง (Base line and fraction solid).....	23
2.8.3 การวิเคราะห์ด้วยสมการทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamic models).....	25
2.9 พฤติกรรมของน้ำโลหะในสภาวะกึ่งแข็งกึ่งเหลว	25
บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการทดลอง.....	28
3.1 แผนการดำเนินงาน	28
3.2 การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี	29
3.3 ทิศทางการเย็นตัวของน้ำโลหะ (Solidification Path).....	29
3.3.1 การคำนวณด้วยกฎคานงัด (Lever-rule).....	29
3.3.2 โมเดลของไชล์ (Scheil-Gulliver).....	29
3.4 การศึกษาสมบัติทางความร้อน (Thermal Analysis).....	30
3.5 การออกแบบชิ้นงาน	30
3.6 การหล่อชิ้นงาน.....	31
3.6.1 กระบวนการหล่อด้วยวิธีเดิม	31
3.6.2 กระบวนการหล่อกึ่งแข็ง	31
3.7 การศึกษาสัดส่วนของแข็ง (Solid Fraction Measurement)	31

3.7.1 การวัดค่าสัดส่วนของแข็งด้วยวิธีการวิเคราะห์ทางความร้อน (Thermal Analysis)...	31
3.7.2 การวัดค่าสัดส่วนของแข็งด้วยวิธีการคำนวณด้วยโมเดลอุณหพลศาสตร์.....	31
3.8 การศึกษาโครงสร้างภายในชิ้นงาน	31
3.8.1 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope).....	32
3.8.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope).....	32
3.8.3 การดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Absorption)	32
3.9 รูพรุนที่เกิดจากการหดตัวของน้ำโลหะ (Shrinkage Porosity)	35
3.9.1 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope).....	35
3.9.2 การถ่ายภาพรังสีส่วนตัดโดยอาศัยคอมพิวเตอร์ (CT-Scan (Computed tomography)).....	35
3.10 การทดสอบสมบัติทางกล.....	36
3.10.1 ความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness).....	36
3.10.2 ความทนแรงดึง (Tensile strength).....	37
3.11 การทดสอบความต้านทานการหมอง (tarnish test).....	38
3.11.1 การทดลองในบรรยากาศบรรยากาศไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H ₂ S).....	39
3.11.2 การทดลองวัดศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน.....	39
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล	41
4.1 การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี	41
4.2 การเย็นตัวของน้ำโลหะ (Solidification Path).....	41
4.3 การวิเคราะห์ทางความร้อน.....	45
4.4 การออกแบบชิ้นงาน	46
4.5 การหล่อชิ้นงาน.....	47
4.5.1 การหล่อแบบเดิม (As-cast).....	50

4.5.2 การหล่อกึ่งแข็ง (Semi-solid casting).....	51
4.6 การศึกษาสัดส่วนของแข็ง	53
4.6.1 การวิเคราะห์ทางความร้อน	53
4.6.2 โมเดลทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamics model)	55
4.7 การศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology)	57
4.7.1 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope).....	57
4.7.2 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	60
4.7.3 การดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ (X-ray absorption near edge structure, XANES).....	61
4.8 การศึกษาการหดตัวของน้ำโลหะ.....	63
4.8.1 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope)	63
4.8.2 ภาพถ่ายจากรังสีเอ็กซ์	64
4.8.3 ภาพถ่ายจากรังสีเอ็กซ์ในรูปแบบสามมิติ (Computed tomography)	65
4.9 การทดสอบสมบัติทางกล	68
4.9.1 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์.....	68
4.9.2 การทดสอบความทนแรงดึง	68
4.9.2.1 การศึกษารอยแตกของชิ้นงาน	69
4.9.2.2 การทดสอบความทนแรงดึงของชิ้นงานในจุดต่างๆ	70
4.10 การทดสอบการต้านทานการหมอง	71
4.10.1 การทดลองในบรรยากาศไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H ₂ S).....	71
4.10.2 การทดลองวัดศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน.....	71
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	74
5.1 สัณฐานวิทยา (Morphology).....	74
5.2 รูพรุนที่เกิดจากการหดตัวของน้ำโลหะ (Shrinkage Porosity)	74

5.3 ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test).....	74
5.4 สมบัติทางกลความทนแรงดึง (Tensile Test).....	75
5.5 การทดสอบการต้านทานการหมอง (Tarnish Test).....	75
5.6 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	75
รายการอ้างอิง.....	76
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	110



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมเครื่องประดับเป็นอุตสาหกรรมที่สำคัญอย่างมากต่อเศรษฐกิจของประเทศไทย ทั้งนี้จากข้อมูลทางสถิติรายได้จากการส่งออกในประเทศเมื่อ พ.ศ.2556 [1] พบว่ามีรายได้จากการส่งออกของเครื่องประดับมีมูลค่าประมาณคิดเป็น 3.5% ของผลิตภัณฑ์มวลรวมในประเทศ (GDP) ของประเทศ นอกจากนี้หากพิจารณาว่าโลหะใดที่ใช้ส่งออกมากที่สุดจากสถิติก็จะพบว่าโลหะเงินนั้นจะมีปริมาณส่งออกที่มากที่สุดเป็นอันดับ 1 [2] ซึ่งหากสามารถพัฒนากระบวนการผลิตเพื่อทำให้ทุนการผลิตน้อยลง ก็จะสามารถช่วยให้มูลค่าของการส่งออกเพิ่มขึ้นอีกด้วย

หากพิจารณาถึงกระบวนการผลิตเครื่องประดับในปัจจุบันพบว่า เป็นกระบวนการผลิตที่เป็น การหล่อเครื่องประดับแบบไล่ซี่ผึ้ง (Lost wax jewelry casting) เป็นวิธีการผลิตที่มีการใช้พลังงานที่สูงเนื่องจากต้องใช้อุณหภูมิให้ถึงจุดหลอมเหลวของโลหะ นอกจากนี้จากการใช้อุณหภูมิที่สูงก็จะพบ ปัญหาการหดตัวของชิ้นงานและรูพรุนที่เกิดขึ้น ดังนั้นจึงเกิดโครงการวิจัยนี้ขึ้น เพื่อจะทำการปรับปรุง กระบวนการผลิต โดยจะปรับเปลี่ยนมาใช้กระบวนการหล่อโลหะกึ่งแข็ง (Semi-Solid Casting) ใน การผลิตเครื่องประดับที่ทำจากโลหะเงินกลุ่มสเตอร์ลิง (Sterling Silver) ที่เป็นเกรดที่นิยมนำมาใช้ เป็นเครื่องประดับโดยกระบวนการหล่อโลหะกึ่งแข็งจะช่วยลดต้นทุนการผลิต ลดการเกิดรูพรุน การ หดตัวจากการหล่อ นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มสมบัติทางกลให้ดียิ่งขึ้นอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตเครื่องประดับที่ทำจากโลหะผสมเงินโดยจะปรับเปลี่ยนมา ใช้กระบวนการหล่อโลหะกึ่งแข็ง (Semi-Solid Metal Casting)
2. ศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาในการหล่อกึ่งแข็งด้วยวิธีกวนด้วยแก๊ส
3. เปรียบเทียบผลของปริมาณรูพรุนจากกระบวนการหล่อด้วยกระบวนการหล่อเดิมกับการ หล่อกึ่งแข็ง

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ศึกษาถึงสัดส่วนของแข็งและของเหลวของโลหะเงินที่เหมาะสมในกระบวนการหล่อกึ่งแข็ง
2. เปรียบเทียบปริมาณรูพรุนและการหดตัวเทียบกับการผลิตแบบเดิม
3. เปรียบเทียบสมบัติทางกล (Mechanical Properties) ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อ กึ่งแข็งกับการหล่อแบบเดิม

4. เปรียบเทียบสมบัติการต้านทานการหมอง (Tarnish Test) เทียบกับการผลิตแบบเดิม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถผลิตเครื่องประดับจากโลหะเงินด้วยกระบวนการหล่อกึ่งแข็งได้ โดยเข้าใจอิทธิพลของอุณหภูมิ เวลาที่ใช้แก๊สในการกวนในการหล่อกึ่งแข็งและลดปัญหาารุพรมที่เกิดจากการหดตัวของน้ำโลหะหลอมเหลวและเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีสมบัติทางกลที่ดียิ่งขึ้น



บทที่ 2

วรรณกรรมปริทัศน์

2.1 โลหะเงิน (Silver)

โลหะเงินเป็นธาตุชนิดหนึ่งที่นิยมใช้มาเป็นเครื่องประดับตั้งแต่สมัยโบราณ โดยโลหะเงินที่บริสุทธิ์ (Fine silver) เป็นโลหะที่มีความเหนียว มีสีขาว มีสมบัติการนำไฟฟ้าและนำความร้อนได้ดี แม้ว่าจะมีสมบัติด้านความเหนียวที่ดีแต่โลหะเงินบริสุทธิ์จะมีความแข็งแรงที่ต่ำ จึงมีการผสมธาตุอื่นๆ ลงไปเพื่อเพิ่มความแข็งแรง โดยธาตุที่นิยมผสมลงไปคือทองแดงเพื่อช่วยเพิ่มความแข็งแรงและทำให้มีสีสันทที่สวยงามขึ้น

2.1.1 เงินสเตอร์ลิง (Sterling Silver)

คำว่าสเตอร์ลิงมาจากชื่อเอสเตอร์ริง (Estering) ซึ่งเป็นชื่อของบริษัท Eastern Germans ที่ได้รับการว่าจ้างจากพระเจ้าเฮนรี่ที่ 2 ของอังกฤษ ในการผลิตเหรียญกษาปณ์ในศตวรรษที่ 12 และบางครั้งสเตอร์ริงก็จะหมายถึงเงินบริสุทธิ์ 92.5% ส่วนคอยน์ซิลเวอร์ (Coin silver) คือเหรียญที่ทำด้วยโลหะเงินผสม ก่อนปี ค.ศ. 1966

สหรัฐอเมริกาได้นำโลหะเงินมาผลิตเหรียญกษาปณ์มาใช้ในประเทศ โดยใช้เงินบริสุทธิ์ผสม 90% และทองแดง 10% แต่ในปัจจุบันในสหรัฐอเมริกาใช้เงินบริสุทธิ์เพียง 40% เท่านั้น โลหะเงินได้ถูกนำมาใช้ทำเครื่องประดับเนื่องจากคุณสมบัติที่ดี เป็นโลหะมีค่าที่ราคาไม่แพง แต่เมื่อผลิตแล้วจะสามารถจำหน่ายได้ด้วยคุณค่าของเครื่องประดับนั้นๆ

เครื่องประดับเงินเป็นที่นิยมกันมากในประเทศญี่ปุ่น โดยบริษัทเครื่องประดับหลายๆ แห่งในประเทศไทย ก็ได้ทำงานเหล่านี้ส่งออกไปขาย โดยส่วนใหญ่มักจะเป็นงานสโตร์ทั่วไป (Street ware)

ตารางที่ 1: มาตรฐานต่างๆของโลหะเงิน

Silver Standards	Silver Content (%)
Fine silver	99.9
Britania silver	95.84
Mexican silver	95
Sterling silver	92.5
Coin silver	90

ตารางที่ 2: สมบัติทางกลของเงิน [3]

สมบัติ (Properties)	โลหะเงิน (Silver)
สัญลักษณ์ (Symbol)	Ag
เลขอะตอม (Atomic number)	47
น้ำหนักอะตอม (Atomic weight)	107.86
โครงสร้างผลึก (Crystal structure)	FCC
สี (Color)	Shiny white
จุดหลอมเหลว (Melting temperature (°C))	960.8
จุดเดือด (Boiling temperature (°C))	2,193
ความร้อนแฝง Latent heat of fusion (kJ/kg)	88.2
ค่าความจุความร้อนต่อโมล (Molar heat capacity at 298.15 K (J/mol K))	20.8

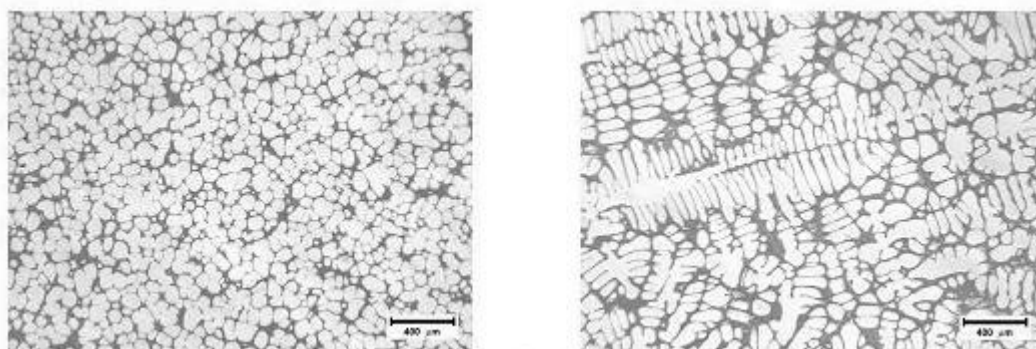
2.1.2 ปัญหาในกระบวนการผลิตในปัจจุบัน

รูพรุน (Pores) และสารเจือปน (Impurities) เป็นปัญหาหลักๆ ในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องประดับเงินอย่างมากในปัจจุบัน เพื่อที่จะแก้ปัญหานี้จึงได้เติมธาตุอื่นๆ ที่มีจุดหลอมเหลวที่ต่ำกว่าเงินลงไป จึงทำให้ส่วนผสมที่เป็นโลหะเงินน้อยกว่า 92.5% ซึ่งต่ำกว่ามาตรฐานของ Sterling Silver โดยสาเหตุต่างๆ ที่ทำให้เกิดปัญหานี้ ได้แก่ ความชื้น โพรงอากาศในแบบพิมพ์ การแข็งตัวของโลหะที่ไม่เป็นไปตามแบบแผนด้านหน้า (Non-uniform solidification front) การแข็งตัวของโลหะที่ไม่เป็นไปตามแบบแผนของแบบ (Non-uniform surface of the mold) และการหดตัวของน้ำโลหะ

2.2 การหล่อโลหะกึ่งแข็ง (Semi-Solid Casting)

การหล่อชิ้นงานเป็นกระบวนการที่นิยมใช้กันอย่างมากในกรรมวิธีการผลิตชิ้นงานโลหะ โดยการหล่อโลหะแบบเดิมนั้นจะทำโดยการขึ้นรูปโลหะหลอมเหลวแล้วปล่อยให้แข็งตัวในแม่พิมพ์ ซึ่งทำให้สามารถหล่อชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ แต่ทว่าการขึ้นหล่อโลหะจากสถานะของเหลวนั้นจะทำให้

สมบัติทางกลของผลิตภัณฑ์ด้อยลงเนื่องมาจากการเกิดรูพรุนของชิ้นงาน ซึ่งจะเกิดรูพรุนมากขึ้นเมื่อชิ้นงานมีความซับซ้อนมากขึ้นหรือมีทางเข้าของน้ำโลหะที่มีขนาดเล็ก นอกจากนี้การหล่อชิ้นงานจะทำให้เกิดโครงสร้างที่ไม่พึงประสงค์ อย่างเช่นโครงสร้างเดนไดรต์ในเนื้อโลหะที่แข็งตัว ดังรูปที่ 1 (ขวา) ซึ่งจำกัดสมบัติทางกลของโลหะอย่างมาก ในขณะที่เดียวกันการปล่อยให้โลหะเย็นตัวจากสถานะของเหลวมาสู่ของแข็งย่อมเกิดการหดตัวของผลิตภัณฑ์สูง ทำให้การผลิตชิ้นงานที่มีความใกล้เคียงกับต้นแบบเป็นไปได้ยาก และค่าความคลาดเคลื่อนของผลิตภัณฑ์กับชิ้นงานต้นแบบที่สูง จะเห็นได้ว่าแม้ว่าการผลิตผลิตภัณฑ์ด้วยกระบวนการหล่อจะให้ผลิตภัณฑ์ที่น่าพึงพอใจในแง่ของขนาดและความซับซ้อนของชิ้นงานผลิต แต่พบว่ากระบวนการหล่อแบบดั้งเดิมนั้นมีส่วนที่จะต้องพัฒนาต่อไป



รูปที่ 1 โครงสร้างจุลภาคของโลหะที่ผ่านการหล่อปกติ (ขวา) และโครงสร้างที่ผ่านการหล่อแบบกึ่งแข็ง (ซ้าย) [4]

กระบวนการหล่อโลหะกึ่งแข็ง (Semi-Solid Casting) เป็นกระบวนการหล่อชิ้นงานโลหะที่มีสถานะกึ่งของแข็งซึ่งมีลักษณะคล้ายกับเนย โดยมีสัดส่วนของแข็งอยู่ที่ประมาณ 30-65% ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะวัตถุดิบและชิ้นงานที่ต้องการผลิต เป็นกระบวนการหล่อที่ลดพลังงานที่ใช้ในการขึ้นรูปโลหะ เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปนั้นต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลว ระยะเวลาในการขึ้นรูปก็จะลดลง และปัญหาที่เกิดขึ้นจากการหดตัวของโลหะหลังจากการหล่อก็ลดลงเนื่องจากการที่รูพรุนในการหล่อแบบกึ่งของแข็งจะเกิดน้อยมาก นอกจากนี้ยังได้ขนาดของชิ้นงานที่ใกล้เคียงกับแม่พิมพ์ เนื่องจากมีการหดตัวที่น้อยมาก มีโครงสร้างจุลภาคที่มีโครงสร้างแบบกลม (Globular microstructure) ดังรูปที่ 1 (ซ้าย) จากการที่อุณหภูมิในการขึ้นรูปที่ลดน้อยลงนั้นทำให้อายุการใช้งานของแม่พิมพ์ยาวนานขึ้น เนื่องจากเกิดการสึกหรอจากกระบวนการหล่อที่น้อยลง และยังรวมถึงต้นทุนทางพลังงานที่ลดลง และระยะเวลาการผลิตต่อชิ้นงาน 1 ชิ้นที่ลดลงเพราะชิ้นงานใช้เวลาในการเย็นตัวลดลงจากอุณหภูมิการขึ้นรูปที่ลดลง ทำให้ระยะเวลาการผลิตต่อหนึ่งรอบการผลิตที่ลดลง ซึ่งจะทำให้สามารถผลิตชิ้นงานได้ปริมาณมากขึ้นต่อวัน ในขณะที่เดียวกันชิ้นงานที่เย็นตัวจะมีโครงสร้าง

จุลภาคที่มีขนาดเล็กและไม่เกิดโครงสร้างแบบเดนไดรต์จากอัตราการเย็นตัวที่เร็วขึ้น และมีรูพรุนต่ำ ทำให้ชิ้นงานมีสมบัติทางกลที่ดีขึ้น

2.3 ลักษณะวิทยาของโลหะกึ่งแข็ง (Morphology of semi-solid metal)

จากกระบวนการของการหล่อโลหะกึ่งแข็งของแข็ง (SSM) ที่เป็นการปรับปรุงกระบวนการหล่อ ซึ่งทำให้เกิดรูพรุนน้อยลง ซึ่งมีความรวดเร็วกว่ากระบวนการหล่อดั้งเดิม โดยกระบวนการหล่อโลหะกึ่งแข็งจะใช้วัสดุที่มีความหนืดสูงลักษณะที่เป็นกึ่งของแข็งและกึ่งของเหลว กระบวนการผลิตต้องอาศัยหลักการของของไหลที่สำคัญคือ สมบัติของไหลแบบธิกโซโทรปิก (Thixotropic)

สมบัติของไหลแบบธิกโซโทรปิก คือ ลักษณะหนึ่งของปรากฏการณ์ของไหลในคอลลอยด์ (Colloid) ซึ่งลักษณะการไหลที่ความสามารถในการไหลลดลงเมื่อเวลาในการไหลเพิ่มมากขึ้น โดยลักษณะการไหลดังกล่าวสามารถอธิบายให้เข้าใจได้ง่ายๆด้วยพื้นฐานของโครงสร้างจุลภาคที่ขึ้นอยู่กับแรงเฉือน ดังนั้นหากทำให้โลหะกึ่งแข็งมีสมบัติธิกโซโทรปิกแล้ว เมื่อมีการให้แรงกระทำจะทำให้มีการไหลที่ง่ายขึ้น ส่งผลให้ง่ายต่อการขึ้นรูป

เนื่องด้วยโครงสร้างของโลหะกึ่งแข็งมีลักษณะของของแข็งกับของเหลวอยู่ร่วมกัน โดยโครงสร้างที่เป็นส่วนของของแข็งจะถูกทำการผลิตให้มีลักษณะทรงกลม ทำให้โลหะกึ่งแข็งมีโครงสร้างเฟสของแข็งเป็นทรงกลม ทำให้โลหะกึ่งแข็งมีความแข็งแรงที่ต่างไปจากโลหะแบบอื่น โดยความแข็งแรงนั้นมาจากส่วนต่างๆคือ เฟสของของแข็งที่เป็นทรงกลมซึ่งมีส่วนของของเหลวกระจายตัวอยู่ภายในโครงสร้างซึ่งมีการกระจายตัวและจัดเรียงตัวกันในรูปแบบ 3 มิติทำให้เกิดโครงสร้างเสมือนโครงกระดูกให้โลหะของแข็งสามารถคงรูปอยู่ได้เมื่อมีแรงเฉือนต่ำส่วนของเหลวที่เหลือจะแทรกตัวในช่องว่างระหว่างเฟสของของแข็ง จึงทำให้เมื่อมีการให้แรงเฉือนเพิ่มมากขึ้นของเหลวจะช่วยทำให้โครงสร้างอนุภาคทรงกลมดังกล่าวเกิดการเลื่อนไหลทั้งนี้เนื่องมาจากโครงสร้างของโลหะกึ่งแข็งนั้นยึดเกี่ยวกัน 2 ลักษณะคือ การยึดกันระหว่างเฟสของแข็ง และการยึดกันระหว่างเฟสของแข็งและของเหลว

2.4 กระบวนการผลิตโลหะกึ่งแข็ง

ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อโครงสร้างของโลหะกึ่งแข็งคือ อัตราของแรงเฉือนที่ให้กับระบบขณะทำการผลิตโดยพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราของแรงเฉือนมากขึ้น ความหนืดของระบบจะมีค่าลดลง เนื่องจากการสลายตัวของเดนไดรต์และอนุภาคทรงกลมที่เกิดขึ้นใหม่เกิดการเลื่อนไหล ซึ่งในปัจจุบันมีการศึกษาและพัฒนาเพื่อนำความรู้พื้นฐานเหล่านี้ไปใช้ในกระบวนการผลิตโลหะกึ่งแข็งอย่างต่อเนื่อง โดยมีการพัฒนากระบวนการผลิตโลหะกึ่งแข็งที่แตกต่างกันขึ้นมามากกว่า 20 วิธี โดยอาศัยหลักการต่างๆ เช่น

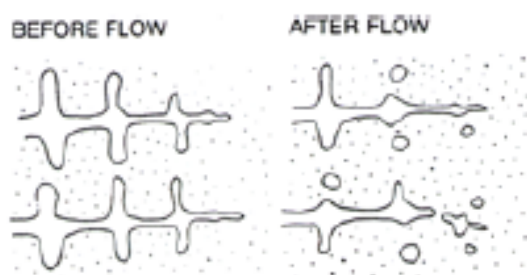
การใช้แรงทางกล การใช้แรงแม่เหล็กไฟฟ้า การใช้การสั่น เป็นต้น อย่างไรก็ตามเทคนิคต่างๆเหล่านี้สามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภทหลักคือ

-กระบวนการผลิตจากของเหลว (Rheo-route) เป็นกระบวนการที่เตรียมน้ำโลหะกึ่งแข็ง (Slurry) จากโลหะหลอมเหลว โดยการให้แรงเฉือนระหว่างเกิดการแข็งตัว และส่งผ่านน้ำโลหะกึ่งแข็งที่ได้สู่แม่พิมพ์เพื่อขึ้นรูปโดยตรง

-กระบวนการผลิตจากของแข็ง (Thixo-route) เป็นกระบวนการที่แบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการเตรียมวัสดุตั้งต้นที่มีสมบัติไรโซโทรปิก และขั้นตอนการนำวัสดุที่ได้ไปให้ความร้อนอีกครั้งให้อยู่ในช่วงอุณหภูมิที่วัสดุกึ่งแข็ง เพื่อให้ได้น้ำโลหะกึ่งแข็งพร้อมสำหรับกระบวนการขึ้นรูป เทคนิคที่กล่าวมาข้างต้นนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตโลหะกึ่งแข็งได้ทั้งในส่วนของการผลิตวัสดุตั้งต้น (Feedstock) และเทคโนโลยีการขึ้นรูปชิ้นงาน

2.4.1 การผลิตวัสดุตั้งต้น (Feedstock) ที่ไม่มีโครงสร้างเดนไดรต์

เป็นการผลิตวัสดุที่มีสมบัติไรโซโทรปิกและมีโครงสร้างจุลภาคแบบกลมซึ่งมีขนาดเกรนที่ละเอียดและกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ โดยกลไกการแตกตัวของเดนไดรต์ ดังรูปที่ 2 นั้นยังเป็นที่ถกเถียงกันอยู่ในปัจจุบันมีหลากหลายทฤษฎีได้ถูกนำเสนอขึ้น ซึ่งสามารถจำแนกได้ 2 กลุ่ม คือ



รูปที่ 2 แสดงการแตกตัวของโครงสร้างเดนไดรต์ [5]

1. ทฤษฎีการแตกตัวของเกรน (Principle of grain multiplication) [6]

ความดันที่เกิดจากก๊าซที่ปล่อยเข้าสู่ในระบบ จะทำให้บริเวณของกิ่งเดนไดรต์เกิดแตกหักออกจากเดนไดรต์หลัก (mother dendrites) นำไปสู่การเพิ่มขึ้นของบริเวณที่เกิดการแข็งตัวของโลหะ

2. ทฤษฎีการเกิดนิวเคลียสใหม่ (Cavitation-induced heterogeneous nucleation)

อนุภาคที่ไม่เปียก (Non-wetting) ในโลหะหลอมเหลวเมื่อได้รับความดันที่เพิ่มจากฟองอากาศ อนุภาคเหล่านี้จะกลายเป็นอนุภาคที่เปียกโดยโลหะหลอมเหลว และจะกลายเป็นจุดศูนย์กลางที่เกิดการแข็งตัว (Solidification center) หลังจากการเย็นตัวของน้ำโลหะบริเวณที่สัมผัสกับฟองก๊าซ ระหว่างนั้นแก๊สที่สัมผัสกับน้ำโลหะหลอมเหลวก็จะทำให้เกิดการเย็นตัวที่เร็วขึ้นบริเวณ

ผิวของฟองอากาศซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดนิวเคลียส เมื่อฟองอากาศสลายไป ก็จะทำให้เกิดนิวเคลียสที่สม่ำเสมอในโลหะหลอมเหลว

การผลิตวัสดุตั้งต้นที่ไม่มีโครงสร้างเดรนใดที่มีหลักการผลิตต่างๆดังนี้

- การกวนด้วยแรงทางกล (Mechanical stirring) [7-9] เป็นกระบวนการที่ใช้แรงทางกลในการกวนโลหะหลอมเหลวเพื่อให้เกิดแรงเฉือนระหว่างการแข็งตัว ซึ่งเทคนิคนี้สามารถพัฒนาเป็นกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง โดยโลหะกึ่งแข็งที่ได้สามารถนำไปขึ้นรูปได้โดยตรง (Rheocasting) หรือทำให้แข็งตัวเพื่อใช้เป็นวัสดุตั้งต้นสำหรับการนำไปให้ความร้อนอีกครั้งสำหรับการขึ้นรูปด้วยเทคนิคธิกโซ (Thixoforming) ต่อไป

- การกวนด้วยแรงแม่เหล็กไฟฟ้า (Magneto-hydrodynamic stirring ; MHD) [10-13] เป็นกระบวนการที่ใช้สนามไฟฟ้าแม่เหล็กเพื่อกวนน้ำโลหะในกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่อง เพื่อใช้ในการผลิตแท่งโลหะกึ่งแข็ง (Billet)

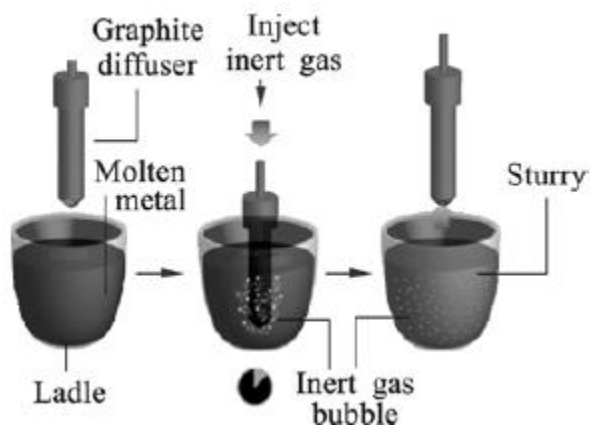
- การทำให้เกิดความเค้นและการหลอมเหลว (Stress induced and melt activated; SIMA) [14-16] เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการเสียรูปแบบเย็น (Cold deformation) กับโลหะที่ผ่านการอัดขึ้นรูปและเย็นตัวอย่างรวดเร็ว เพื่อทำให้เกิดความเครียดถาวรตกค้าง (Residual plastic strain) จากนั้นนำแท่งโลหะที่ได้ไปให้ความร้อนอีกครั้งในช่วงอุณหภูมิโลหะกึ่งแข็งเพื่อให้เกิดโครงสร้างแบบกลมที่ละเอียด

- การใช้การสั่น (Ultrasonic treatment) [14-16] เป็นการให้การสั่นสะเทือนแบบอัลตราโซนิคในขณะเกิดการแข็งตัว ซึ่งสามารถเพิ่มความเหนียวของน้ำโลหะและทำให้เกิดการแตกหักของเดรนใดรท์ ทำให้โครงสร้างที่ได้มีความละเอียดและรูปร่างกลม

- การกวนโดยใช้แก๊ส (Gas Induced Semi-Solid ; GISS) [4] เป็นกระบวนการที่ให้การกวนโดยการใส่แก๊สเข้าไปในขณะที่ให้ความร้อนโลหะซึ่งจะทำให้โครงสร้างส่วนที่เป็นเดรนใดรท์เกิดการแตกตัว วิธีนี้จะทำให้ได้เกรนที่มีขนาดละเอียดที่สุดหากเปรียบเทียบกับกระบวนการอื่นๆ

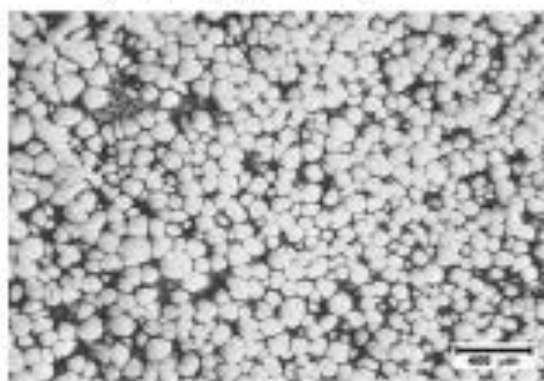
2.4.2 การกวนโดยใช้แก๊ส (Gas Induced Semi-Solid; GISS)

กระบวนการนี้จะเป็กระบวนการที่ถูกเลือกมาใช้ในการทำวิจัยนี้เนื่องจากเป็นวิธีการผลิตที่ใกล้เคียงกับกระบวนการผลิตในปัจจุบันทั้งนี้จะมีส่วนที่เพิ่มขึ้นก็คือ ระบบที่มีการกวนโดยใช้แก๊สในเบ้าหล่อดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แสดงกระบวนการหล่อกึ่งแข็งโดยการกวนด้วยแก๊ส [17]

กระบวนการนี้ถูกคิดขึ้นโดย Wannasin และคณะ [4] กระบวนการกวนโดยใช้แก๊สนั้นเป็นวิธีที่ทำให้ได้เกรนที่มีเกรนที่เล็กและละเอียดที่สุด ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มความแข็งแรงให้กับโลหะ โดยจะสามารถเปลี่ยนโครงสร้างจุลภาคที่เป็นเดรนไดรท์ที่มีขนาดของเกรนที่ใหญ่ เปลี่ยนเป็นเกรนกลมขนาดเพียง 60-80 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการ GISS [4]

2.4.3 การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างแก๊สและของเหลว [18]

ในการศึกษาการเคลื่อนที่ของแก๊สรูปรางทรงกลมในของเหลว สิ่งที่ต้องทราบเป็นอันดับแรกคือ ตัวแปรเวลาเฉพาะ (characteristic time) ได้แก่

1.) เวลาพัลเซชัน (pulsation time, t_v) ที่มีความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของโพรงอากาศ (dimension of the cavity, R_0) กับความเร็วเฉพาะของผนัง (characteristic velocity, V_0) ดังสมการ

$$t_v = R_0/V_0 \quad (1)$$

2.) เวลาครั้งที่ของความดัน (pressure equalization time, t_p) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของโพรงอากาศกับความเร็วของเสียง (velocity of sound, c_g) ในแก๊สดังสมการ

$$t_p = R_0/c_g \quad (2)$$

3. เวลาครั้งที่ของอุณหภูมิ (temperature equalization time, t_T) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของโพรงอากาศกับค่าการแพร่ทางความร้อนของแก๊ส (thermal diffusivity, a_g) ดังสมการ

$$t_T = R_0^2/a_g \quad (3)$$

ความดันของแก๊สที่อยู่ภายในโพรงอากาศ (bubble) จะเป็นเอกรูป (uniform) $t_p \ll t_v$ หรือ $v_0 \ll c_g$ แต่หากค่า $t_T \gg t_v$ หรือ $t_T \ll t_v$ จะทำให้พฤติกรรมของแก๊สนั้นจะเข้าใกล้ adiabatic หรือพฤติกรรมที่อุณหภูมิคงที่ (isothermal behavior)

ในการศึกษาการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างแก๊สและของเหลว นั้น จะสมมติให้รูปร่างของแก๊สเป็นทรงกลมสมมาตร (spherical symmetry) และมีความดันภายในแก๊สแต่ละจุดคงที่ ดังนั้นการให้ความดันแก๊สในระบบจะทำให้ความหนาแน่นของแก๊สที่ทุกๆจุดจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของแก๊ส นอกจากนี้ผลของการเคลื่อนที่ของมวล (mass transfer) และความหนืดของของเหลว (viscosity) ก็จะไม่พิจารณา จะได้สมการสถานะของแก๊สดังนี้

$$\ddot{u}_g = c_{vg}T_g \quad (4)$$

$$p_g(t) = (\gamma - 1)c_{vg}\rho_g(r, t)T_g(r, t) \quad (5)$$

$$u_l = c_l T_l, \quad \rho_l = \text{ค่าคงที่}$$

โดยที่ค่า c_{vg} คือ ค่าความร้อนจำเพาะของแก๊ส (specific heat) ที่ปริมาตรคงที่

c_l คือ ค่าความร้อนจำเพาะของของเหลว

γ คือ adabaatic index of the gas

u คือ พลังงานภายในเฉพาะของตัวกลาง (specific internal energy)

จากสมการข้างต้น ในสภาวะที่ความดันคงที่ ค่าพลังงานภายในของแก๊สในโพรงอากาศจะได้

$$E = \int_v c_{vg}T_g\rho_g dV = \frac{\rho_g v}{\gamma-1} \quad (6)$$

โดยที่ v คือ ปริมาตรของแก๊ส จากกฎข้อแรกของอุณหพลศาสตร์ ($dE = dQ - p_g dV$) จะได้สมการของความดันดังนี้

$$\frac{dp_g}{dt} = -\frac{3(\gamma-1)}{R}q_R - \frac{3\gamma p_g}{R} \frac{dR}{dt} \quad (7)$$

และจากสมการของ Rayleigh การเคลื่อนที่ของ radial pulsation จะได้

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 = \frac{p_g - p_l - 2\sigma/R}{\rho_l} \quad (8)$$

โดยที่ R คือ รัศมีของฟองอากาศ

σ คือ ค่าคงที่เฉพาะของแรงตึงผิวของเหลว (coefficient of liquid surface tension)

q_R คือ ฟลักซ์ความร้อนจากฟองอากาศไปยังของเหลว (heat flux)

ในการแก้สมการนี้วิธีที่สะดวกที่สุดคือใช้วิธีการแก้สมการในรูปตัวแปรของ Lagrange (ϵ, t) ในรูปของฟลักซ์ความร้อน จะได้

$$\rho_g c_{pg} \frac{\partial T_g(\epsilon, t)}{\partial t} = \frac{\rho_g}{\rho_g \epsilon^2} \frac{\partial}{\partial \epsilon} \left(\lambda_g \frac{\rho_g r^3}{\rho_{g0} \epsilon^2} \frac{\partial T_g(\epsilon, t)}{\partial \epsilon} \right) + \frac{dp_g}{dt} \quad (9)$$

$$\frac{\partial r}{\partial \epsilon} = \frac{\rho_{g0} \epsilon^2}{\rho_g r^2}, \quad \epsilon < R_0$$

$$\rho_l c_l \frac{\partial T_l(\epsilon, t)}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon^2} \frac{\partial}{\partial \epsilon} \left(\lambda_l \frac{r^4}{\epsilon^2} \frac{\partial T_l(\epsilon, t)}{\partial \epsilon} \right) \quad (10)$$

$$\frac{\partial r}{\partial \epsilon} = \frac{\epsilon^2}{r^2}, \quad \epsilon > R_0$$

เมื่อ $T = 0, T = T_0, r = \epsilon, R = R_0$

$\epsilon = 0, r = 0, (\partial T / \partial \epsilon)_{\epsilon=0} = 0, \epsilon = R_0, T_g = T_l,$

$$\lambda_g \frac{\rho_g R^2}{\rho_{g0} R_0^2} \left(\frac{\partial T_g}{\partial \epsilon} \right)_{R_0} = \lambda_l \frac{R^2}{R_0^2} \left(\frac{\partial T_l}{\partial \epsilon} \right)_{R_0} = -q_{R_0} \quad (11)$$

$\epsilon = \infty, T_l = T_0$

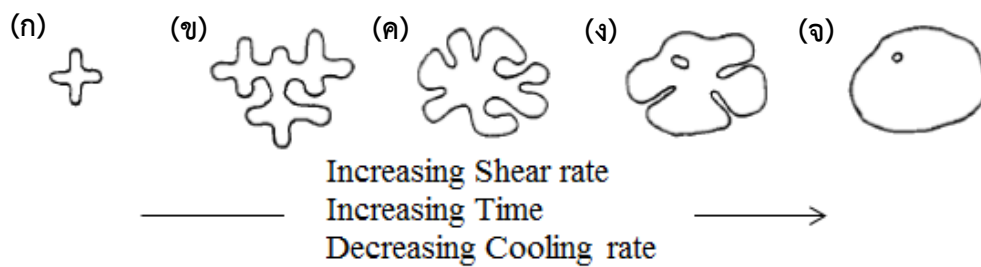
โดยที่ λ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (coefficient of thermal conductivity)

c_{pg} คือ ความจุความร้อนเฉพาะของแก๊สที่ความดันคงที่ (gas heat capacity)

2.5 การโตของอนุภาคของแข็งในสภาวะกึ่งแข็งกึ่งเหลว (Growth morphology)

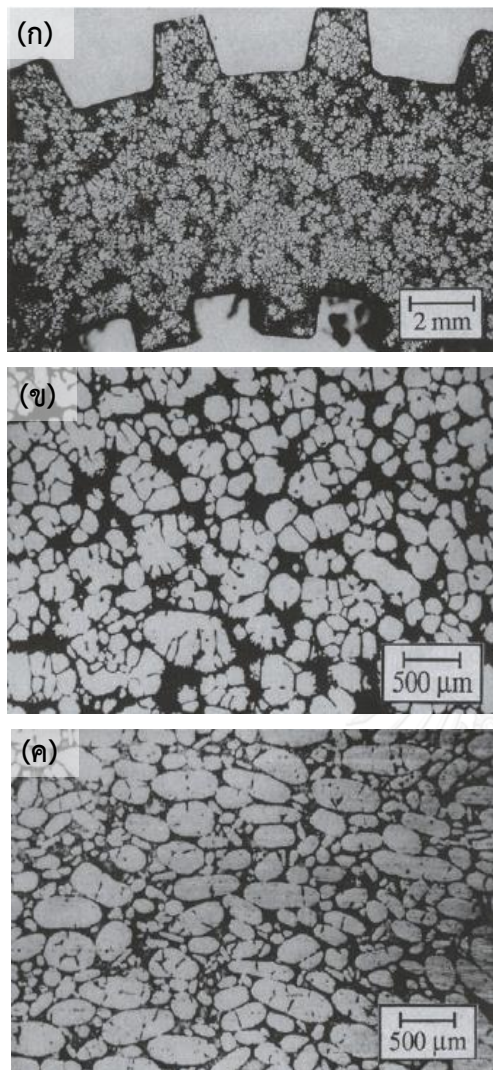
กลไกการโตของอนุภาคของแข็งในสภาวะกึ่งแข็งกึ่งเหลวนั้นยังไม่มีกลไกการเกิดที่แน่นอน โดยกลไกที่น่าจะเป็นไปได้เริ่มต้นจากเมื่อส่วนที่แตกตัวจากแกนของเดรนไดรท์ เป็นรูปร่างเดรนไดรท์ดังรูปที่ 5(ก) เมื่อเวลาผ่านไปชิ้นส่วนดังกล่าวก็จะเกิดการโตต่อดังรูปที่ 5(ข) ในขณะที่ยังมีการให้แรงเฉือนระหว่างที่เกิดการแข็งตัวของน้ำโลหะ รูปร่างของเดรนไดรท์ก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลง

ไปเป็นรูปร่างโรเซต (rosette) ดังรูปที่ 5(ค) ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดการกลืน (ripening) ของแรงเฉือน และสุดท้ายเมื่อเวลาผ่านไปก็จะกลายเป็นรูปร่างทรงกลม (spheroidal) หรือเป็นทรงรี (ellipsoidal) ดังรูปที่ 5(จ) และจะมีน้ำโลหะหลอมเหลวบางส่วนตกค้างอยู่ภายใน (entrapped liquid) สันฐานวิทยาที่เกิดขึ้นตั้งแต่รูปที่ 5(ก) ไปจนถึงรูปที่ 5(จ) นั้นจะเกิดขึ้นได้ง่ายขึ้นเมื่อมีการเพิ่มแรงเฉือน และควบคุมการเย็นตัวให้ต่ำ ในขณะที่เกิดการเย็นตัว



รูปที่ 5 แสดงรูปร่างของแข็งที่เปลี่ยนไปในขณะที่เกิดการเย็นตัวของน้ำโลหะ (ก) initial dendritic fragment (ข) dendritic growth (ค) rosette (ง) ripened rosette (จ) spheroid [5]

จากงานวิจัยของ Spencer [19] ที่ควบคุมอัตราเฉือนและอัตราการเย็นตัวของโลหะดีบุกผสมตะกั่ว ที่มีสัดส่วนตะกั่วอยู่ที่ 15 เปอร์เซ็นต์โดยมวล ได้ผลการทดลองคือ จากรูปที่ 6(ก) ที่ให้อัตราแรงเฉือนที่อัตรา 20 S^{-1} มีสัดส่วนของแข็ง 0.35 ซึ่งจะเห็นได้ว่าโครงสร้างที่เกิดขึ้นเป็นรูปร่างเดรนไดรท์ แต่เมื่อมีการเย็นตัวนานขึ้นที่การให้แรงเฉือนเท่าเดิม สัดส่วนของแข็งเพิ่มขึ้นเป็น 0.5 พบว่าโครงสร้างจุลภาคเปลี่ยนไปเป็นทรงกลมมากขึ้น ดังรูปที่ 6(ข) เมื่อเพิ่มอัตราเฉือนมากขึ้นที่อัตรา 200 S^{-1} ทำให้โครงสร้างดังรูปที่ 6(ค) ซึ่งจะคล้ายกับรูปที่ 6(ข) แต่มีน้ำโลหะหลอมเหลวตกค้างภายในน้อยกว่า



รูปที่ 6 แสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะตีบุกผสมตะกั่ว ที่มีอัตราการเย็นตัวที่ 0.006 K S^{-1}

(ก) อัตราแรงเฉือนต่ำและมีสัดส่วนของแข็งต่ำ (shear rate 20 s^{-1} , cooled to $f_s = 0.35$ จากนั้นปล่อยให้เย็นตัวในน้ำ)

(ข) เย็นตัวในขณะที่ให้อัตราแรงเฉือนต่ำ (20 s^{-1}) จนมีสัดส่วนของแข็ง 0.5 จากนั้นปล่อยให้เย็นตัวในน้ำ

(ค) เย็นตัวในขณะที่ให้อัตราแรงเฉือนสูง (200 S^{-1}) มีสัดส่วนของแข็ง 0.5 จากนั้นปล่อยให้เย็นตัวในน้ำ

2.6 ผลของโครงสร้างจุลภาค (Effect of microstructure)

ชิ้นงานที่ผ่านการหล่อกึ่งแข็ง (Semi-solid Casting) จะทำให้โครงสร้างทางจุลภาคนั้นเปลี่ยนไปจากเดิม โครงสร้างที่ได้มีปริมาณเกรนที่มากขึ้น เกรนมีขนาดเล็กลง ซึ่งโครงสร้างที่เปลี่ยนไปนั้นส่งผลต่อสมบัติต่างๆของโลหะผสมเงินดังนี้

2.6.1 ผลของโครงสร้างจุลภาคต่อสมบัติทางกล

แนวคิดเรื่องของขนาดเกรนที่มีผลต่อสมบัติทางกลถูกรายงานอยู่เป็นจำนวนมาก แต่ทฤษฎีที่นำมาใช้กันแพร่หลายในปัจจุบันเป็นของ Hall-Petch [20] ซึ่งทำการทดลองในปี ค.ศ. 1953 การทดลองของ Hall-Petch เป็นการทดลองในเรื่องเหล็กหล่อคาร์บอนต่ำ (low-carbon steel) ที่มีขนาดของเกรนที่แตกต่างกัน จากนั้นวัดค่าความเค้นจุดคราก (Yield stress) เทียบกับขนาดของเกรน

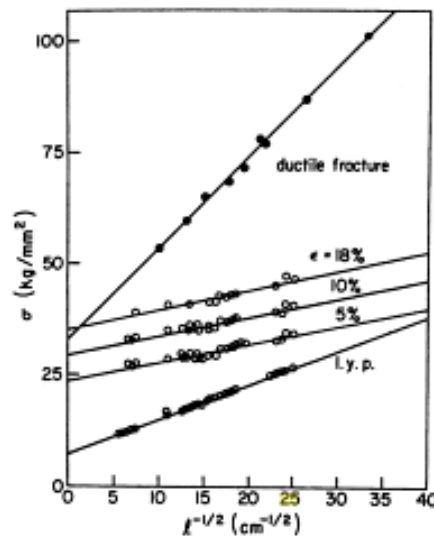
ที่เปลี่ยนไปของชิ้นงานได้ผลการทดลองดังรูปที่ 7 ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นจุดคราก (Yield stress) กับขนาดของเกรน (d) ได้ดังสมการ

$$\sigma = \sigma_0 + kd^{-\frac{1}{2}} \quad (12)$$

ซึ่งจากความสัมพันธ์นี้สามารถเขียนได้ในรูปของความสัมพันธ์ของค่าความแข็ง เมื่อขนาดของเกรนที่แตกต่างกัน ดังสมการ

$$H = H_0 + K_h d^{-\frac{1}{2}} \quad (13)$$

ตัวแปร H_0 และ K_h เป็นค่าคงที่ที่ได้จากการทดลอง ซึ่งแต่ละโลหะนั้นจะมีค่าแตกต่างกัน ค่า H_0 เป็นค่าความแข็งที่ได้มาจากการสกัดกั้นการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน (dislocation blocking) และเป็นค่าที่เกี่ยวข้องกับความเค้นของแรงเสียดทาน (friction stress) ค่า K_h เป็นค่าที่แสดงถึงการทะลุทะลวงของขอบเกรนในการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันและเป็นค่าที่เกี่ยวข้องกับจำนวนของระบบการเลื่อน (slip system)



รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นจุดครากกับขนาดของเกรนที่เปลี่ยนไปของโลหะ [20]

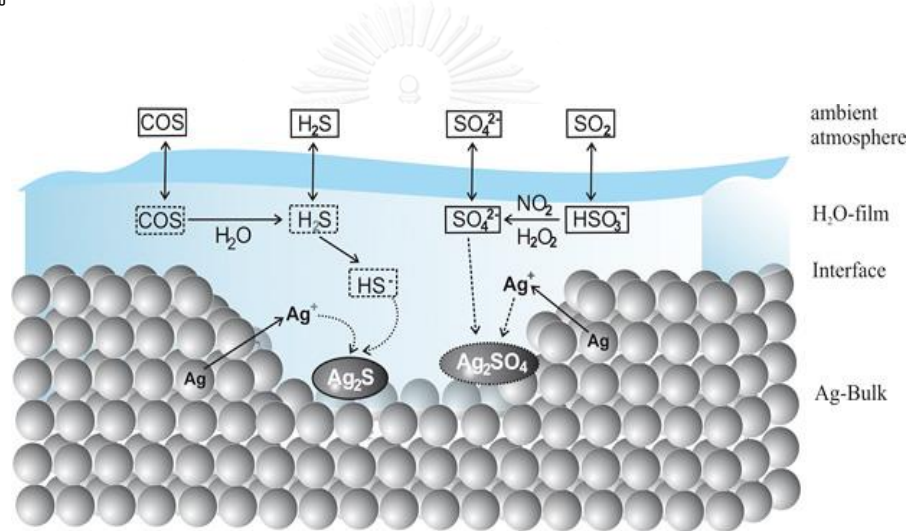
จากผลการทดลองดังรูปที่ 7 พบว่าเมื่อมีขนาดของเกรนที่เล็กลงส่งผลทำให้ค่าความเค้นที่จุดครากมีค่าสูงขึ้น ซึ่งจากการทดลองนี้ของ Hall-Petch ทำให้มีความเข้าใจเรื่องขนาดของเกรนที่มีผลต่อความแข็งแรงของโลหะที่มีผลึกได้เป็นอย่างดี โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

- ขอบเกรนจะเป็นตัวขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน

- ทิศทางการจัดเรียงตัวที่ต่างทิศกันมาก (misorientation) ทำให้ขอบเกรนมีความสามารถในการขวางการเลื่อนได้ดี ทำให้วัสดุมีความแข็งแรงมากขึ้น
- เกรนที่ละเอียด หรือมีขนาดเล็ก จะมีขอบเกรนจำนวนมาก

2.6.2 ผลต่อสมบัติการต้านทานการกัดกร่อน

การกัดกร่อนของโลหะผสมเงินที่ใช้ผลิตเป็นเครื่องประดับ โดยทั่วไปจะเป็นการกัดกร่อนที่เกิดจากสภาพแวดล้อม (environmental corrosion) โลหะผสมเงินนั้นจะเกิดการกัดกร่อนในสภาพแวดล้อมที่บรรยากาศมีก๊าซซัลเฟอร์ ตัวอย่างเช่น H_2S OCS CS_2 และ SO_2 เมื่อก๊าซเหล่านี้มาทำปฏิกิริยาที่ผิวของโลหะผสมเงินจะเกิดเป็นสารประกอบซิลเวอร์ซัลไฟด์ (Ag_2S) ที่มีสีดำปกคลุมที่ผิวดังแสดงในรูปที่ 8 ส่งผลให้ชิ้นงานที่เป็นเครื่องประดับนั้นขาดสีที่สวยงาม

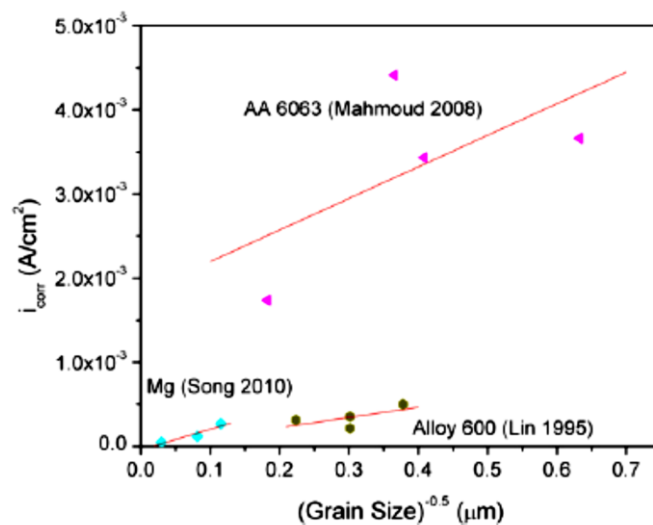


รูปที่ 8 แสดงกลไกการกัดกร่อนของโลหะผสมเงิน [21]

ชิ้นงานที่ผ่านการหล่อด้วยกระบวนการกึ่งแข็งนั้นจะมีโครงสร้างของเกรนที่เล็กและละเอียดลง ซึ่งผลของเกรนที่เปลี่ยนไปนี้จะส่งผลต่อการกัดกร่อนในบรรยากาศที่มีก๊าซซัลเฟอร์ด้วย ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเกรนกับการกัดกร่อนนั้นได้มีผู้ทำการศึกษาถึงเรื่องนี้ในโลหะต่างๆ เช่น Ralston และคณะ [22] ได้ทำการรวบรวมการทดลองต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการกัดกร่อนเทียบกับขนาดของเกรนที่เปลี่ยนไป ประกอบด้วย

- AA 6063 T-6 Al alloy ทดลองในสารละลาย 1 M HCl
- Mg ทดลองในสารละลาย 3 wt% NaCl
- Alloy 600 ทดลองในสารละลาย 50% H_2SO_4

ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 9 จากผลการทดลองพบว่าเมื่อขนาดของเกรนของชิ้นงานมีขนาดที่เล็กลงจะส่งผลให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน (i_{corr}) มีค่าที่สูงขึ้น นั้นหมายความว่าเมื่อขนาดของเกรนที่เล็กลงจะส่งผลให้อัตราการกัดกร่อนสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากเมื่อขนาดเกรนเล็กลงก็จะทำให้จำนวนหรือบริเวณของขอบเกรนที่เป็นพื้นที่ที่เกิดการกัดกร่อนได้ง่ายมีปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น



รูปที่ 9 แสดงผลของขนาดของเกรนต่ออัตราการกัดกร่อนในการทดลองต่างๆ [22]

2.7 ลักษณะการแข็งตัวของน้ำโลหะหลอมเหลว

การแข็งตัวของโลหะผสมเฟสเดียว (Solidification of Single-phase Alloys)

โลหะผสมที่สนใจในที่นี้มีสัดส่วนโมล (X_0) แสดงดังรูปที่ 10 แสดงเฟสไดอะแกรมในอุดมคติ โดยสมมติให้เส้นของแข็ง (solidus) และ เส้นของเหลว (liquidus) เป็นเส้นตรง จะได้ค่าสัมประสิทธิ์สัดส่วน (k) คือ

$$k = \frac{X_s}{X_l} \quad (14)$$

โดยที่ค่า X_s และ X_l คือสัดส่วนโมลของสารละลายในของแข็งและของเหลวในสภาวะสมดุลตามลำดับ ในอุณหภูมิที่สนใจ จากตัวอย่างในรูปที่ 10 จะเห็นได้ว่าค่า k นั้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป

การแข็งตัวของน้ำโลหะนั้นมีหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งขึ้นกับความแตกต่างของอุณหภูมิ (temperature gradients) อัตราการเย็นตัว (cooling rate) และอัตราการโต (growth rate) เพื่อที่จะศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างรอยต่อของของแข็งและของเหลวที่เคลื่อนให้ไปในทิศทางเดียว ทำได้โดยใส่โลหะผสมที่ต้องการศึกษาในเบ้าหลอม (Crucible) รูปร่างสี่เหลี่ยมจากนั้นให้ความ

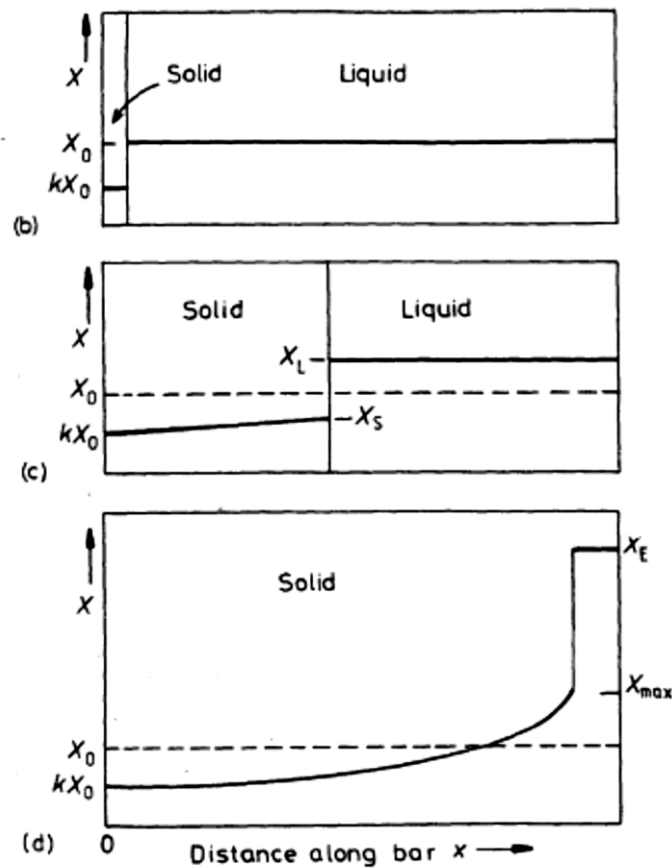


Fig. 4.21 (continued)

รูปที่ 13 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของน้ำโลหะในขณะที่แข็งตัว [23]

อย่างไรก็ตามเนื่องจากในกรณีที่ไม่มีการแพร่ในสถานะของแข็ง สัดส่วนของแข็งเฉลี่ย (X_S) จะมีค่าต่ำกว่าส่วนผสม ที่บริเวณรอยต่อ (interface) ดังแสดงเป็นเส้นประดังรูป 13a ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของของแข็งและปริมาณของเหลวที่อุณหภูมิที่สนใจสามารถวัดได้ด้วยกฎคานงัด (lever rule) โดยใช้ X_S และ X_L ซึ่งพบว่าค่าของของเหลวจะมีค่าที่มากกว่าในสารละลายมากกว่า X_0/k และสามารถจะเกิดสัดส่วนที่เป็นยูเทคติก ยกตัวอย่างเช่น การแข็งตัวของน้ำโลหะจะมีแนวโน้มที่จะใกล้อุณหภูมิ T_E ที่จะเกิดโครงสร้างยูเทคติก ของ A + B โลหะแข็งตัวสุดท้ายจะมีการกระจายของสารละลายดังรูปที่ 13 ที่มี $X_S = X_0$

การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของของแข็ง (X_S) ตามการแข็งตัวสามารถคำนวณได้จากการที่สารละลายถูกผลักรอกมายังโลหะส่วนที่ยังหลอมเหลว เมื่อเกิดของแข็งของโลหะขึ้นมาเล็กน้อย ก็จะทำให้เกิดสารละลายเพิ่มขึ้นในโลหะหลอมเหลว เมื่อไม่พิจารณาความแตกต่างระหว่างปริมาตรต่อโมล (molar volume) ระหว่าง โลหะแข็งตัวและโลหะหลอมเหลวจะได้

$$(X_L - X_S)df_S = (1 - f_S)dX_L \quad (15)$$

เมื่อ f_s คือ สัดส่วนโดยปริมาตร (volume fraction) ของ โลหะแข็งตัว หาปริพันธ์ของสมการข้างต้น โดยใช้ขอบเขตของระบบที่พิจารณา (boundary condition) เป็น $X_s = kX_0$ เมื่อ $f_s = 0$ จะได้

$$X_s = kX_0(1 - f_s)^{(k-1)} \quad (16)$$

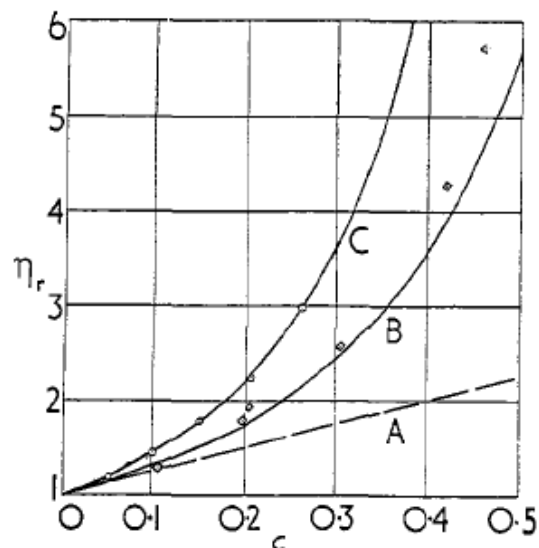
และ

$$X_L = X_0 f_L^{(k-1)} \quad (17)$$

สมการนี้เป็นที่รู้จักในชื่อ non-equilibrium lever rule หรือ Scheil equations เมื่อค่า k มีค่าน้อยกว่า 1

2.8 การวัดค่าสัดส่วนของแข็ง (Solid fraction measurement)

กระบวนการหล่อแข็งคือ การหล่อน้ำโลหะในสถานะที่มีของแข็งและของเหลวรวมกันอยู่เข้าสู่แบบ สัดส่วนของแข็ง (solid fraction) ที่เกิดขึ้นนั้นส่งผลต่อสมบัติต่างๆของน้ำโลหะแข็งแข็งกึ่งเหลว (Slurry) ได้แก่ พฤติกรรมการไหลของน้ำโลหะ ความสามารถในการเติมเต็มแบบ กล่าวคือเมื่อมีปริมาณของของแข็งเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ความหนืด (viscosity) ของน้ำโลหะลดลงจากการทดลองของ Einstein ในปี 1906 ได้ทำการศึกษาความหนืดของของไหลที่มีของแข็งปริมาณน้อย (dilute suspension) ในของเหลวแบบนิวโตเนียน (Newtonian fluid) [24] ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและสัดส่วนของแข็งที่เปลี่ยนไปจากการทดลองของ Einstein

เมื่อโยยความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและสัดส่วนของแข็งจะได้สมการดังนี้

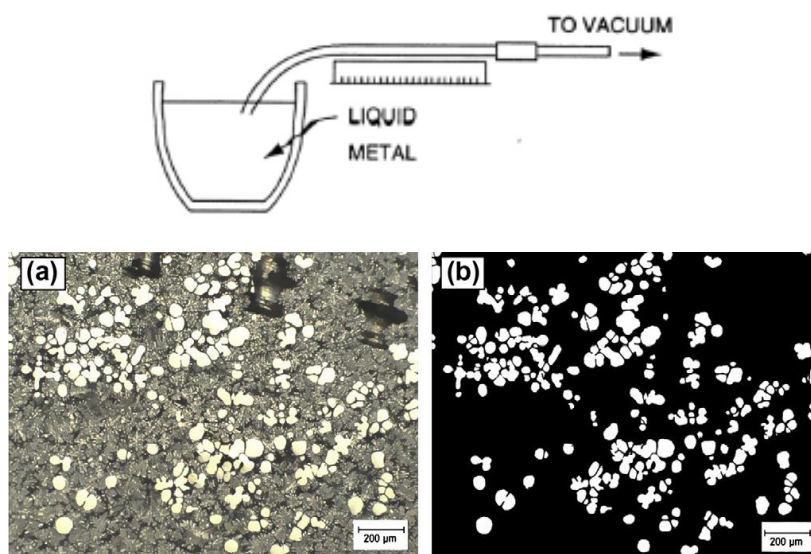
$$\mu_{suspension} = \mu \left[1 + \frac{5}{2} f_s \right] \quad (18)$$

จากสมการที่ (18) ไอส์ไตน์ได้ตั้งข้อกำหนดว่าการทดลองนี้อุณหภูมิของแข็งนั้นไม่เกิดปฏิกิริยาระหว่างกัน เลยส่งผลให้สมการนี้ไม่ได้คิดคำนวณในส่วนที่เป็นรูปร่าง พื้นผิวของของแข็ง สมการนี้จะไม่สามารถใช้ได้เมื่อสัดส่วนของของแข็ง (f_s) มีค่ามากกว่า 0.1

การวัดปริมาณของสัดส่วนของแข็งที่เกิดขึ้นในน้ำโลหะหลอมเหลวสามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีก็จะมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันดังนี้

2.8.1 โลหะวิทยาเชิงปริมาณ (Quantitative metallography)

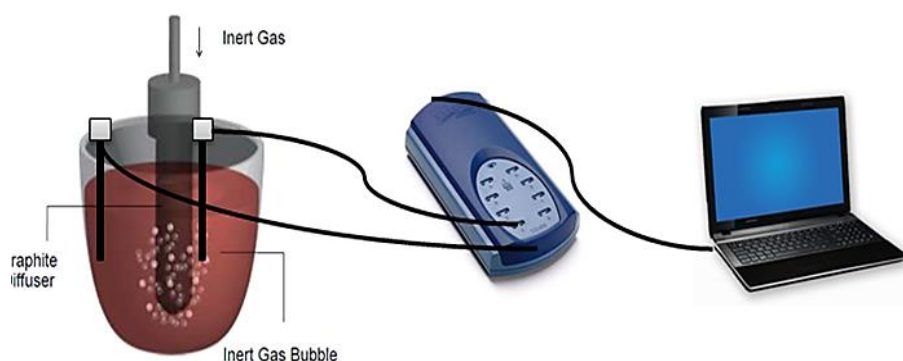
การวัดปริมาณสัดส่วนของแข็งด้วยวิธีนี้ทำโดยการนำน้ำโลหะหลอมเหลว ลดอุณหภูมิลงในช่วงกึ่งแข็งกึ่งเหลว (mushy zone) ณ อุณหภูมิที่สนใจจากนั้นใช้ท่อทองแดงที่มีระบบหล่อเย็นทำการดูดน้ำโลหะหลอมเหลวขึ้นมา (sampling) น้ำโลหะหลอมเหลวที่สัมผัสกับท่อทองแดงก็จะเกิดการเย็นตัว จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปขัดเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้น โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ภาพถ่าย (Image analysis) ดังรูปที่ 15 จากภาพจะเห็นได้ว่าของแข็งที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหล่อกึ่งแข็งที่มีลักษณะกลมๆ จะเป็นเฟสของโลหะอลูมิเนียมที่เกิดก่อน (Primary aluminum phase) บริเวณสีเทาที่เกิดขึ้นจะเป็นบริเวณที่น้ำโลหะเย็นตัว เมื่อนำรูปภาพมาทำการวิเคราะห์ต่อจากบริเวณสีขาวและสีเทาดังรูปที่ 15 ขวาก็จะได้สัดส่วนของของแข็งที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิที่สนใจ



รูปที่ 15 วิธีการวิเคราะห์เชิงปริมาณ (quantitative analysis) และการวิเคราะห์ภาพถ่าย (image analysis) [25]

2.8.2 การวิเคราะห์ทางอุณหพลศาสตร์ (Thermal Analysis) [26]

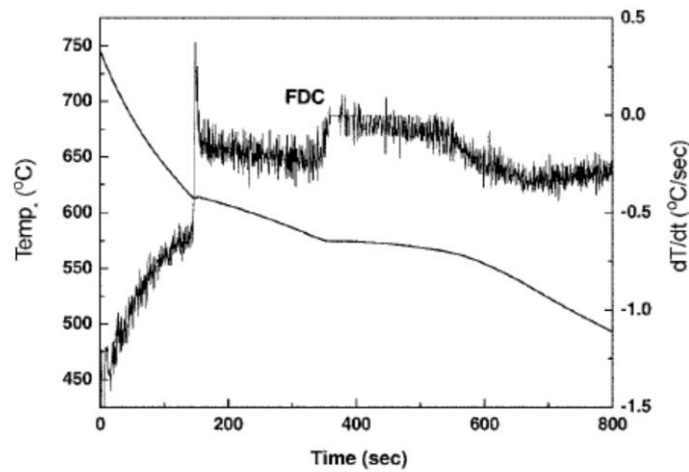
การวัดค่าสัดส่วนด้วยวิธีการวิเคราะห์ทางความร้อนที่นิยมใช้คือวิธี การวิเคราะห์เส้นโค้งการเย็นตัว (cooling curve analysis) วิธีนี้เป็นวิธีที่ใช้หลักการของคายความร้อนของน้ำโลหะเมื่อเปลี่ยนเฟสก็จะมีการคายพลังงานความร้อนที่แตกต่างกัน การศึกษาสัดส่วนของแข็งในน้ำโลหะในอุณหภูมิต่างๆเริ่มต้นจาก การบันทึกค่าอุณหภูมิและเวลา (Temperature v.s. time) ด้วยการจุ่มคู่ควบอุณหภูมิ (thermo couple) ลงไปในน้ำโลหะขณะที่เย็นตัวดังรูปที่ 16 เมื่อเวลาผ่านไปก็จะมีการบันทึกอุณหภูมิผ่านเครื่องบันทึกข้อมูล (data logger) บันทึกผ่านคอมพิวเตอร์เพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 16 แสดงการวัดค่าสัดส่วนของแข็งด้วย CCA

2.8.2.1 อนุพันธ์อันดับที่หนึ่ง (First Derivative)

นำข้อมูลเส้นโค้งการเย็นตัวที่บันทึกได้มาพลอตการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับเวลา (dT/dt) ดังแสดงดังรูปที่ 17 พิจารณากราฟการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับเวลาจุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟจะเป็นจุดที่แสดงการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนในระบบจากการคายความร้อนจากการเปลี่ยนแปลงเฟสซึ่งจะสามารถบอกได้ว่า ณ อุณหภูมินั้นเกิดเฟสใหม่ซึ่งแต่ละการเปลี่ยนความชันของกราฟจะทราบถึงการเปลี่ยนแปลงเฟสและอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสได้



รูปที่ 17 แสดงเส้นโค้งการเย็นตัวและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเทียบกับเวลา

2.8.2.2 เส้นฐานและสัดส่วนของแข็ง (Base line and fraction solid)

วิธีที่ใช้วัดสัดส่วนของแข็งของน้ำโลหะในสถานะกึ่งแข็งกึ่งเหลวจากเส้นโค้งการเย็นตัว ถูกเสนอครั้งแรกจาก Stefanescu และคณะ วิธีนี้จะใช้สมมติฐาน 4 อย่างในการสร้างเส้นฐาน (base line) ได้แก่

1. ไม่พิจารณาการนำความร้อนภายในน้ำโลหะหลอมเหลว จึงไม่มีการพิจารณาการนำความร้อนในน้ำโลหะในแต่ละจุดที่สถานะต่าง ๆ นั้นให้มีค่าเท่ากัน
2. ในระหว่างเกิดการแข็งตัวของน้ำโลหะค่าความร้อนแฝงจำเพาะต่อปริมาตร (volumic specific heat) ของโลหะคงที่และไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป
3. อัตราการคายความร้อนแฝง (the rate of release of latent heat) ในแต่ละการเปลี่ยนแปลงเฟสมีค่าเท่ากันเมื่อเทียบกับปริมาณที่มีการเปลี่ยนแปลง
4. อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อน (rate of heat extraction) สามารถอธิบายว่าเป็นแบบโคชี (Cauchy boundary condition) ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (heat transfer coefficient) และค่า sink temperature คงที่ในทุกๆช่วงการแข็งตัวของน้ำโลหะ

จากสมมติฐานที่ 1 และสมมติฐานที่ 4 อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนในชิ้นงานในช่วงอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็ง (Solid-liquid (S-L) phase transformation) ดังสมการที่(19) และการแลกเปลี่ยนความร้อนสู่ภายนอกจากสมการที่ (20)

$$\left(\frac{dT}{dt}\right)_{nt} = -\frac{hA(T-T_{\infty})}{C_p V} + \left(\frac{L}{C_p}\right)\left(\frac{df_s}{dt}\right) \quad (19)$$

$$\left(\frac{dT}{dt}\right)_{npt} = -\frac{hA(T-T_{\infty})}{C_p V} \quad (20)$$

โดยที่ h = heat transfer coefficient ($\text{Jm}^{-2}\text{K}^{-1}$)

A = surface area of the crucible (m^2)

T_∞ = surrounding temperature ($^\circ\text{C}$)

t = time (s)

L = latent heat (Jm^{-3})

V = volume of sample (m^3)

C_p = volumic specific heat ($\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$)

f_s = fraction solid

นำสมการ (19)-(20) จะได้อัตราเฉลี่ยการปล่อยความร้อนแฝง (average rate of latent heat) ในขณะที่เกิดการเปลี่ยนเฟส จะได้

$$L \left(\frac{df_s}{dt} \right) = C_p [(dT/dt)_{pt} - (dT/dt)_{npt}] \quad (21)$$

$$L \int_0^1 df_s = C_p \int_{t_l}^{t_s} \left[\left(\frac{dT}{dt} \right)_{pt} - \left(\frac{dT}{dt} \right)_{npt} \right] dt \quad (22)$$

โดยที่ pt = phase transformation

npt = no phase transformation

t_l = liquidus temperature

t_s = solidus temperature

อัตราส่วนของสัดส่วนของแข็งที่เกิดขึ้นในช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและเวลาที่สนใจจะได้

$$f_s = \frac{\int_{t_l}^t \left[\left(\frac{dT}{dt} \right)_{pt} - \left(\frac{dT}{dt} \right)_{npt} \right] dt}{\int_{t_l}^{t_s} \left[\left(\frac{dT}{dt} \right)_{pt} - \left(\frac{dT}{dt} \right)_{npt} \right] dt} \quad (23)$$

จากสมการที่ (23) จะสามารถบอกปริมาณของสัดส่วนของแข็งที่เกิดขึ้นในระบบได้ขณะที่เกิดการแข็งตัวของน้ำโลหะหลอมเหลวจากความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอันดับที่หนึ่งของอุณหภูมิเทียบกับเวลาซึ่งพื้นที่ใต้กราฟจะแสดงบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนเฟสและเส้นพื้นฐาน (base line) โดยที่เส้นพื้นฐานนั้นจะแสดงส่วนที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสสามารถสร้างได้จากการหาสมการที่เหมาะสมกับชุดข้อมูล (curve fitting) โดยการใช้สมการโพลีโนเมียลอันดับที่สาม (third order polynomial) คือ

$$(dT/dt)_{npt} = AT^3 + BT^2 + CT + D \quad (24)$$

นอกจากนี้วิธีหาสัดส่วนของแข็งด้วยเส้นโค้งการเย็นตัวนี้ยังสามารถบอกอัตราการเย็นตัว (cooling rate) ของน้ำโลหะหลอมเหลวขณะที่เย็นตัวได้ โดยดูจากความชันของกราฟเส้นพื้นฐานในช่วงน้ำโลหะเริ่มเย็นตัวไปจนถึงจุดที่น้ำโลหะเย็นตัวสุดท้าย

2.8.3 การวิเคราะห์ด้วยสมการทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamic models)

การวัดปริมาณของสัดส่วนของแข็งด้วยการวิเคราะห์ด้วยสมการทางอุณหพลศาสตร์เป็นวิธีที่นิยมใช้มีอยู่ 2 รูปแบบได้แก่

1. โมเดลพลังงานอิสระของ Gibbs โดยการใช้การคำนวณด้วย Lever-rule ซึ่งใช้สมมติฐานการเย็นตัวของน้ำโลหะในสภาวะที่สมดุล (equilibrium solidification) ซึ่งมีลักษณะการเย็นตัวของน้ำโลหะอย่างช้าๆ มีการแพร่เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ทั้งในสภาวะของแข็งและสภาวะของเหลว

2. โมเดล Scheil-Gulliver เป็นลักษณะการแข็งตัวของน้ำโลหะที่ตั้งสมมติฐานไว้ว่า ไม่มีการแพร่ในสภาวะของแข็ง ในของเหลวเกิดการแพร่อย่างสมบูรณ์ และเกิดสภาวะการแพร่ที่สมดุลระหว่างรอยต่อของของแข็งและของเหลว (local equilibrium at the solid/liquid interface)

2.9 พฤติกรรมของน้ำโลหะในสภาวะกึ่งแข็งกึ่งเหลว

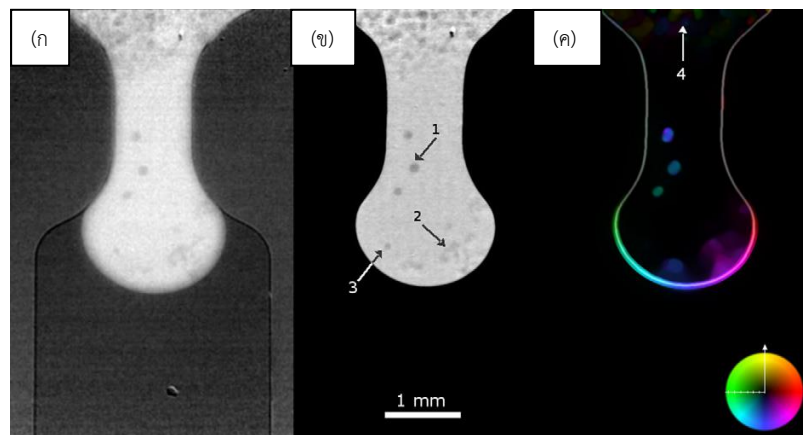
เมื่อน้ำโลหะหลอมเหลวอยู่ในสภาวะกึ่งแข็งกึ่งเหลว จะเรียกสภาวะนี้ว่าส่วนผสมของแข็งกับของเหลว (Slurry) เพื่อที่จะเข้าใจลักษณะการไหลของส่วนผสมของแข็งกับของเหลวเข้าสู่แบบนั้น สิ่งที่ต้องทราบก่อนคือภายในนั้นจะมีแรงที่เป็นไปได้ 3 อย่างคือ 1) แรงระหว่างอนุภาคกับอนุภาค (particle-particles) 2) แรงระหว่างอนุภาคกับของเหลว (particle-liquid) 3) แรงแวนเดอวาลส์ (van der waals force) ซึ่งจะส่งผลต่อความสามารถในการเติมเต็มแบบ

ในปี ค.ศ. 2012 S. Zabler [27] และคณะ ได้ศึกษาพฤติกรรมการไหลของโลหะอลูมิเนียมผสม (Al-Ge32 wt.%) ในขณะที่น้ำโลหะกึ่งแข็งกึ่งเหลวไหลเข้าสู่แบบ ซึ่งแยกการทดลองออกเป็น 2 กลุ่มคือ การไหลเข้าสู่แบบที่เป็นคอขวดและการไหลแบบที่มีการเลี้ยว (right-angle turn) ทำการเตรียมชิ้นงานโดยการนำโลหะผสมที่มีการเติม 4wt.% Al-Ti5-B ลงไปทำหน้าที่เป็นเกรนรีไฟน์ แล้วนำมาทำการให้ความร้อนที่ 480 °C สู่ช่วงกึ่งแข็งกึ่งเหลว เป็นเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อให้เกิดอนุภาคของแข็งทรงกลม จากนั้นก็จะทำการอัด (injection) เข้าสู่แบบและทำการบันทึกผลการทดลองขณะที่น้ำโลหะกึ่งแข็งไหลเข้าสู่แบบด้วยกล้องความเร็วสูง สามารถวัดค่าความเร็วและทิศทางการเคลื่อนที่ของจุดที่สนใจได้

1. การไหลเข้าสู่แบบที่เป็นคอขวด (bottleneck)

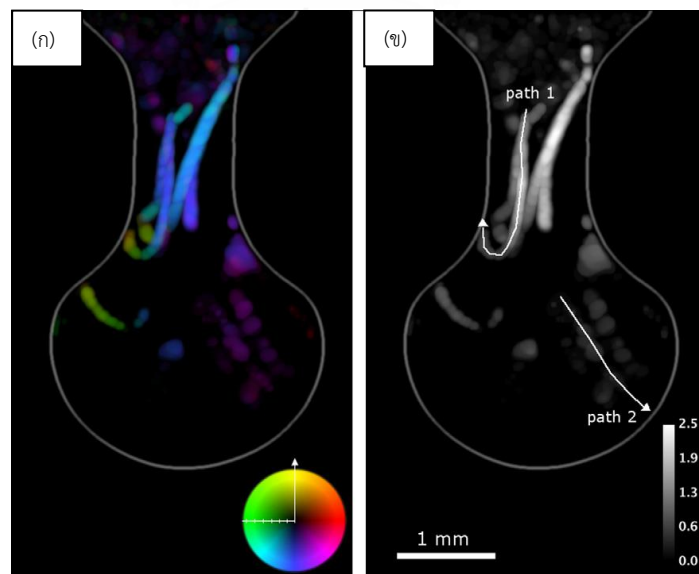
จากรูปที่ 18(ก) แสดงน้ำโลหะกึ่งแข็งกึ่งเหลวไหลเข้าสู่แบบที่เป็นลักษณะคอขวด จะสามารถแยกของแข็งและของเหลวออกจากกันได้จากความเข้มของแสงจุดที่เป็นสีตัดจะแสดงอนุภาคของแข็งและบริเวณที่สว่างจะเป็นน้ำโลหะหลอมเหลว รูปที่ 18(ข) จะแสดงภาพที่ผ่านการกรองด้วยตัวกรอง (filter) แล้วซึ่งจะได้ภาพที่มีความคมชัดมากขึ้น จากภาพจะสามารถจำแนกสิ่งต่างๆได้เป็น 4 บริเวณตามที่ลูกศรชี้ได้แก่

- 1.อนุภาคของแข็ง (solid particle): เป็นอนุภาคที่แยกออกมาจากกลุ่มอนุภาคของแข็งอื่นๆ พบว่ามีความเร็ว 1.6 มิลลิเมตรต่อวินาที
- 2.อากาศภายใน (air) มีความเร็ว 3.9 มิลลิเมตรต่อวินาที
- 3.อนุภาคของแข็งที่คงที่ (isolated particle):
- 4.อนุภาคกลุ่มของแข็ง (solid bulk) มีความเร็วน้อยกว่า 0.3 มิลลิเมตรต่อวินาที
- 5.น้ำโลหะหลอมเหลว (liquid metal) พบว่ามีความเร็ว 3.1 มิลลิเมตรต่อวินาที



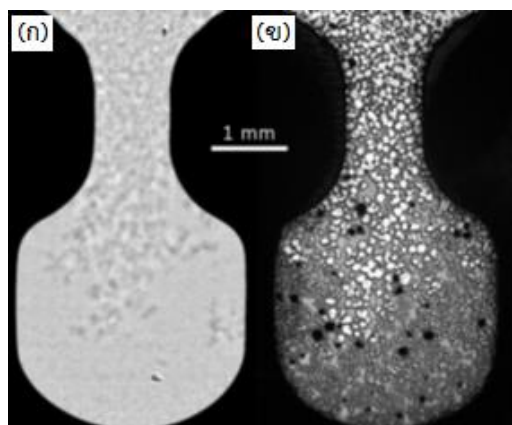
รูปที่ 18 แสดงการปรับภาพขณะน้ำโลหะกึ่งแข็งกึ่งเหลวไหลเข้าสู่แบบ [27]

การวัดความเร็วของแต่ละจุดที่สนใจทำได้โดยการนำภาพแต่ละเฟรมเมื่อเวลาเปลี่ยนไปมา สร้างเป็นแผนภูมิความเร็ว (velocity projection) ดังรูปที่ 19



รูปที่ 19 แสดงการนำภาพมาสร้างเป็นแผนภูมิความเร็ว (velocity projection) [27]

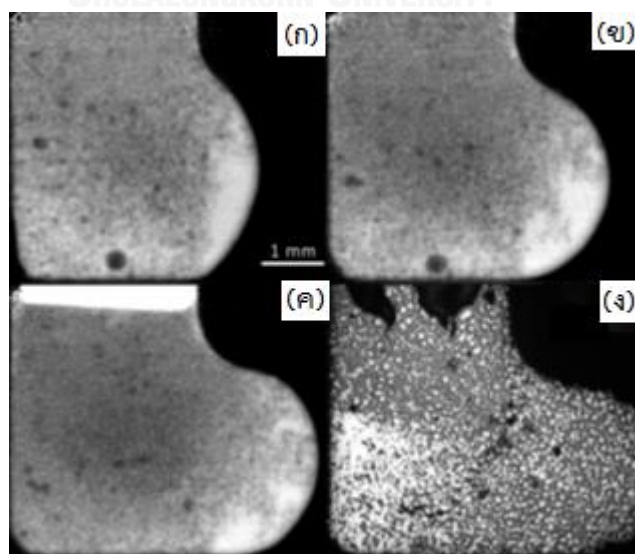
ความเร็วของแต่ละอนุภาคที่แตกต่างกันนี้จะส่งผลโดยตรงต่อความไม่สม่ำเสมอ (deminging) ในโครงสร้างจุลภาคเมื่อน้ำโลหะหลอมเหลวนี้เกิดการเย็นตัวสุดท้าย กล่าวคือบริเวณที่เป็นน้ำโลหะหลอมเหลวที่แยกออกมาจะเป็นบริเวณที่มีความเข้มข้นของโลหะผสมที่สูงจะส่งผลทำให้โครงสร้างบริเวณนั้นเกิดการเปราะได้ ซึ่งจากการทดลองพิจารณาโครงสร้างจุลภาคสุดท้ายก็จะพบบริเวณที่แตกต่างของโครงสร้างจุลภาคอย่างเห็นได้ชัดดังแสดงในรูปที่ 20



รูปที่ 20 แสดงน้ำโลหะสภาวะกึ่งแข็งกึ่งเหลวขณะไหลเข้าแบบ (ก) และโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเมื่อเย็นตัว (ข) [27]

2. การไหลเข้าแบบที่มีการเลี้ยว (right-angle turn)

การไหลเข้าสู่แบบที่มีการเลี้ยวเข้าแบบของน้ำโลหะกึ่งแข็งกึ่งเหลวนั้นจะมีความแตกต่างกับแบบเลี้ยวเข้าคอดชิด คืออนุภาคของแข็งกับของเหลวจะเกาะกลุ่มกันได้ดีกว่า (more comjoint) ซึ่งส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคสุดท้ายมีความสม่ำเสมอมากกว่าดังแสดงในรูปที่ 21

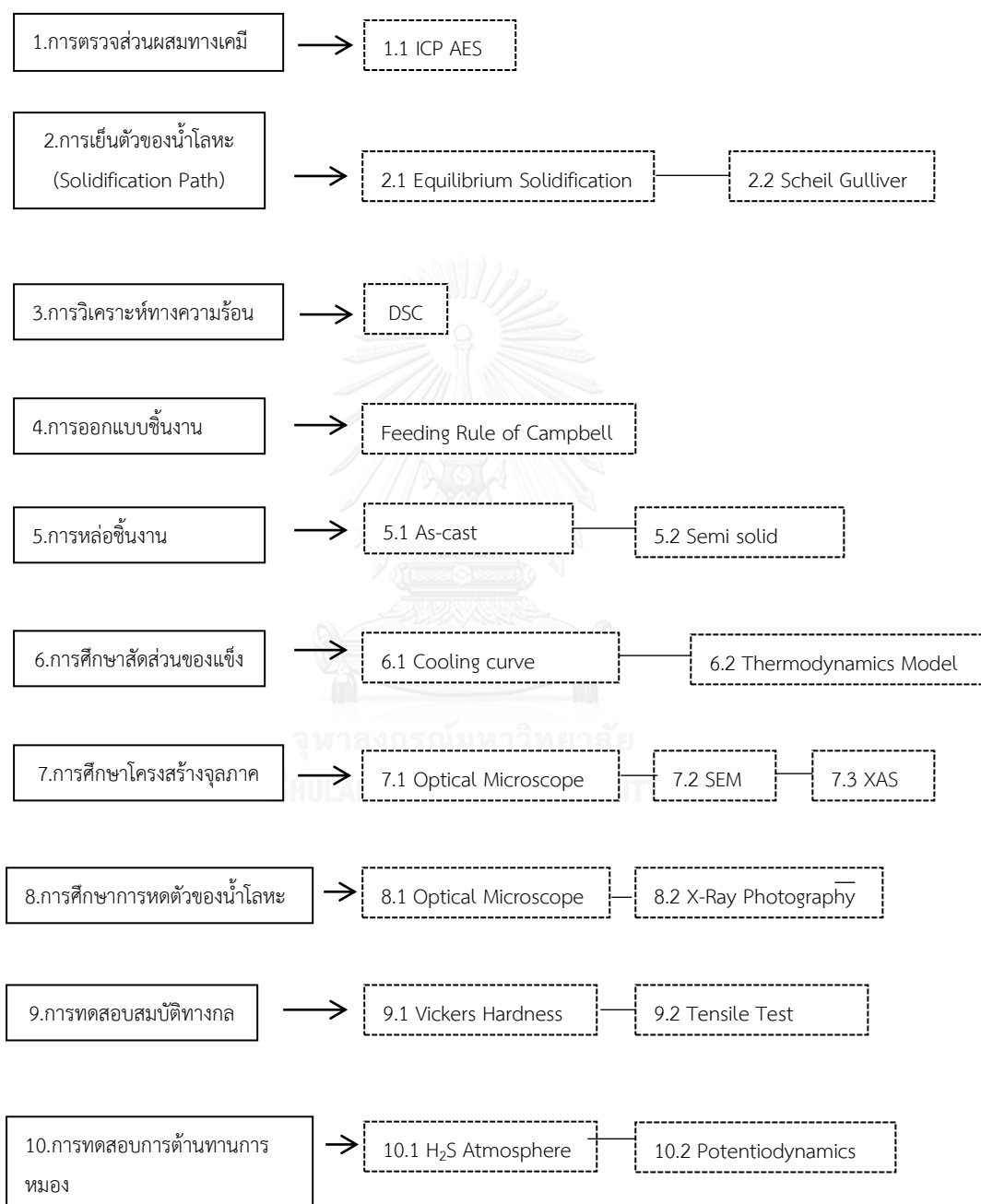


รูปที่ 21 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเมื่อเย็นตัว [27]

บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการทดลอง

3.1 แผนการดำเนินงาน



รูปที่ 22 แผนการดำเนินการของโครงการวิจัย

3.2 การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี

โลหะเงินผสมของโครงการวิจัยนี้ได้รับการอนุเคราะห์มาจากบริษัทบิวตี้เจมส์แฟคตอรี จำกัด ซ้อมาสเตอร์อัลลอยมาจากบริษัทเฮราอัส (Heraeus) จากนั้นก็นำมาผสมด้วยวิธีการทำแกรนูล (granulation) ซึ่งจะได้โลหะเงินผสมที่มีรูปร่างทรงกลมมีขนาดต่างๆดังรูปที่ 23 จากนั้นนำโลหะผสมที่ได้ไปตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยเครื่อง Inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES) ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีการวิเคราะห์ธาตุ (elemental analysis) เป็นการวิเคราะห์โดยอาศัยกระบวนการคายพลังงานของอะตอม (atomic emission) กระบวนการของการวิเคราะห์ด้วยวิธี ICP-AES เป็นการใช้พลังงานจากพลาสมาในการยิงอิเล็กตรอนให้หลุดจากวงแหวนชั้นนอกของอะตอม ทำให้เกิดไอออนประจุบวกของสารตัวอย่าง ไอออนนี้จะถูกแยกและวัดด้วยเครื่องอะตอมมิทริกสเปกโตรมิเตอร์ ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเข้มข้นของตัวอย่างผลการตรวจ



รูปที่ 23 โลหะเงินผสม

3.3 ทิศทางการเย็นตัวของน้ำโลหะ (Solidification Path)

เป็นวิธีการทำนายการแข็งตัวของน้ำโลหะหลอมเหลวโดยใช้ทฤษฎีทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamic) โดยจะสามารถทำนายข้อมูลต่างๆที่เป็นประโยชน์ไม่ว่าจะเป็นจุดหลอมเหลวของน้ำโลหะ โครงสร้างที่จะเกิดขึ้นเมื่อน้ำโลหะแข็งตัว จุดหลอมเหลวของโลหะผสม และยังสามารถคำนวณสัดส่วนของแข็งในโลหะกึ่งแข็งกึ่งเหลวที่เกิดขึ้นได้ ที่นิยมใช้มี 2 วิธีคือ

3.3.1 การคำนวณด้วยกฎคานังด์ (Lever-rule) ซึ่งใช้สมมติฐานการเย็นตัวของน้ำโลหะในสภาวะที่สมดุล (equilibrium solidification) ซึ่งมีลักษณะการเย็นตัวของน้ำโลหะอย่างช้าๆ มีการแพร่เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ทั้งในสภาวะของแข็งและสภาวะของเหลว

3.3.2 โมเดลของไซล์ (Scheil-Gulliver) เป็นลักษณะการแข็งตัวของน้ำโลหะที่ตั้งสมมติฐานไว้ว่า ไม่มีการแพร่ในสภาวะของแข็ง ในของเหลวเกิดการแพร่อย่างสมบูรณ์ และเกิดสภาวะการแพร่ที่

สมดุลระหว่างรอยต่อของของแข็งและของเหลว (local equilibrium at the solid/liquid interface)

3.4 การศึกษาสมบัติทางความร้อน (Thermal Analysis)

การศึกษาสมบัติทางความร้อนของชิ้นงานโลหะผสมเงินด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) รุ่น Netzsch-F30 ดังรูปที่ 24 โดยใช้ในการวัดค่าจุดหลอมเหลวของโลหะเงินผสม นำโลหะผสมเงินที่ได้มาจากบริษัทบิวตี้เจมส์ ไปทำการทดลองวัดค่าจุดหลอมเหลว



รูปที่ 24 แสดงเครื่อง DSC

DSC เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของวัสดุ โดยวัดเป็นค่าพลังงานที่เปลี่ยนแปลงไปซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการดูดหรือคายพลังงานขณะที่อุณหภูมิสูงขึ้น (endothermic or exothermic reaction) เช่น การเปลี่ยนสถานะจากของแข็งไปเป็นของเหลว จะต้องมีการดูดพลังงานเข้าไปเพื่อสลายพันธะ เรียกว่าปฏิกิริยาดูดพลังงาน (endothermic) ในทางกลับกันเมื่อมีการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นของแข็งจะมีการคายพลังงานเพื่อสร้างพันธะ เรียกว่าปฏิกิริยาคายพลังงาน (Exothermic) ทำให้อุณหภูมิของตัวอย่างและสารมาตรฐาน (references) แตกต่างกัน และสามารถวัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัสดุนั้นๆ เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิภายใต้บรรยากาศที่ถูกควบคุม เช่น การเปลี่ยนเฟส การละลาย การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึก การเดือด การเผาไหม้ การระเหย การคายน้ำ การแตกตัว กระบวนการออกซิเดชัน-รีดักชัน และปฏิกิริยาเคมีต่างๆ ที่เกิดขึ้นขณะที่วัสดุได้รับความร้อน ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะเป็นกราฟระหว่างความแตกต่างของปริมาณความร้อนและการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเนื่องจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปโดยเทียบกับมาตรฐาน (references)

3.5 การออกแบบชิ้นงาน

การออกแบบชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองนี้จะเป็นการศึกษาถึงทฤษฎีของ Campbell ในการออกแบบชิ้นงาน ทางไหลของน้ำโลหะ สัดส่วนระหว่างความหนาของชิ้นงานและทางไหลของน้ำโลหะ

เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่เกิดรูพรุนที่เกิดจากการหดตัวของน้ำโลหะจากนั้น ก็จะนำไปเปรียบเทียบผลของการหล่อแบบกึ่งแข็งและการหล่อแบบเต็มว่ารูพรุนที่เกิดจากการหดตัวของน้ำโลหะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร

3.6 การหล่อชิ้นงาน

ในปัจจุบันกระบวนการผลิตเครื่องประดับนั้นจะใช้วิธีการหล่อไล่ซึ้ง (Lost wax Jewelry Casting) โดยใช้เครื่องหล่อรุ่น Vacuum Pressure Casting Machine (Induthum VC600) โดยในงานวิจัยนี้จะเป็นการเปรียบเทียบกระบวนการหล่อเดิมเปรียบเทียบกับกระบวนการใหม่ คือ

3.6.1 กระบวนการหล่อด้วยวิธีเดิม เป็นขั้นตอนการผลิตเดิมในทุกขั้นตอนในบริษัทบิวตี้เจมส์ แพคคอรี่ จำกัด ทุกๆขั้นตอนการผลิต ไม่ว่าจะเป็นการติดต้นเทียน การผสมปูน การอบปูน เวลาที่ใช้ในการหล่อ ขั้นตอนการแกะแบบ และกระบวนการทางความร้อน (Heat Treatment)

3.6.2 กระบวนการหล่อกึ่งแข็ง เป็นกระบวนการที่เพิ่มเข้าไปในขั้นตอนที่เป็นการหล่อ โดยการลดอุณหภูมิของน้ำโลหะลงมาในช่วงที่เป็นของกึ่งแข็งกึ่งเหลว และจะมีการเพิ่มระบบที่มีการกวนโดยใช้แก๊สในเบ้าหล่อ

3.7 การศึกษาสัดส่วนของแข็ง (Solid Fraction Measurement)

เพื่อที่จะทราบถึงของแข็งที่เกิดขึ้นในน้ำโลหะในสภาวะกึ่งแข็งกึ่งเหลว ซึ่งปริมาณของแข็งในน้ำโลหะที่เกิดขึ้นนั้นส่งผลต่อสมบัติต่างๆ เช่น ความหนืดที่เพิ่มขึ้นซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติการไหลของน้ำโลหะและส่งผลต่อเนื่องไปยังการเติมเต็มแบบ การวัดค่าสัดส่วนของแข็งในงานวิจัยนี้จะทำการวัดค่า 2 วิธีได้แก่

3.7.1 การวัดค่าสัดส่วนของแข็งด้วยวิธีการวิเคราะห์ทางความร้อน (Thermal Analysis) โดยวัดค่าด้วยการวิเคราะห์ด้วยเส้นโค้งการเย็นตัว ดังที่อธิบายวิธีการทดลองในหัวข้อ 2.8 ในการวัดค่าสัดส่วนของแข็งด้วยวิธีนี้จะพิจารณา 2 ระบบการทดลองคือ ระบบที่ไม่มีการกวนด้วยแก๊สและระบบที่มีการกวนด้วยแก๊ส

3.7.2 การวัดค่าสัดส่วนของแข็งด้วยวิธีการคำนวณด้วยโมเดลอุณหพลศาสตร์ จะใช้โมเดลการคำนวณ 2 โมเดล คือ โมเดลพลังงานอิสระของ Gibbs โดยการใช้การคำนวณด้วย Lever-rule และ โมเดล Scheil-Gulliver

3.8 การศึกษาโครงสร้างภายในชิ้นงาน

การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการหล่อเดิมและกระบวนการหล่อแบบกึ่งแข็ง เตรียมชิ้นงานที่ได้จากการหล่อมาทำการตัดขวางชิ้นงาน (cross section) ตามแนวยาว จากนั้นนำไปขัดผิวด้วยกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 80 200 400 600 800

1200 และ 2000 หลังจากนั้นนำไปขัดผิวให้เรียบด้วยผงอลูมินา (Alumina) จากนั้นทำการกัดกรดด้วยสารละลายกรดที่มีส่วนผสม คือ โครเมียมไตรออกไซด์ (Chromium trioxide) 10 กรัม ผสมด้วยกรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid) เข้มข้น 10 มิลลิลิตร และ น้ำกลั่นให้มีปริมาตร 1000 มิลลิลิตร

การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังการหล่อจะใช้เครื่องมือที่เทคนิคที่แตกต่างกัน 3 ชนิดดังนี้

3.8.1 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope)

กล้องจุลทรรศน์แบบแสงจะใช้สำหรับการวิเคราะห์ในระดับมหภาค (Macro Scale) ของชิ้นงานทั้งกระบวนการหล่อเดิมและกระบวนการหล่อกึ่งแข็ง เพื่อใช้ศึกษาขนาดของเกรนของชิ้นงานในแต่ละสภาวะการทดลอง ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อด้วยวิธีการหล่อด้วยวิธีไล้ซึ่งนั้นจะใช้แบบที่เป็นปูนปลาสเตอร์ (plaster mould) ซึ่งมีการถ่ายเทความร้อนที่ต่ำส่งผลทำให้ขนาดของเกรนนั้นมีขนาดใหญ่ในช่วง 1-3 มิลลิเมตร การพิจารณาเลือกใช้กำลังขยายจึงเป็นควรใช้กำลังขยายที่ต่ำๆ เพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่ที่จะใช้ในการวัดขนาดของเกรน

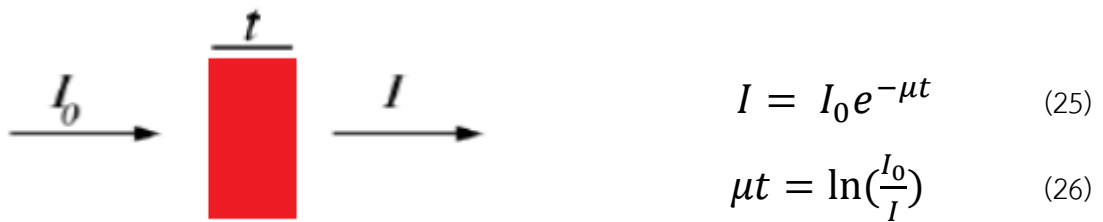
การวัดขนาดของเกรน (Grain size measurement) จะใช้วิธีทางวิเคราะห์ด้วยภาพถ่าย โดยจะทำการเฉลี่ยค่าที่ได้ในแต่ละชิ้นงาน และนำค่าขนาดของเกรนที่ได้จากสภาวะการหล่อที่แตกต่างกันมาทำการเปรียบเทียบ

3.8.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)

การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยเทคนิคที่ใช้จะเป็นโหมดอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Back Scattered Electron, BSE) ซึ่งจะแสดงความแตกต่างของสีที่แสดงเฟสที่มีส่วนประกอบต่างกัน ซึ่งจะสามารถวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างโลหะเนื้อพื้นและเฟสอื่นๆได้ เช่น โครงสร้างยูเทคติก

3.8.3 การดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ (X-ray Absorption)

จากทฤษฎีการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของกฎของเบียร์แลมเบิร์ต (Beer-Lambert's law) เมื่อมีการยิงโฟตอนผ่านไปยังวัสดุตัวอย่างพบว่า ความเข้มแสงที่วัดได้นั้นจะมีค่าลดลงเพราะวัสดุได้ดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไว้ทำให้ความเข้มลดลง ดังรูปที่ 25



รูปที่ 25 แสดงการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามสมการของ Beer-Lambert's

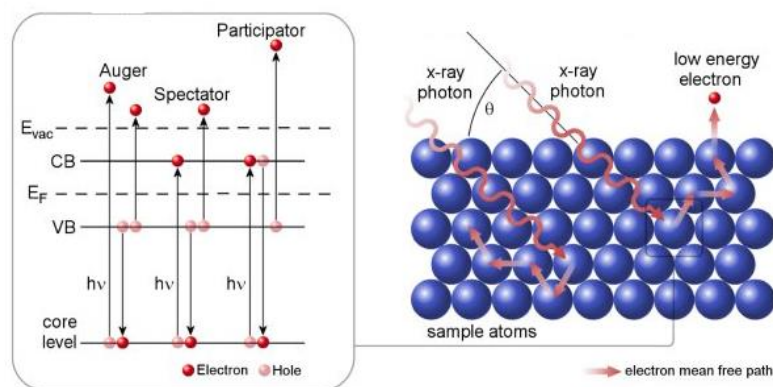
โดยที่ I คือ ความเข้มของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหลังทะลุผ่านวัสดุตัวอย่าง (W/m^2)

I_0 คือ ความเข้มของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าก่อนจะชนกับวัสดุตัวอย่าง (W/m^2)

μ คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืน (m^{-1})

t คือ ความหนาของวัสดุตัวอย่าง (m)

กลไกการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์เกิดจากการที่โฟตอนของรังสีเอ็กซ์มีพลังงานเท่ากับพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในอะตอม ทำให้อิเล็กตรอนสามารถดูดกลืนพลังงานนั้นได้และถูกกระตุ้นให้กระโดดไปในชั้นพลังงานที่สูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นให้ขึ้นไปยังระดับพลังงานที่สูงขึ้นส่งผลให้ชั้น K ไม่เสถียร จึงจำเป็นต้องมีอิเล็กตรอนในชั้น L มาแทนที่ เมื่ออิเล็กตรอนในชั้น L ที่มีพลังงานสูงกว่าชั้น K กระโดดลงมาแทนที่ทำให้เกิดการคายพลังงานในรูปของโฟตอนซึ่งเรียกว่า Fluorescent X-Ray Emission แต่เมื่ออิเล็กตรอนในชั้น L มาแทนที่ก็จะทำให้อิเล็กตรอนในชั้น L ไม่เสถียรเช่นเดียวกันจึงจำเป็นต้องสละอิเล็กตรอนอีกตัวในชั้นเดียวกันให้หลุดออกจากอะตอม อิเล็กตรอนที่หลุดออกไปนี้เรียกว่าอิเล็กตรอนออเจ (Auger Electron)



รูปที่ 26 แสดงกลไกการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ [28]

เทคนิคการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์เราจึงสามารถเลือกโหมดในการวัดได้ถึง 3 โหมด ได้แก่

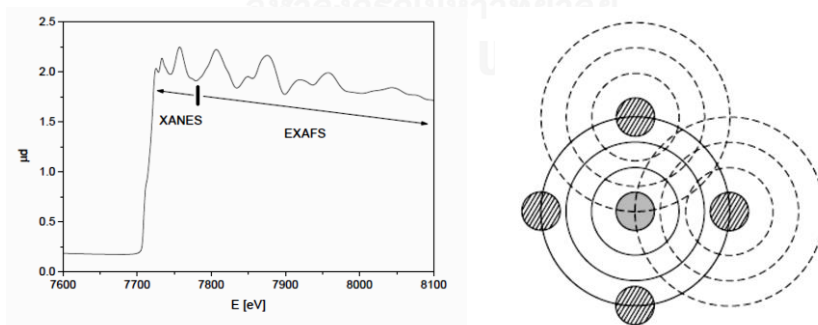
1. การทะลุผ่านจะวัดความเข้มของรังสีเอ็กซ์หลังทะลุจากสารตัวอย่าง
2. การปล่อยฟลูออเรสเซนส์จะวัดแสงฟลูออเรสเซนส์ที่จะสะท้อนออกมา โดยเครื่องวัดจะทำมุมประมาณ 45 องศา กับสารตัวอย่าง

3. กระแสอิเล็กตรอน จะทำการต่อหัวเพื่อให้อิเล็กตรอนวิ่ง ออกมาแล้วทำการวัดค่ากระแสอิเล็กตรอน การดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ของโครงสร้างภายใน (X-ray absorption near edge structure, XANES)

เทคนิคการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์นั้น เป็นเทคนิคที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในวิทยาศาสตร์ ฟิสิกส์โดยส่วนใหญ่จะใช้แสงซินโครตรอนเป็นแหล่งให้พลังงานรังสีเอ็กซ์ เทคนิคนี้เป็นการวัดค่าการ ปฏิสัมพันธ์ (Interaction) ของโฟตอนโดยการวัดค่าการดูดกลืนโฟตอนในภาคตัดขวาง (photoabsorption cross-section) สำหรับแสงที่มี polarisation เท่ากับ \hat{e} และมีความถี่เป็น ω จากกฎของ Fermi's golden จะได้

$$\sigma = \frac{4\pi^2}{\omega} \sum_f |\langle f | \hat{e} \cdot p e^{ik \cdot r} | i \rangle|^2 \delta(E_i - E_f + \omega) \equiv \sum_f |\langle f | D | i \rangle|^2 \delta(E_i - E_f + \omega) \quad (27)$$

โดยที่ $|i\rangle$ $|f\rangle$ E_i และ E_f คือ สถานะเริ่มต้นและสถานะสุดท้ายของพลังงาน (k) ซึ่งเป็น เวกเตอร์ของคลื่นลำแสงที่เกิดขึ้น การกระตุ้นอะตอมด้วยรังสีเอ็กซ์ จะทำให้โครงแบบอิเล็กตรอน (electron configuration) ของอะตอมนั้นเปลี่ยนแปลง การเปลี่ยนแปลงนี้โดยส่วนใหญ่จะเกิดที่ ระดับพลังงานวงในสุด (core-shell) และทำให้อิเล็กตรอนในชั้นนั้นไปอยู่ในสถานะต่อเนื่อง (continuum) การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวนี้เรียกว่า photoelectron ซึ่งจะทำเป็นตัววัด (probe) ที่ดีที่จะสามารถรับรู้ได้ถึงการกระจายของประจุและการจัดเรียงของอะตอมเพื่อนบ้าน (neighbor atom) ที่อยู่รอบๆอะตอมที่ดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ เมื่อโฟตอนมีพลังงานสูงมากพอปรากฏการณ์ photo effect ในระดับพลังงานชั้นในสุด (core shell) ก็เกิดขึ้นซึ่งเป็นผลทำให้สเปกตรัมเฉพาะของอะตอมนั้นๆ เรียกว่า absorption edge ดังรูปที่ 27



รูปที่ 27 แสดงการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ ในชั้น K-shell absorption ของธาตุ cobalt. และ wave function ของ photoelectron ที่กระเจิงไปยังอะตอมรอบข้าง

เมื่อโฟตอนมีพลังงานต่ำ โฟโตอิเล็กตรอน (photoelectron) จะอยู่ในทั้งในสภาวะว่างหรือ อยู่ในสภาวะ continuum ในช่วงนี้ของพลังงานจะเรียกว่า XANES ช่วงของกราฟจะขึ้นกับชนิดของ การดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ ส่วน EXAFS คือช่วงที่พลังงานจลน์ของ photoelectron ในช่วงพลังงานสูง

ช่วงพลังงานการแบ่งระหว่าง EXAFS กับ XANES ยังไม่สามารถระบุได้ชัดแต่สามารถพิจารณาแบ่งช่วงพลังงานได้จากลักษณะของกราฟนั้นเริ่มเรียบขึ้น เมื่อพลังงาน โฟโตอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงจะค่อยๆเกิดขึ้น

ตามกฎธรรมชาติ (Rule of thumb) ขอบเขตโครงสร้างภายใน (near-edge structure) ประมาณค่าอยู่ที่ความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนซึ่งมีค่าประมาณ 40-50 อิเล็กตรอนโวลต์ ในช่วง XANES พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนมีค่าน้อย และการกระเจิงของอิเล็กตรอนไปยังอะตอมรอบๆ จึงมีสัญญาณที่ชัด ซึ่งแตกต่างจากช่วง EXAFS ที่มีพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนสูง

เทคนิคการวิเคราะห์การดูดกลืนรังสีเอ็กซ์เป็นเทคนิคที่สะดวกในการเตรียมชิ้นงาน และมีประโยชน์ในการวิเคราะห์ชิ้นงานในทางฟิสิกส์อะตอม ซึ่งสามารถบอกได้ถึงเลขออกซิเดชัน (Oxidation state) ของชิ้นงาน การจัดเรียงตัวของธาตุในผลึก ระยะห่างระหว่างอะตอม ความยาวพันธะ (bond length)

3.9 รูพรุนที่เกิดจากการหดตัวของน้ำโลหะ (Shrinkage Porosity)

ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อด้วยวิธีการหล่อกึ่งแข็งนั้นตามทฤษฎีแล้วจะทำให้การหดตัวของชิ้นงานลดน้อยลงหากเปรียบเทียบกับกระบวนการหล่อด้วยวิธีเดิม การศึกษาการหดตัวของน้ำโลหะโดยใช้วิธีในการทดลองดังนี้

3.9.1 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope)

รูพรุนที่เกิดจากการหดตัวของน้ำโลหะบริเวณรอยต่อระหว่างทางไหลเข้าของน้ำโลหะ (gating) กับชิ้นงาน ในแต่ละกระบวนการผลิต คือ ชิ้นงานที่ผ่านการหล่อด้วยกระบวนการเดิมและกระบวนการหล่อกึ่งแข็งการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงในการศึกษารูพรุนที่เกิดจากการหดตัวของน้ำโลหะบริเวณดังกล่าวจากนั้นก็ให้นำมาวิเคราะห์ด้วยการวิเคราะห์ทางรูปภาพ (Image Analysis) เพื่อเปรียบเทียบผลของรูพรุนที่เกิดจากการหดตัวที่เปลี่ยนไป

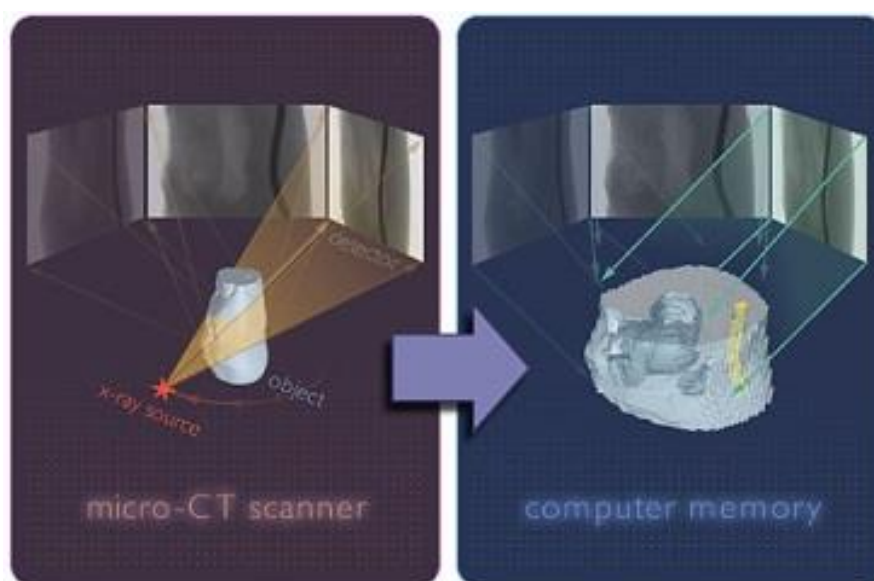
3.9.2 การถ่ายภาพรังสีส่วนตัดโดยอาศัยคอมพิวเตอร์ (CT-Scan (Computed tomography))

การหาปริมาณรูพรุนที่เกิดจากการหดตัวของน้ำโลหะโดยการใช้เครื่อง CT-Scan นั้นเป็นวิธีที่พัฒนามาจากเครื่อง X-Ray ชิ้นงานดั้งเดิมจะแตกต่างตรงที่ลักษณะของภาพที่ออกมานั้นจะได้ภาพเป็นลักษณะ 3 มิติ มีความละเอียดที่สูงในระดับไมโครเมตร โดยมีหลักการทำงานของเครื่องดังนี้

1. แหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์ (Spectroscopy X-ray Source) ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์ (X-Ray) ที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นด้วยพลังงานไฟฟ้า ตัวแหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์สามารถปรับค่าพลังงานให้สูงหรือต่ำได้ตามที่ต้องการ และมีพลังงานที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่อง และแหล่งกำเนิดพลังงาน

2. ฐานวางชิ้นงานหมุนได้ (Rotation stage) ทำหน้าที่เป็นแท่นวางชิ้นงาน และปรับหมุนชิ้นงานในการถ่ายภาพแต่ละองศา สามารถตั้งค่าได้ว่าจะให้ตัวแท่นวางชิ้นงานนี้หมุนครั้งละกี่องศา เพื่อเลือกความละเอียดของภาพที่เหมาะสม

3. ระบบประมวลผลคอมพิวเตอร์ (Computer memory) ทำหน้าที่ในการบันทึกภาพถ่ายในแต่ละค่าที่เกิดจากการหมุนของแท่นวางชิ้นงาน สุดท้ายนำมาภาพถ่ายแต่ละภาพประมวลผลเกิดเป็นภาพ 3 มิติ



รูปที่ 28 แสดงการทำงานของเครื่อง CT-Scan

3.10 การทดสอบสมบัติทางกล

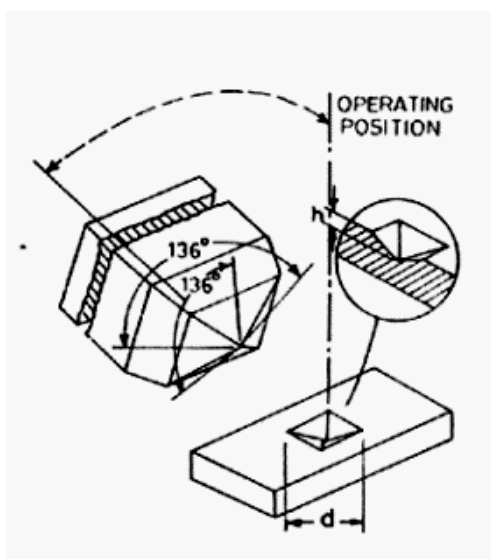
การทดสอบสมบัติทางกลของโลหะผสมเงินที่ผ่านกระบวนการหล่อที่ต่างกันมาทำการทดสอบสมบัติทางกล จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ทำการเปรียบเทียบกัน การทดสอบสมบัติทางกลที่วัดค่าในงานนี้ได้แก่

3.10.1 ความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness)

การวัดค่าความแข็งในเชิงโลหะวิทยา จะเป็นการทดสอบความต้านทานต่อการแปรรูปถาวร เมื่อถูกแรงกดจากหัวกดกระทำลงบนชิ้นงานทดสอบ สามารถแบ่งได้เป็น 3 ระดับ ขึ้นอยู่กับขนาดแรงกด ได้แก่

1. ค่าความแข็งระดับมาโคร (Macro-Hardness): Load > 1 kgf (1 kgf = 9.81 N)
2. ค่าความแข็งระดับไมโคร (Micro-Hardness): Load ≤ 1 kgf
3. ค่าความแข็งระดับนาโน (Nano-Hardness): Load < 500 mN (nano resolution)

การวัดความแข็งแบบวิกเกอร์เป็นการวัดความแข็งโดยใช้หัวกดเพชรรูปพีระมิดฐานสี่เหลี่ยม (Square-Based Diamond Pyramid) ที่มีมุม 136° ซึ่งเป็นมุมที่มีองศาใกล้เคียงกับหัวกดลักษณะกลมมากที่สุด ดังรูปที่ 24 การวัดค่าความแข็งแบบวิกเกอร์สามารถใช้วัดค่าความแข็งได้ตั้งแต่โลหะที่นิ่มมาก (ประมาณ 5 HV) จนถึงโลหะที่แข็งมากๆ (ประมาณ 1500 HV) โดยไม่ต้องเปลี่ยนหัวกด จะเปลี่ยนก็เฉพาะแรงกดระหว่าง 0.2-100 กิโลกรัม ในการทดลองนั้นทำโดยการวัดค่าความแข็งชิ้นงานแต่ละชิ้นเป็นจำนวน 3 จุดจากนั้นนำค่าที่ได้ทั้งหมดมาทำการมาทำการเฉลี่ยแล้วสรุปผลต่อไป

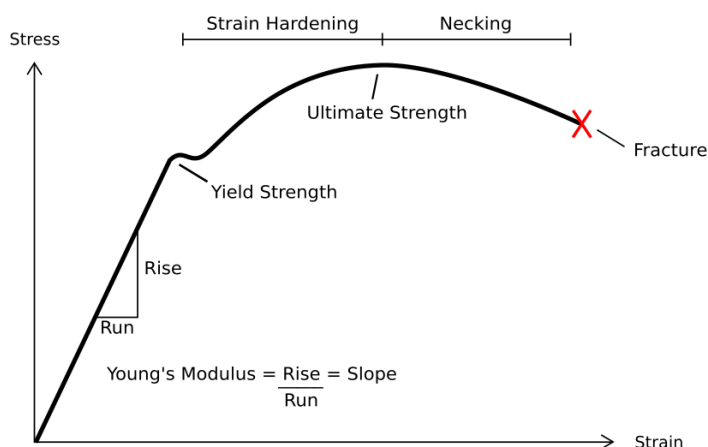


รูปที่ 29 แสดงการทำงานของเครื่องวัดค่าความแข็งแบบวิกเกอร์

3.10.2 ความทนแรงดึง (Tensile strength)

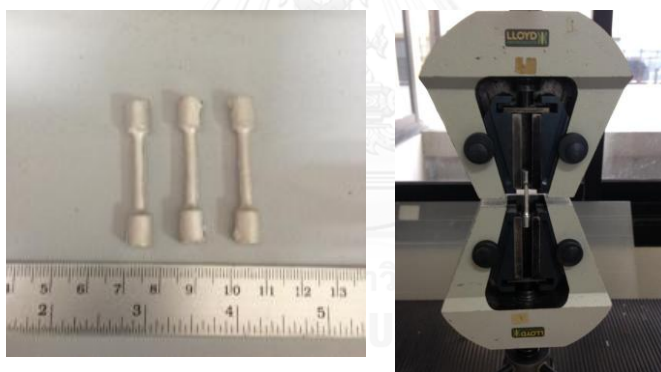
การทดสอบด้วยการดึงเป็นการทดสอบเพื่อหาสมบัติของวัสดุ การทดสอบนี้ช่วยให้ได้ค่าสมบัติด้านความยืดหยุ่น ความแข็งแรงคราก (Yield strength) หรือจุดที่วัสดุรับแรงได้สูงสุดโดยไม่เสียรูป ความทนแรงดึง (Tensile strength หรือ Ultimate strength) หรือจุดที่วัสดุรับแรงสูงสุด การทดสอบด้วยการดึงโดยทั่วไปเป็นการให้แรงในแนวแกนเดียว (Uniaxial tensile test) แก่ชิ้นทดสอบ โดยแรงดึงนี้จะกระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบ

การหาความทนแรงดึงของวัสดุโดยการดึงนั้นกระทำได้โดยค่อยๆ เพิ่มแรงดึงที่กระทำต่อวัสดุทีละน้อยจนกระทั่งวัสดุเกิดการแตกหัก ในระหว่างที่ออกแรงดึงวัสดุจะค่อยๆ ยืดตัวออก ส่งผลให้ขนาดหน้าตัดของวัสดุเล็กลงเรื่อยๆ จนกระทั่งไม่สามารถต้านทานแรงดึงที่เพิ่มขึ้นต่อไปได้ วัสดุจึงขาดออกจากกัน ในทางปฏิบัตินิยมนำความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงที่ให้ (ในรูปความเค้น) กับระยะยืดตัว (ในรูปความเครียด) มาแสดงผลเทียบต่อกันในรูปกราฟ ซึ่งนิยมเรียกว่า โค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve)



รูปที่ 30 แสดงโค้งความเค้น – ความเครียด (Stress-Strain Curve)

ในการทดสอบสมบัติความทนแรงดึง ทำการเตรียมชิ้นงานมีขนาดของเกจ (gauge length) 20 มิลลิเมตร พื้นที่รับแรงมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.3 มิลลิเมตร ใช้อัตราการดึง 0.5 มิลลิเมตร/นาที ดังรูปที่ 31



รูปที่ 31 แสดงชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบการวัดความแข็งแรงดึง

3.11 การทดสอบความต้านทานการหมอง (tarnish test)

จากทฤษฎีเมื่อชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อด้วยกระบวนการหล่อกึ่งแข็งจะส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานนั้นเปลี่ยนแปลงไปหากเปรียบเทียบกับกระบวนการหล่อแบบเดิม ซึ่งจะส่งผลต่อสมบัติการต้านทานการหมอง การทดสอบความต้านทานการหมองทำได้โดยนำชิ้นงานที่ได้มาจากการหล่อทั้งกระบวนการทั้งกระบวนการเดิมและกระบวนการหล่อกึ่งแข็งมาทดสอบความหมองในบรรยากาศที่เป็นแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) แล้วเปรียบเทียบสีที่เปลี่ยนไปของชิ้นงานที่ได้จากการทดลอง

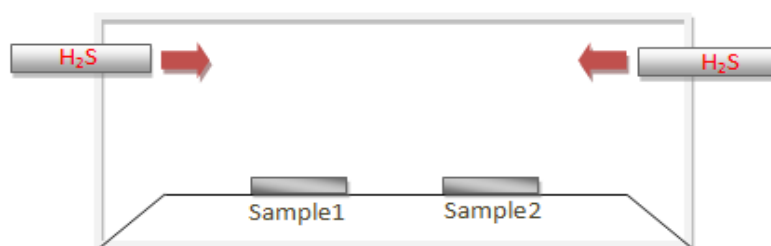
3.11.1 การทดลองในบรรยากาศบรรยากาศไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S)

ในการเตรียมบรรยากาศไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 0.4 โดยปริมาตร ในภาชนะบรรจุที่มีปริมาตร 5 ลิตร จะต้องเตรียมสารต่างๆ ในปริมาณ ดังนี้

- โพแทสเซียมซัลไฟด์ (Potassium sulfide; K_2S) น้ำหนัก 0.21 กรัม
- กรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาณ 21 มิลลิลิตร หรือ หากใช้กรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้นร้อยละ 36 โดยปริมาตร ให้ใช้ปริมาณ 1.75 มิลลิลิตรเจือจางกับน้ำกลั่นปริมาตร 19.25 มิลลิลิตร

โดยจะทำการทดลองเปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานที่ผ่านการหล่อด้วยกระบวนการหล่อเดิม เปรียบเทียบกับการหล่อด้วยกระบวนการหล่อกึ่งแข็ง ระยะเวลาในการทดสอบ 1 2 3 และ 4 ชั่วโมง การวางชิ้นงานตัวอย่างขณะทดสอบ

ในการทดสอบจะวางชิ้นงาน 2 ชิ้นที่ผ่านการหล่อด้วยวิธีการหล่อแบบดั้งเดิมและกระบวนการหล่อแบบกึ่งแข็งให้อยู่กึ่งกลางของตู้ทดสอบ โดยชิ้นงานที่นำมาทดสอบนั้นจะต้องมาขัดผิวด้วยกระดาษทรายตั้งแต่เบอร์ 80 120 240 400 600 800 และ 1200 ให้ได้ระนาบเพื่อขจัดออกไซด์หรือซัลไฟด์ที่ผิวเดิมออก ในระหว่างการทดสอบจะใช้วิธีการถ่ายภาพ การเปลี่ยนแปลงของสีที่ผิวชิ้นงานระหว่างการเกิดปฏิกิริยา เป็นระยะเวลา 1 2 และ 4 ชั่วโมง แล้วนำชิ้นงานที่ผ่านการทดลองมาทำการวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 32 แสดงการวางชิ้นงานในขณะวัดความต้านทานการหมอง

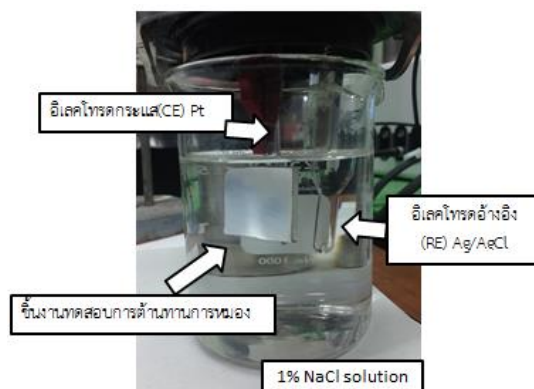
3.11.2 การทดลองวัดศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน

การทดสอบการต้านทานการกัดกร่อนที่นิยมใช้ คือ การทดสอบวัดค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion potential, E_{corr}) คือ ศักย์ไฟฟ้าที่อัตรารวมของ ปฏิกิริยาแอโนดทั้งหมดเท่ากับอัตรารวมของปฏิกิริยาแคโทดิกโดยความหนาแน่นกระแสที่ ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน เรียกว่า ความ

หนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion current density, i_{corr}) ซึ่งถือเป็นตัวบ่งชี้อัตราการกัดกร่อน การวัดศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขณะเกิดการกัดกร่อน ซึ่งอิเล็กโทรดที่ใช้มี 3 ชนิดคือ

- อิเล็กโทรดอ้างอิง (Reference electrode) คือ Ag/AgCl (3M KCl)
- อิเล็กโทรดกระแส (Counter electrode) คือ Pt
- อิเล็กโทรดตัวอย่าง (Specimen) คือ ชิ้นงานตัวอย่างที่ต้องการทดสอบ

ค่าศักย์ไฟฟ้าจะวัดจากการวัดเทียบค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดอ้างอิงกับ อิเล็กโทรดตัวอย่าง ค่ากระแสไฟฟ้าจะวัดจากการวัดเทียบระหว่างอิเล็กโทรดกระแสกับอิเล็กโทรด จะได้กราฟที่เรียกว่า กราฟเส้นโพลาริเซชัน (Polarization curve) ดังแสดงในรูปที่ 33



รูปที่ 33 แสดงการวางชิ้นงานวัดค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

4.1 การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี

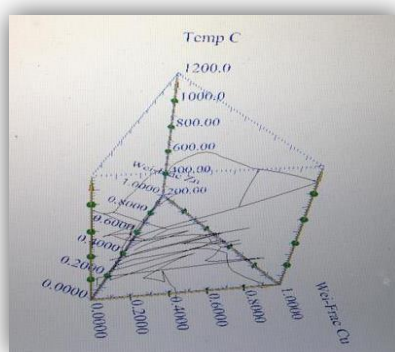
โลหะผสมเงินที่ใช้ในงานวิจัยนี้ นำไปทดสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยเครื่อง Inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES) ที่สถาบันวิจัยและพัฒนาอัญมณีและเครื่องประดับแห่งชาติ (องค์การมหาชน) โดยทำการวัดค่า 3 ครั้ง รายละเอียดผลการทดลองจะอยู่ในภาคผนวก แล้วหาค่าเฉลี่ย ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 3 ซึ่งโลหะหลักที่ใช้ในการผสมได้แก่ เงิน (Ag) ทองแดง (Cu) และสังกะสี (Zn)

ตารางที่ 3 แสดงส่วนผสมทางเคมีเฉลี่ยของโลหะเงินผสม

	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (wt.%)				
	Ag	Cu	Zn	Sn	Si
โลหะเงินผสม	93.930	4.410	1.600	0.050	0.007

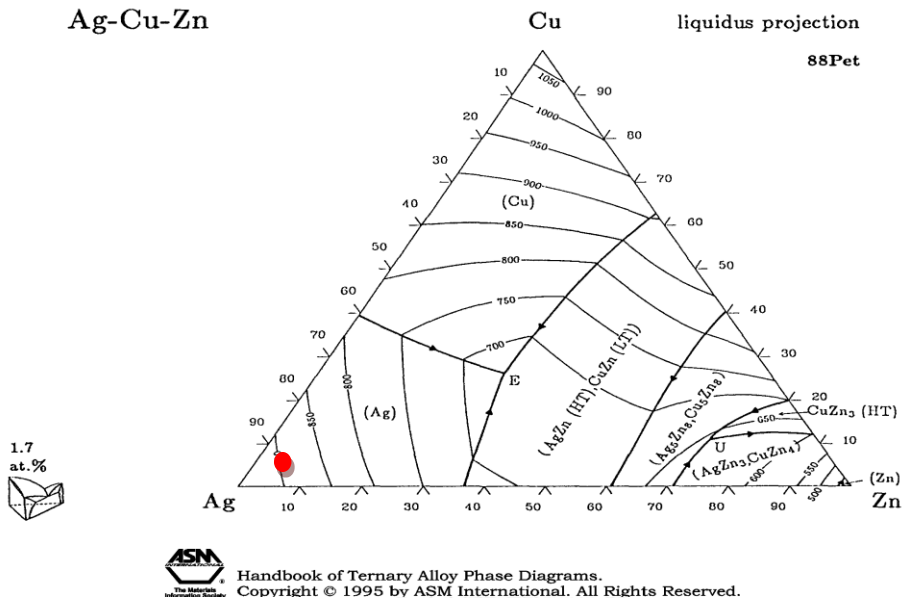
4.2 การเย็นตัวของน้ำโลหะ (Solidification Path)

ส่วนผสมทางเคมีที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง ICP-AES มาคิดคำนวณด้วยโปรแกรม ThermoCalc. สร้างออกมาเป็น 3D Ternary Phase Diagram ซึ่งเป็นกราฟสามมิติ แกน Z แสดงอุณหภูมิส่วนที่รูปสามเหลี่ยมที่เป็นฐานของกราฟแสดงจุดต่างๆเมื่อ ส่วนผสมทางเคมีของธาตุทั้งสามได้แก่ เงิน(Ag) ทองแดง (Cu) และ สังกะสี (Zn) ที่เปลี่ยนไป ดังรูปที่ 34



รูปที่ 34 เฟสไดอะแกรม 3 มิติของโลหะผสมเงินที่ได้จากการคำนวณจากโปรแกรม thermocalc.

โดยแผนภาพนี้จะแสดงถึงโครงสร้างต่างๆที่เป็นไปได้ ณ อุณหภูมิต่างๆที่สนใจ ที่ส่วนผสมต่างๆของโลหะผสมเงิน(Ag) ทองแดง (Cu) และสังกะสี (Zn)



รูปที่ 35 แสดง Liquidus Projection ของโลหะผสมเงิน (Ag) ทองแดง (Cu) และสังกะสี (Zn) [29]

จากรูปที่ 35 แสดงกราฟที่เป็น Liquidus Projection ที่พลอตกราฟแปลงมาจากแผนภูมิเฟส 3 มิติของโลหะผสมเงิน (3D ternary phase diagram) โดยประกอบด้วยเส้นที่เป็นอุณหภูมิต่างๆ เฟสต่างๆที่เกิดขึ้น จากส่วนผสมทางเคมีที่ได้จากการวัดค่าด้วยเครื่อง ICP-AES สามารถนำไปคำนวณลักษณะการแข็งตัวของน้ำโลหะได้ดังนี้

จากส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมเงิน ที่มีสัดส่วนของโลหะเงิน 94% โลหะทองแดง 4.4% และโลหะสังกะสี 1.6% โดยน้ำหนัก (จุดสีแดงในรูปที่ 34) เมื่อนำมาคำนวณตามโมเดลพลังงานอิสระของกิบส์ (Gibbs) ได้ผลการคำนวณตามตารางที่ 4 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

จุดที่ 1 อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวของโลหะผสม ในจุดนี้สถานะของโลหะผสมจะเป็นของเหลวทั้งหมด (100 %) โดยน้ำโลหะหลอมเหลวนี้จะประกอบด้วยส่วนที่เป็น โลหะเงิน 94% โลหะทองแดง 4.4% และโลหะสังกะสี 1.6% โดยน้ำหนัก

จุดที่ 2 ที่อุณหภูมิ 737.5 °C ในจุดนี้เป็นจุดที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของโลหะผสม ซึ่งเป็นจุดที่ประกอบด้วยส่วนที่เป็นโลหะหลอมเหลว และส่วนที่น้ำโลหะเริ่มแข็งตัวมีสัดส่วนดังนี้

2.1 สัดส่วนน้ำโลหะแข็งตัว 87.5% โดยน้ำหนัก: เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลว เฟสที่จะแข็งตัวเป็นอันดับแรกคือโลหะเงิน (Ag) ที่มีปริมาณมากที่สุด ในโลหะแข็งตัวจะประกอบด้วย โลหะเงินเพียงอย่างเดียวเกิดเป็นเฟสเนื้อพื้น (Matrix) มีโลหะเงินที่แข็งตัวเป็น 87.5% จาก 94% โดยน้ำหนัก

2.2 สัดส่วนน้ำโลหะ 12.5 % โดยน้ำหนัก: น้ำโลหะส่วนที่ยังไม่แข็งตัวจะมีสัดส่วนที่เป็นโลหะทองแดง และโลหะสังกะสีเท่าเดิม นั่นคือ 4.4% และ 1.6% โดยน้ำหนัก ส่วนโลหะเงินนั้นแข็งตัวไปแล้ว 87.5% จาก 94% จึงเหลือส่วนที่เป็นโลหะเงินหลอมเหลวเพียง 6.75% จาก 94% โดยน้ำหนัก

จุดที่ 3 ที่อุณหภูมิ 725 °C เมื่ออุณหภูมิลดลงมาถึงที่จุดนี้โลหะหลอมเหลวเงินบางส่วนก็จะแข็งตัวเรื่อยๆ แต่จะมีโลหะทองแดงบางส่วนที่เริ่มแข็งตัวกลายเป็นสารละลายของแข็ง (solid solution) อีกส่วน

3.1 สัดส่วนน้ำโลหะแข็งตัว 90.4 % โดยน้ำหนัก: น้ำโลหะที่แข็งตัวประกอบด้วยส่วนที่เป็นโลหะเงิน (Ag) ที่มีสัดส่วนเพิ่มขึ้นเป็น 89% จากเดิมที่มีปริมาณ 94% โดยน้ำหนัก และมีส่วนที่เป็นโลหะทองแดง (Cu) ปริมาณเป็น 3.2% จาก 4.4% โดยน้ำหนัก

3.2 สัดส่วนน้ำโลหะ 9.6 % โดยน้ำหนัก: จากการที่โลหะทองแดงบางส่วนเริ่มแข็งตัวทำให้สัดส่วนของทองแดง (Cu) ในน้ำโลหะลดลงเหลือ 2.97% จาก 4.4% โดยน้ำหนัก และ โลหะเงิน (Ag) มีสัดส่วน 5% จาก 94% ส่วนโลหะสังกะสี (Zn) มีปริมาณเท่าเดิมคือ 1.6% โดยน้ำหนัก

จุดที่ 4 ที่อุณหภูมิ 666 °C (เหนือจุด ternary eutectic) : ที่จุดนี้ น้ำโลหะหลอมเหลวใกล้แข็งตัวจนเกือบหมดมีรายละเอียดดังนี้

4.1 สัดส่วนน้ำโลหะแข็งตัว 95.4 % โดยน้ำหนัก น้ำโลหะที่แข็งตัวประกอบด้วยส่วนที่เป็นโลหะเงิน (Ag) ที่มีสัดส่วนเพิ่มขึ้นเป็น 91.92% จาก 94% โดยน้ำหนัก และมีส่วนที่เป็นโลหะทองแดง (Cu) ที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นเป็น 3.7% จาก 4.4% โดยน้ำหนัก

4.2 สัดส่วนน้ำโลหะ 4.88 % โดยน้ำหนัก: โลหะทองแดงแข็งตัวเพิ่มขึ้นทำให้สัดส่วนของทองแดง (Cu) ในน้ำโลหะลดลงเหลือ 1.19% จาก 4.4% โดยน้ำหนัก และโลหะเงิน (Ag) มีสัดส่วน 2.1% จาก 94% โดยน้ำหนัก ส่วนโลหะสังกะสี (Zn) มีปริมาณเท่าเดิมคือ 1.6% โดยน้ำหนัก

จุดที่ 5 ที่อุณหภูมิ 665 °C เกิดปฏิกิริยา Ternary Eutectic ดังสมการ

Melt solidifies to form eutectic structure



ที่จุดนี้โลหะหลอมเหลวจะแข็งตัวทั้งหมดเกิดเป็นส่วนที่เป็นโลหะเนื้อพื้น (matrix) อยู่สองชนิดได้แก่ โลหะเงิน (Ag) มีสัดส่วน 91.92% จาก 94% โลหะทองแดง (Cu) 3.2% จาก 4.4% โลหะเงินและโลหะทองแดงที่เหลือจะไปรวมตัวกับสังกะสี (Zn) เกิดเป็นโครงสร้างยูเทคติกสองชนิด ได้แก่ AgZn(HT) และ CuZn(HT)

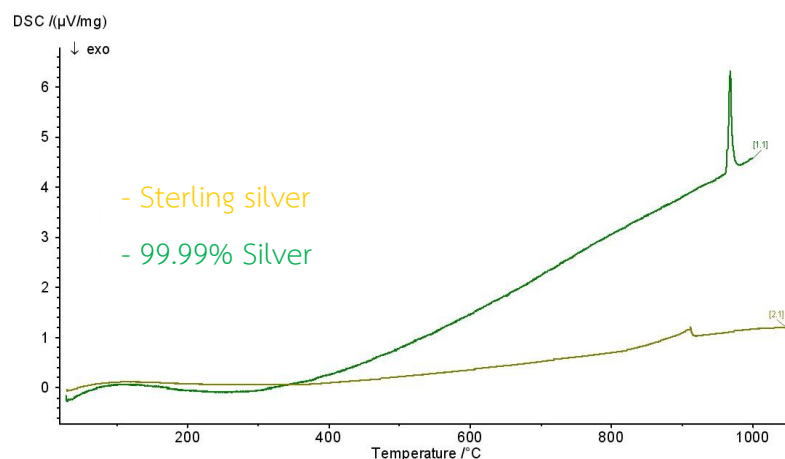
ตารางที่ 4 แสดงการคำนวณการแข็งตัวของโลหะผสมเงิน

Melt = $\left\{ \begin{array}{l} \text{Zn} = 1.6 \\ \text{Cu} = 4.4 \\ \text{Ag} = 94 \end{array} \right.$				
Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	Proportions and Composition of Phase	Analysis		
		Zn	Cu	Ag
above T_m	Melt = 100 % $\left\{ \begin{array}{l} \text{Zn} = 1.6 \\ \text{Cu} = 4.4 \\ \text{Ag} = 94 \end{array} \right.$ Crystals = E % Ag	1.6	4.4	94
737.5	Melt = 12.5 % $\left\{ \begin{array}{l} \text{Zn} = 14 \\ \text{Cu} = 32 \\ \text{Ag} = 54 \end{array} \right.$ Crystals = 87.5 % Ag E % Cu	1.75	4	6.75 87.5/94
725	Melt = 9.6% $\left\{ \begin{array}{l} \text{Zn} = 17 \\ \text{Cu} = 31 \\ \text{Ag} = 52 \end{array} \right.$ Crystals = 90.4% $\left\{ \begin{array}{l} \text{Cu} = 2 \\ \text{Ag} = 98 \end{array} \right.$	1.63	2.97 3.2/4.4	4.99 89/94
above E	Melt = 4.88% $\left\{ \begin{array}{l} \text{Zn} = 32.24 \\ \text{Cu} = 24.48 \\ \text{Ag} = 43.28 \end{array} \right.$ Crystals = 95.4% $\left\{ \begin{array}{l} \text{Cu} = 3.36 \end{array} \right.$	1.58	1.19 3.2/4.4	2.11

	Ag = 96.64			91.92/94
Melt solidifies to form eutectic structure Ag, Zn, Cu (l) = Ag + AgZn(HT) + CuZn(HT) + Cu				
below E	AgZn = 87.12 (Ag=74 , Zn = 26)	1.1		3.15
	Eutectic { CuZn = 8.4 (Cu = 63.2 , Zn = 36.8)	0.15	0.26	
	Cu = 4.48		0.22	
	Crystals = 95.12 { Cu = 3.36 Ag = 96.64		3.2/4.4	91.92/94

4.3 การวิเคราะห์ทางความร้อน

นำโลหะผสมเงินที่ได้จากบริษัทบีวดี เจมส์ แพคตอรี มาทำการทดสอบวัดค่าจุดหลอมเหลวด้วยเครื่อง DSC โดยให้ความร้อนแก่ชิ้นงานด้วยอัตรา (heating rate) 20 องศาเซลเซียสต่อนาที จากอุณหภูมิห้องจนกระทั่งอุณหภูมิขึ้นไปที่ 1000 °C จากนั้นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 1000 °C คงไว้ 5 นาที (isothermal) และปล่อยให้ น้ำโลหะเย็นตัวด้วยอัตราเย็นตัว (cooling rate) 50K / min ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 36



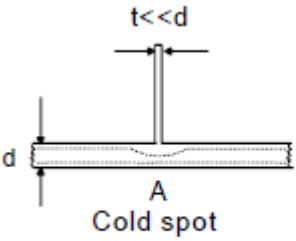
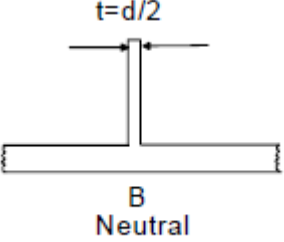
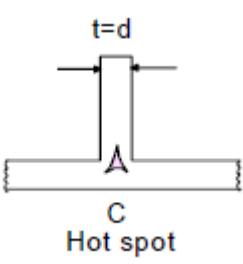
รูปที่ 36 ผลการทดลอง TG/DSC ของโลหะเงินผสมและโลหะเงิน 99.99%

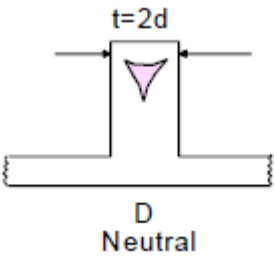
จากผลการทดลองดังรูปที่ 36 พบว่ากราฟของโลหะเงินผสม (สีทอง) ค่าความชันของกราฟเกิดการเปลี่ยนแปลงในช่วง 905-910 °C เป็นความชันที่เกิดจากการดูดพลังงานเข้าไปเพื่อสลายพันธะ เปลี่ยนสถานะจากของแข็งไปเป็นของเหลวเป็นการดูดพลังงานความร้อน (endothermic)

หากพิจารณากราฟของโลหะเงิน 99.99% (สีเขียว) ซึ่งความชันของกราฟเปลี่ยนแปลงในช่วง 958-961 °C ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลจุดหลอมเหลวของโลหะเงินบริสุทธิ์ที่มีค่าอยู่ที่ 961 °C และจากข้อมูลก่อนหน้านี้นี้ในส่วนทิศทางการเย็นตัว (Solidification path) ที่อ่านค่าจุดหลอมเหลวได้ที่ 910 °C ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าจุดหลอมเหลวของโลหะผสมเงินนี้มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 910 °C

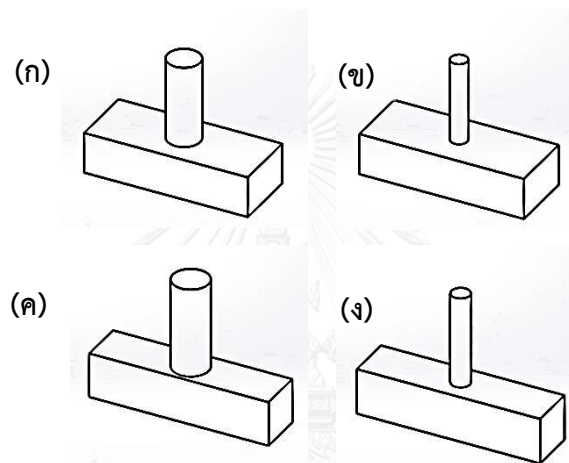
4.4 การออกแบบชิ้นงาน

งานในส่วนนี้จะเป็นการออกแบบชิ้นงานเพื่อที่จะนำไปสร้างชิ้นงานด้วยกระบวนการหล่อแบบเต็ม และการหล่อกึ่งแข็ง จากการศึกษาทฤษฎี Feeding Rules of Campbell's [30] พบว่าด้วยการแบบชิ้นงานในเรื่องสัดส่วนระหว่างทางของน้ำโลหะ (t) และความหนาของชิ้นงาน (d) มีรายละเอียดดังนี้

 <p style="text-align: center;">$t \ll d$</p> <p style="text-align: center;">A Cold spot</p>	<p>(1) เมื่อทางไหลของน้ำโลหะน้อยกว่าความหนาของชิ้นงานมาก ($t \ll d$) จะพบว่าชิ้นงานหลังการหล่อจะไม่สมบูรณ์ ไม่เต็มแบบเกิดเป็น Cold spot ดังรูป</p>
 <p style="text-align: center;">$t = d/2$</p> <p style="text-align: center;">B Neutral</p>	<p>(2) เมื่อทางไหลของน้ำโลหะมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของความหนาของชิ้นงานครึ่งหนึ่ง ($t = d/2$) จะพบว่าชิ้นงานที่ได้หลังการหล่อเป็นชิ้นงานที่สมบูรณ์</p>
 <p style="text-align: center;">$t = d$</p> <p style="text-align: center;">C Hot spot</p>	<p>(3) เมื่อทางไหลของน้ำโลหะเท่ากับความหนาของชิ้นงาน ($t = d$) จะพบว่าชิ้นงานหลังการหล่อได้ไม่สมบูรณ์ เกิดเป็นรูพรุน (Hot spot) บริเวณตรงกลางของชิ้นงาน</p>

 <p style="text-align: center;">$t=2d$</p> <p style="text-align: center;">D Neutral</p>	<p>(4) เมื่อทางไหลของน้ำโลหะเท่ากับสองเท่าของความหนาของชิ้นงาน ($t=2d$) จะพบว่าชิ้นงานที่ได้จะหล่อได้สมบูรณ์ แต่จะเกิดการหดตัวที่ ทางไหลของน้ำโลหะ</p>
---	---

จากข้อมูลข้างต้น จึงสามารถออกแบบชิ้นงานออกมาได้เป็น 2 กลุ่ม เพื่อให้เหมาะกับการพิจารณาการหดตัวของน้ำโลหะ ซึ่งจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 37 แบบชิ้น A1 (ก) แบบชิ้นงาน A2 (ข) แบบชิ้นงาน B1 (ค) และแบบชิ้นงาน B2 (ง)

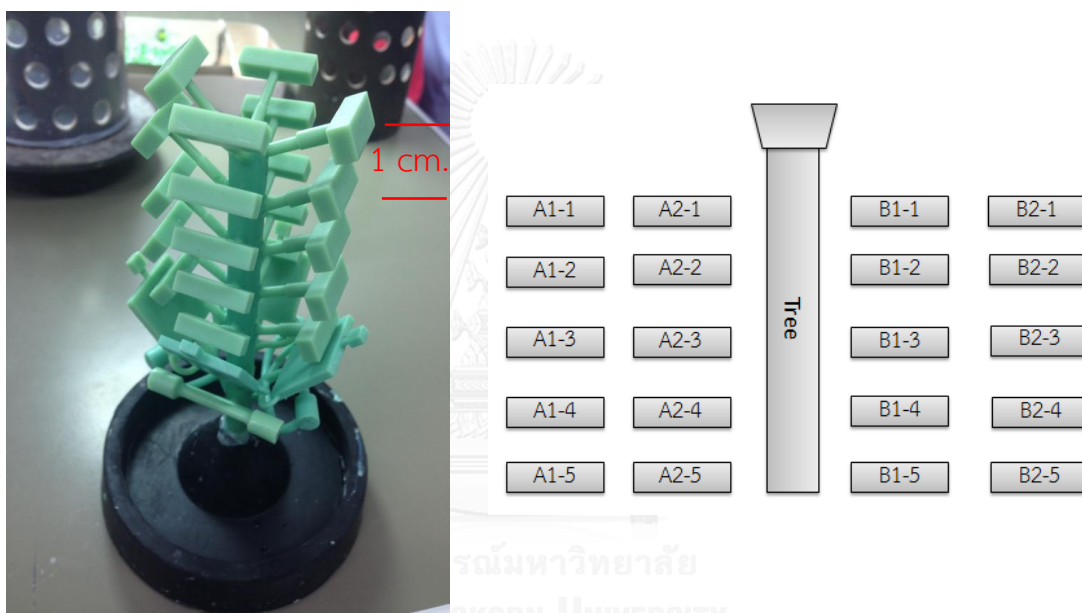
ชิ้นงานในทั้ง 2 กลุ่มดังรูปที่ 37 ต้องการให้มีสัดส่วนระหว่างทางไหลของน้ำโลหะกับความหนาของชิ้นงานมีค่าใกล้เคียงกัน ($t=d$) จากทฤษฎีของ Campbell โดยชิ้นงาน A มีความกว้าง 8.0 มิลลิเมตร ความยาว 20.0 มิลลิเมตร และความหนา 5.0 มิลลิเมตร ชิ้นงาน B มีความกว้าง 4.0 มิลลิเมตร ความยาว 20.0 มิลลิเมตร และความหนา 5.0 มิลลิเมตร โดยชิ้นงานทั้งสองกลุ่มนั้นจะควบคุมขนาดของทางเข้าของน้ำโลหะ 2 ขนาด คือ ขนาด 4 มิลลิเมตรและขนาด 2 มิลลิเมตร ชิ้นงานทั้งสองกลุ่มนี้จะสามารถทำนายได้ว่าจะเกิดรูพรุนขึ้นบริเวณตรงกลางของชิ้นงานหากนำชิ้นงานไปหล่อด้วยกระบวนการปกติ และหากนำชิ้นงานนี้ไปหล่อด้วยกระบวนการกึ่งแข็งจะสามารถทำให้ไม่เกิดรูพรุนได้

4.5 การหล่อชิ้นงาน

การหล่อชิ้นงานด้วยทั้งกระบวนการหล่อแบบเต็มและกระบวนการหล่อกึ่งแข็งนั้น จะใช้วิธีการหล่อแบบกระบวนการเต็มของบริษัทบิวตี้ เจมส์ ซึ่งจะมีขั้นตอนในการอบปูน อุณหภูมิที่ในการให้ความร้อน และขั้นตอนการเอาชิ้นงานออกจากแบบซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

ขั้นตอนการติดต้นเทียน

การติดต้นเทียนจะทำการติดชิ้นงานทั้ง 4 แบบ ได้แก่ ชิ้นงาน A1 ชิ้นงาน A2 ชิ้นงาน B1 และชิ้นงาน B2 ใน 1 ชั้น ทำทั้งหมด 5 ชั้น โดยจะควบคุมระยะห่างระหว่างชั้นให้เท่ากัน จะได้ชิ้นงานทั้งหมด 20 ชิ้น นอกจากนี้ติดชิ้นงานสำหรับทดสอบความแข็งแรงตั้ง และชิ้นงานสำหรับทดสอบการต้านทานการหมองอย่างละ 3 ชิ้น ดังรูปที่ 38 ในการติดต้นเทียนแต่ละชั้นนั้นจะทำการควบคุมระยะห่างในแต่ละชั้นให้เท่ากันที่ระยะห่าง 1 เซนติเมตร ควบคุมน้ำหนักของเทียนหลังจากติดชิ้นงานให้มีค่า 35 กรัม ควบคุมน้ำหนักของโลหะเงินผสมที่ 380 กรัม ติดชิ้นงานสำหรับทดสอบความแข็งแรงตั้ง และชิ้นงานสำหรับทดสอบการต้านทานการหมองอย่างละ 3 ชิ้น



รูปที่ 38 แสดงชิ้นงานที่ติดบนต้นเทียน (ซ้าย) และแผนผังตำแหน่งของชิ้นงานทั้งหมด (ขวา)

ขั้นตอนการเตรียมแบบปูน

การผสมปูนชนิด JPL รุ่น silk cast โดยใช้ปูนปริมาณ 100 กรัม ต่อน้ำปริมาตร 38-40 มิลลิลิตร เทน้ำลงไปก่อนบางส่วน สลับกับใส่ปูน ปั่นด้วยเครื่องกวน 3 นาที แล้วดูดสูญญากาศ เทลงบล็อด และดูดสูญญากาศเป็นเวลา 1 นาที จากนั้นก็จะทิ้งแบบปูนไว้ 2 ชั่วโมงเพื่อให้เกิดการเซ็ทตัว

ขั้นตอนการอบปูน

การอบแบบปูนนั้นจะทำการอบปูนเป็นขั้นบันได โดยอบปูนที่อุณหภูมิเริ่มต้น 150°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นให้อุณหภูมิไปยัง 350°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นให้อุณหภูมิไปยัง 450°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ให้อุณหภูมิไปที่ 550°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นให้อุณหภูมิไปที่ 650°C เป็น

เวลา 1 ชั่วโมง และให้อุณหภูมิไปที่ 750°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นลดอุณหภูมิลงมาที่ 600°C ก่อนที่จะยกแบบปูนไปหล่อขึ้นงาน

ขั้นตอนการคำนวณปริมาณโลหะผสมเงิน

$$\text{น้ำหนักของโลหะที่ใช้} = \text{น้ำหนักของต้นเทียน} \times \text{ความถ่วงจำเพาะของโลหะเงินผสม} \quad (25)$$

ในที่นี้ค่าความถ่วงจำเพาะของโลหะเงินผสมนี้อยู่ที่ประมาณ 10.3 แต่ทางบริษัทบิวตี้เจมส์ใช้ค่า 11 เนื่องจากเป็นค่าที่เผื่อไว้กรณีที่โลหะไม่เต็มแบบ



รูปที่ 39 แสดงน้ำหนักของโลหะเงินผสมที่ใช้

การหล่อขึ้นงานให้อุณหภูมิไปที่ 950°C ด้วยการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ (induction) ใช้ความดันในเบ้าหลอม 0 บาร์ (bar) ในบรรยากาศแก๊สอาร์กอน เมื่อโลหะผสมเงินหลอมเหลวสมบูรณ์ก็จะเทน้ำโลหะหลอมเหลวเข้าสู่แบบ หลังจากนั้นหล่อขึ้นงานเสร็จแล้วทิ้งแบบไว้ในเครื่องก่อน 5 นาที จากนั้นก็นำแบบปูนออกจากเครื่องหล่อ วางแบบปูนไว้ในอากาศไว้ 5 นาทีแล้วนำไปจุ่มน้ำเพื่อนำชิ้นงานออกจากแบบปูน

ชิ้นงานหลังการหล่อทั้งการหล่อเดิมและกระบวนการหล่อกึ่งแข็งจะได้ชิ้นงานออกมาทั้งหมด 2 แบบ แต่ละแบบจะมีทางไหลของน้ำโลหะ 2 ขนาด ดังแสดง

ชิ้นงาน A1 : เป็นชิ้นงานขนาด 8.0×20.0
 $\times 5.0$ มิลลิเมตร ขนาดของทางไหลน้ำโลหะ
 4 มิลลิเมตร



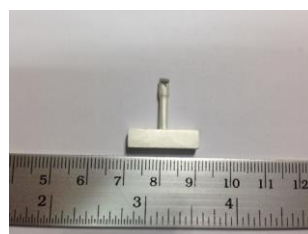
ชิ้นงาน A2 : เป็นชิ้นงานขนาด 8.0 × 20.0 × 5.0 มิลลิเมตร ขนาดของทางไหลน้ำโลหะ 2 มิลลิเมตร



ชิ้นงาน B1 : เป็นชิ้นงานขนาด 5.0 × 20.0 × 5.0 มิลลิเมตร ขนาดของทางไหลน้ำโลหะ 4 มิลลิเมตร



ชิ้นงาน B2 : เป็นชิ้นงานขนาด 5.0 × 20.0 × 5.0 มิลลิเมตร ขนาดของทางไหลน้ำโลหะ 2 มิลลิเมตร



4.5.1 การหล่อแบบเดิม (As-cast)

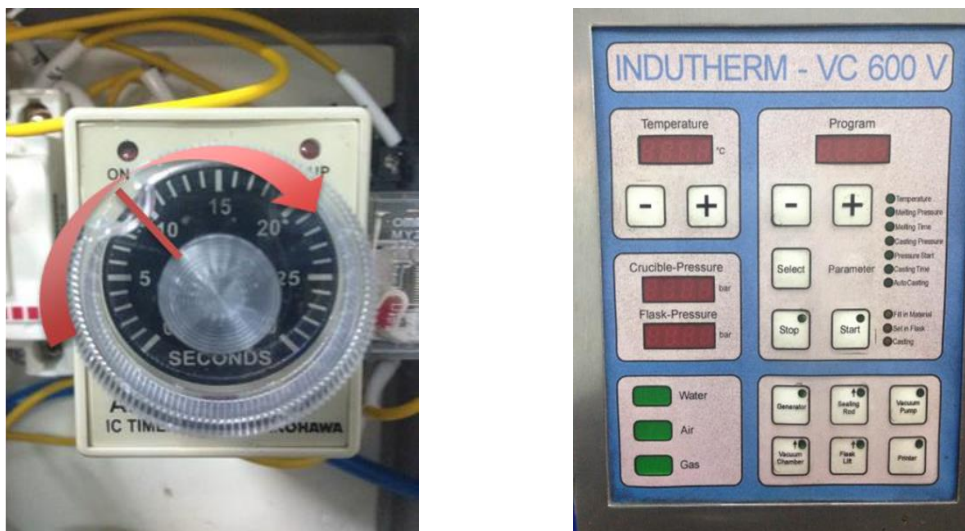
กระบวนการหล่อแบบเดิมที่จะตั้งค่าอุณหภูมิการหล่อไว้ที่ 950 °C (Casting temperature) ความดันในเบ้าหลอม (Melting Pressure) อยู่ที่ 0 บาร์ ให้ความร้อนเป็นเวลา 3 นาทีในบรรยากาศแก๊สอาร์กอน ความดันของแบบปูนอยู่ที่ -1 บาร์ เมื่อน้ำโลหะหลอมเหลวความดันในเบ้าหลอมก็จะเปลี่ยนเป็น 1 บาร์ ความดันที่เพิ่มเข้าไปนี้จะช่วยในการเติมเต็มแบบได้ดียิ่งขึ้น จากนั้นแท่งกราฟไฟต์ที่อยู่ตรงกลางของเบ้าหลอมก็จะยกตัวขึ้น น้ำโลหะหลอมเหลวก็จะไหลสู่แบบหล่อ ทั้งแบบปูนไว้ในเครื่อง 5 นาที จากนั้นก็จะนำแบบปูนออกจากเครื่องหล่อ วางแบบปูนไว้ในอากาศไว้ 5 นาทีแล้วนำไปจุ่มน้ำ ก็จะได้ต้นเงินโลหะผสมดังรูปที่ 40



รูปที่ 40 แสดงต้นโลหะผสมเงิน

4.5.2 การหล่อกึ่งแข็ง (Semi-solid casting)

การหล่อชิ้นงานด้วยกระบวนการหล่อกึ่งแข็งในขั้นตอนการติดตั้งเทียนและการผสมปูนต่างๆ จะเหมือนกันกับการหล่อแบบเดิม จะต่างกันในส่วนที่เป็นอุณหภูมิที่ใช้ในการหล่อที่จะลดอุณหภูมิของน้ำโลหะหลอมเหลว งานในส่วนนี้จะเริ่มต้นตั้งแต่การออกแบบเครื่องหล่อ Indutherm VC600 ที่ใช้ในการหล่อโลหะผสมเงินในปัจจุบันเพื่อให้สามารถหล่อกึ่งแข็งได้ จากทฤษฎีการหล่อกึ่งแข็งที่ได้ทำการสืบค้นข้อมูลจะเลือกใช้การหล่อกึ่งแข็งที่ใช้การกวนด้วยแก๊ส การลดอุณหภูมิของน้ำโลหะหลอมเหลวลงมาในช่วงที่เริ่มเกิดเป็นของแข็งบางส่วน ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของโลหะนั้นๆ ทำโดยการส่งผ่านแก๊สที่ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำโลหะหลอมเหลวในการทดลองนี้จะเลือกใช้แก๊สอาร์กอน โดยจะส่งผ่านแก๊สอาร์กอนผ่านทางแท่งกราไฟต์ที่ทำหน้าที่เป็นกลไกในการเหนี่ยวน้ำโลหะเข้าสู่แบบ แก๊สอาร์กอนที่ผ่านเข้ามานั้นจะมีอัตราการไหลของแก๊สอยู่ที่ 1 ลิตรต่อนาที ถูกส่งผ่านมายังตู้คอนโทรลที่ควบคุมเวลาในการปล่อยแก๊สดังรูปที่ 41 จากนั้นแก๊สจะถูกส่งผ่านไปยังแท่งกราไฟต์และสุดท้ายถูกส่งผ่านไปยังน้ำโลหะหลอมเหลวผ่านทางรูพูนของแท่งกราไฟต์ แก๊สอาร์กอนก่อนที่จะสัมผัสกับน้ำโลหะจะมีอุณหภูมิอยู่ที่อุณหภูมิห้องที่ 25 °C เมื่อมาสัมผัสกับน้ำโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 950 °C ก็จะทำให้เกิดการคายพลังงานความร้อนจากน้ำโลหะหลอมเหลวทำให้อุณหภูมิของโลหะหลอมเหลวลดต่ำลง เมื่ออุณหภูมิถูกลดต่ำกว่าจุดหลอมเหลวก็จะเกิดโลหะแข็งตัวบางส่วนภายในโลหะหลอมเหลวเรียกว่าสถานะกึ่งแข็งกึ่งเหลว



รูปที่ 41 แสดงระบบการควบคุมปริมาณแก๊ส(ซ้าย)
และหน้าจอการตั้งค่าตัวแปรต่างๆในการหล่อ(ขวา)

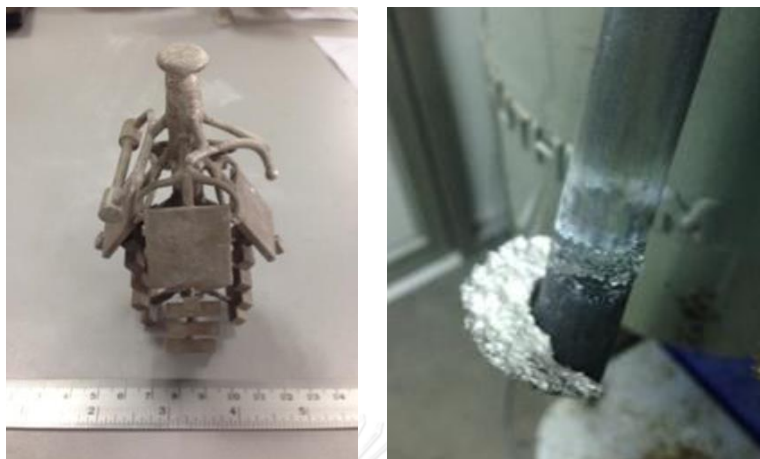
ตารางที่ 5 แสดงการทดลองที่สภาวะต่างๆ

สภาวะการหล่อ	อุณหภูมิที่ใช้ในการหล่อ ($^{\circ}\text{C}$)	อุณหภูมิแบบปูน ($^{\circ}\text{C}$)	สัดส่วนของแข็งจากสมการของ Schiel (f_s)
การหล่อแบบเดิม	950	600	0
การหล่อกึ่งแข็งที่มีการกวนด้วยแก๊ส 10 วินาที	890	600	0.37
การหล่อกึ่งแข็งที่มีการกวนด้วยแก๊ส 15 วินาที	871	600	0.51
การหล่อกึ่งแข็งที่มีการกวนด้วยแก๊ส 20 วินาที	862	600	0.56

ปัญหาที่พบในการหล่อแบบกึ่งแข็ง

ในการหล่อกึ่งแข็งเริ่มแรกนั้นได้พยายามที่จะปรับตัวแปรต่างๆ คือ เรื่องปริมาณของแก๊สที่ใช้ในการกวน เวลาที่ใช้ในการกวน ปัญหาที่พบคือเมื่อสัดส่วนของแข็งในน้ำโลหะหลอมเหลวมีปริมาณที่สูงขึ้น ซึ่งเกิดจากการใช้ปริมาณของแก๊สและเวลาในการกวนที่ไม่เหมาะสม เมื่อหล่อชิ้นงานเข้าสู่แบบส่งผลทำให้โลหะบางส่วนเกิดการแข็งตัวก่อนในเบ้าหลอมดังแสดงดังรูปที่ 42 และทำให้ชิ้นงานที่ได้ไม่

เต็มแบบ การแก้ปัญหาสามารถทำได้โดยการลดปริมาณการกวนด้วยแก๊สให้อยู่ที่ 1 ลิตรต่อนาที แล้วใช้เวลาในการกวนด้วยแก๊สไม่ควรจะเกิน 30 วินาที ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของโลหะผสมอีกด้วย



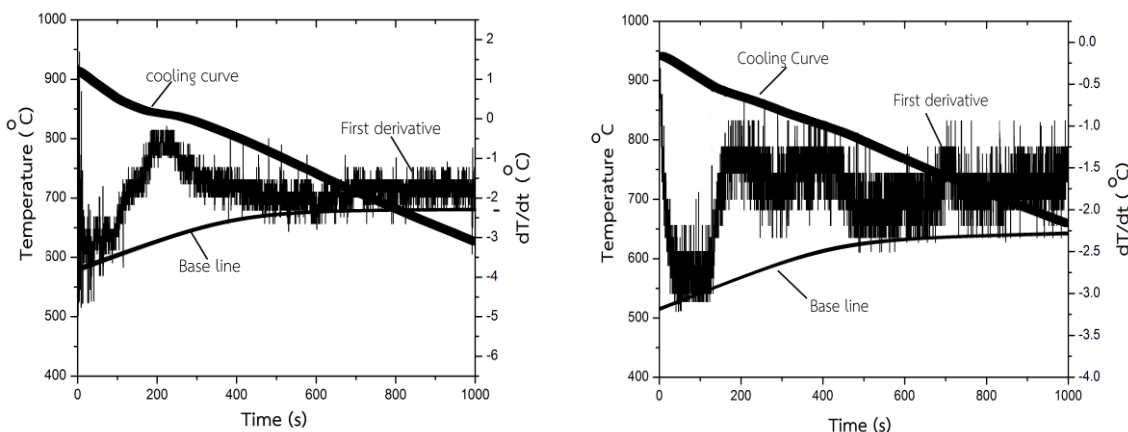
รูปที่ 42 แสดงโลหะบางส่วนที่เกิดการแข็งตัวในเบ้าหลอม

4.6 การศึกษาสัดส่วนของแข็ง

ค่าสัดส่วนของแข็งที่แท้จริงที่เกิดขึ้นในกระบวนการหล่อกึ่งแข็งนั้นมีความสำคัญอย่างมาก ค่าสัดส่วนของแข็งที่เปลี่ยนไปในแต่ละสภาวะการทดลองนั้นส่งผลต่อการเติมเต็มแบบเนื่องจากความหนืดที่เปลี่ยนไปของน้ำโลหะ เพื่อที่จะทำการวัดค่าสัดส่วนของแข็งในระบบที่เหมาะสมกับการหล่อขึ้นงานโลหะผสมเงินด้วยการกวนด้วยแก๊ส วิธีที่ง่ายและเหมาะสมกับการทดลองนี้ คือ การวิเคราะห์ทางความร้อนด้วยวิธีโค้งการเย็นตัว และการใช้โมเดลทางอุณหพลศาสตร์ ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

4.6.1 การวิเคราะห์ทางความร้อน

เทคนิคการวิเคราะห์ทางความร้อนด้วยวิธีโค้งแสดงการเย็นตัว ทำโดยการจุ่มเทอร์โมคัปเปอ์ลงในน้ำโลหะหลอมหลังจากนั้นบันทึกค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปเทียบกับเวลาที่เปลี่ยนไป ในการวัดค่าสัดส่วนของแข็งของโลหะผสมเงินนี้จะทำการวัดค่าใน 2 ระบบ ได้แก่ ระบบการเย็นตัวของน้ำโลหะที่ไม่มีการกวนด้วยแก๊สและระบบที่มีการกวนด้วยแก๊ส ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา และอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งที่เปลี่ยนไป แสดงดังรูปที่ 43



รูปที่ 43 แสดงโค้งการเย็นตัวของระบบที่ไม่มีการกวนด้วยแก๊ส(ซ้าย)
และระบบที่มีการกวนด้วยแก๊ส(ขวา)

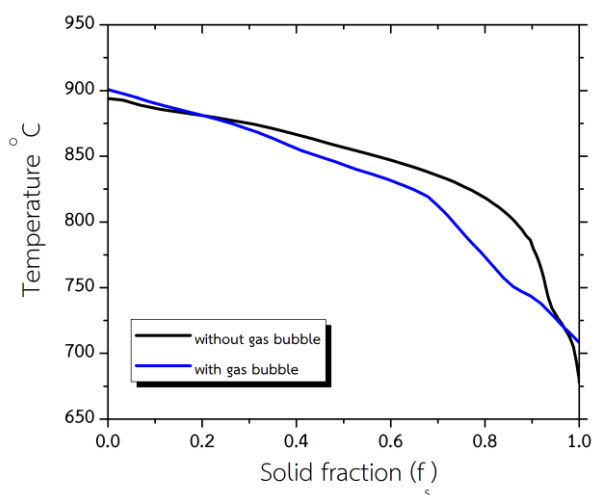
1.) ระบบที่ไม่มีการกวนด้วยแก๊ส

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นโค้งการเย็นตัวของน้ำโลหะหลอมเหลว กับเส้นอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งดังแสดงในรูปที่ 43 (ซ้าย) เมื่อพิจารณาเส้นอนุพันธ์อันดับที่หนึ่ง การเปลี่ยนแปลงความชันที่จุดแรกอยู่ที่ 891°C ซึ่งเป็นจุดที่เกิดการเย็นตัวของเฟสแรกคือโลหะเงิน (primary Ag) จากนั้นเฟสของเงินก็จะโตต่อไปเรื่อยๆขณะที่อุณหภูมิลดลงไป จนกระทั่งอุณหภูมิลดลงไปยัง 745°C เฟสของโลหะเงินก็จะโตเต็มที่ จากนั้นก็จะเกิดโครงสร้างยูเทคติก (Eutectic) และเฟสของโลหะเงินจะโตต่อไปเรื่อยๆจนถึง 677°C

2.) ระบบที่มีการกวนด้วยแก๊ส

ระบบที่มีการกวนด้วยแก๊สจะมีการถ่ายเทความร้อนที่แตกต่างจากระบบที่ไม่มีการกวนด้วยแก๊ส กล่าวคือ ในระบบที่ไม่มีการเย็นตัวด้วยแก๊สนั้นโลหะหลอมเหลวจะแข็งตัวโดยมีการถ่ายเทความร้อนออกจากระบบไปยังผนังของเบ้าหลอม แต่ในระบบที่มีการกวนด้วยแก๊สนั้นการถ่ายเทความร้อนออกจากระบบมี 2 ทางคือ ทางผนังของเบ้าหลอม และ การแลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อแก๊สอาร์กอนที่อุณหภูมิห้องสัมผัสกับน้ำโลหะหลอมเหลว (ไม่พิจารณาการถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสี) เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างโค้งการเย็นตัวของน้ำโลหะหลอมเหลวดังรูปที่ 43 (ขวา) จุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงความชันของเส้นอนุพันธ์อันดับที่ 1 อยู่ที่ 903°C ซึ่งเป็นจุดที่เกิดแข็งตัวของเฟสโลหะเงิน (primary Ag) จากนั้นเฟสของเงินก็จะโตต่อไปเรื่อยๆขณะที่อุณหภูมิลดลงไป จนกระทั่งอุณหภูมิลดลงไปยัง 730.68°C เฟสของโลหะเงินก็จะโตเต็มที่ จากนั้นก็จะเกิดโครงสร้างยูเทคติก (Eutectic) และโตต่อไปเรื่อยๆจนถึง 708.38°C .

เมื่อนำความสัมพันธ์ระหว่างอนุพันธ์อันดับที่หนึ่ง (dT/dt) กับเส้นมาตรฐาน (Base line) มาคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของแข็งที่เกิดขึ้นในระบบในช่วงระหว่างเส้น solidus และเส้น liquidus จะได้กราฟความโค้งการเย็นตัวดังแสดงในรูปที่ 44



รูปที่ 44 แสดงโค้งการเย็นตัวของน้ำโลหะด้วยวิธีการวิเคราะห์ทางความร้อน

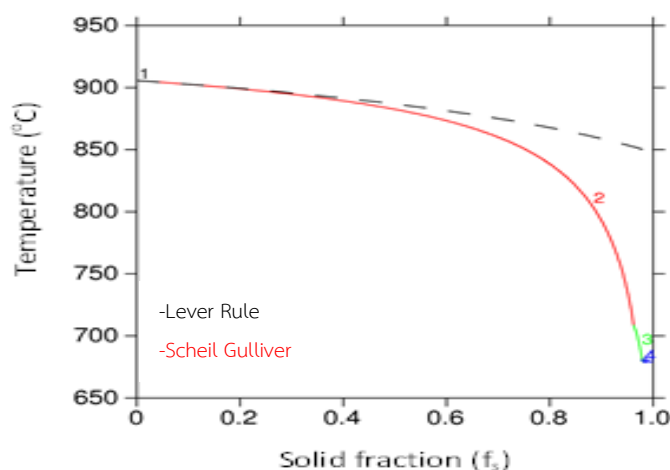
4.6.2 โมเดลทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamics model)

โมเดลทางอุณหพลศาสตร์เป็นอีกวิธีที่สะดวกในการใช้วัดค่าสัดส่วนของแข็ง โดยโมเดลที่นิยมใช้ในการคำนวณ ได้แก่ การใช้การคำนวณด้วย Lever-rule และ โมเดล Scheil-Gulliver เริ่มต้นจากการทราบส่วนผสมที่ต้องใช้คำนวณ ซึ่งในที่นี้คือ โลหะเงิน 94% โดยน้ำหนัก โลหะทองแดง 4.4% โดยน้ำหนัก และโลหะสังกะสี 1.6 % โดยน้ำหนัก ในเฟสไดอแกรมสำหรับระบบที่มีสามองค์ประกอบ (ternary phase diagram) ของระบบนี้จะสามารถทำนายเบื้องต้นได้ว่าโครงสร้างอย่างไรในระบบ เมื่อน้ำโลหะหลอมเหลวเริ่มแข็งตัวไปยังจุดแข็งตัวสุดท้าย ซึ่งสามารถทำนายโครงสร้างที่เกิดขึ้นได้ ดังนี้ เฟสของโลหะเงินที่มีเป็นโลหะเนื้อพื้น เฟสของโลหะทองแดงที่อยู่สารละลายของแข็ง (solid solution) และ เฟสยูเทคติก (eutectic reaction) ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ตารางแสดงโครงสร้างที่เกิดขึ้นเมื่อน้ำโลหะเงินผสมเย็นตัว

ID#	Transformation
1	Start of solidification of $\alpha - Ag$ (liquidus)
2	Maximum growth of primary $\alpha - Ag$ phase
3	Start of solidification of $\beta - Cu$
4	Maximum growth of secondary $\beta - Cu$ phase
5	Eutectic reaction of AgZn and CuZn
6	End of solidification (solidus)

เมื่อคำนวณสัดส่วนของแข็งของลักษณะการเย็นตัวของโลหะผสมเงินด้วยโมเดลทางอุณหพลศาสตร์ ได้แก่ โมเดลพลังงานอิสระของกิบส์ (Gibbs) โดยการใช้การคำนวณด้วย Lever-rule และ โมเดล Scheil-Gulliver ได้ผลการคำนวณ ดังรูปที่ 45



รูปที่ 45 แสดงโค้งการเย็นตัวของน้ำโลหะด้วยวิธีโมเดลทางอุณหพลศาสตร์โดยใช้กฎคานงัด และ สมการของ Scheil

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบการวัดค่าสัดส่วนของแข็งด้วยวิธีการวิเคราะห์ทางความร้อนและวิธีทางโมเดลทางอุณหพลศาสตร์ก็จะพบว่าในแต่ละวิธีนั้นมีข้อจำกัดที่แตกต่างกัน คือ วิธีทางโมเดลทางอุณหพลศาสตร์นั้นจะสามารถบอกได้ว่าโครงสร้างภายในที่สามารถเกิดขึ้นได้ แต่จะมีข้อจำกัดอยู่ที่ไม่สามารถบอกได้ว่าอัตราการเย็นตัวของน้ำโลหะ (cooling rate) นั้นอยู่มีค่าเท่าไร ซึ่งอัตราการเย็นตัวของน้ำโลหะที่แตกต่างกันนี้จะส่งผลต่อการเกิดสัดส่วนของแข็งในระบบ ส่วนการคำนวณสัดส่วนของแข็งด้วยวิธีการวิเคราะห์ทางความร้อนนั้นจะสามารถบอกอัตราการเย็นตัวของ

ระบบได้จริง แต่จะมีข้อจำกัดอยู่ที่ไม่สามารถแสดงค่าการเปลี่ยนแปลงเฟสที่เกิดขึ้นได้หากที่มีปริมาณความร้อนแฝง (latent heat) ที่มีค่าน้อย ซึ่งจากการวัดค่าไค้การเย็นตัวของโลหะผสมเงินจะไม่เจอช่วงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเฟสของโลหะทองแดง (secondary crystallization of Cu-phase) ซึ่งจะละลายอยู่ในโครงผลึกของโลหะเนื้อพื้น (solid solution) ในโครงสร้าง

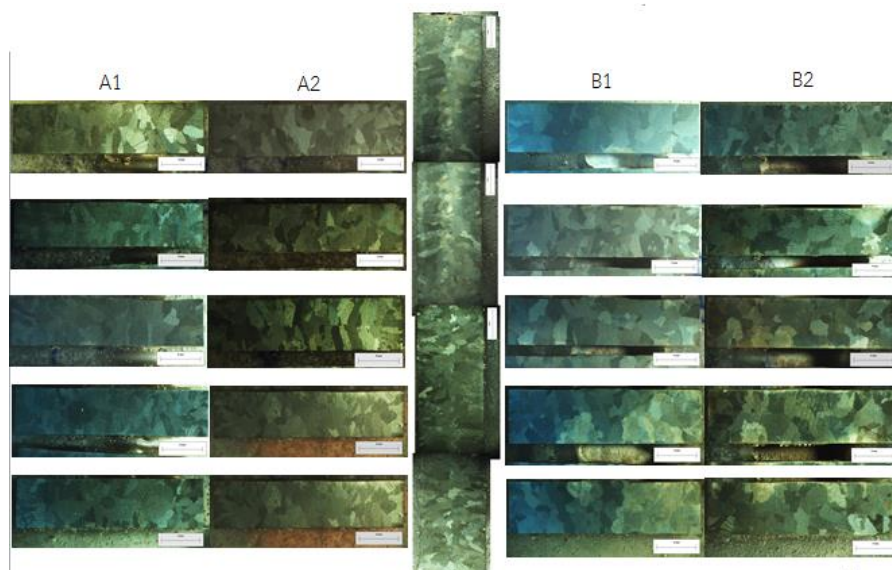
4.7 การศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology)

กระบวนการหล่อชิ้นงานที่แตกต่างไปจากเดิมส่งผลทำให้โครงสร้างของชิ้นงานเปลี่ยนแปลงไป การศึกษาโครงสร้างทั้งระดับมหภาคและโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการหล่อแบบเดิมเปรียบเทียบกับกระบวนการหล่อกึ่งแข็งจึงเป็นสิ่งสำคัญเนื่องจาก โครงสร้างจุลภาคที่เปลี่ยนไปนี้จะส่งผลโดยตรงต่อสมบัติต่างๆของชิ้นงาน เช่น สมบัติทางกล สมบัติการต้านทานการกัดกร่อน ซึ่งจะใช้เทคนิคต่างๆในการศึกษาดังนี้

4.7.1 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope)

สิ่งที่ต้องคำนึงในการพิจารณาโครงสร้างมหภาคของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อกึ่งแข็งคือการกระจายตัวของอนุภาคของแข็งในน้ำโลหะหลอมเหลวเมื่อไหลเข้าสู่แบบว่ามีความสม่ำเสมอหรือไม่ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพิจารณาขนาดของเกรนของชิ้นงานในแต่ละจุดของต้นโลหะเงินรวมทั้งต้นของโลหะเงินด้วย ดังแสดงในรูปที่ 46 ที่เป็นภาพโครงสร้างมหภาคตัวอย่างชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อกึ่งแข็งที่มีการกวนด้วยแก๊สเป็นเวลา 10 วินาที ซึ่งโครงสร้างมหภาคของชิ้นงานในสภาวะการหล่ออื่นๆจะอยู่ในภาคผนวก

ชิ้นงานที่หล่อด้วยกระบวนการหล่อแบบเดิม (As-cast) ที่อุณหภูมิน้ำโลหะหลอมเหลว 950°C โครงสร้างมหภาคของชิ้นงานตัวอย่างที่หล่อด้วยกระบวนการหล่อแบบเดิมแสดงดังรูปที่ 47 (ก) ซึ่งจะสามารถมองเห็นขนาดของเกรนได้ด้วยตาเปล่า และสามารถเห็นทิศทางการเย็นตัวของน้ำโลหะได้ จากรูปที่ 48 (ก) แสดงขนาดของเกรนทั้งหมดของชิ้นงานตามจุดต่างๆบนต้นโลหะพบว่าค่าที่ได้นั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกัน และเกาะกลุ่มกัน โดยค่าเฉลี่ยของขนาดเกรนของชิ้นงานทั้งหมดมีค่า 2.04 มิลลิเมตร

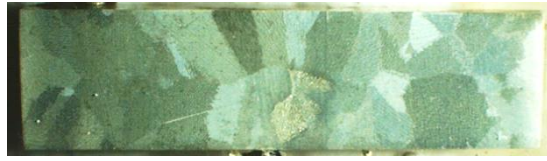


รูปที่ 46 แสดงบริเวณที่พิจารณาโครงสร้างมหภาคของชิ้นงานตัวอย่าง

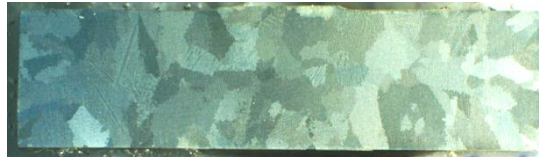
ชิ้นงานที่หล่อด้วยกระบวนการหล่อกึ่งแข็งที่มีการกวนด้วยแก๊ส 10 วินาที ที่อุณหภูมิน้ำโลหะหลอมเหลว 890°C โครงสร้างมหภาคของชิ้นงานตัวอย่างที่หล่อด้วยกระบวนการหล่อเดิมแสดงดังรูปที่ 47(ข) ซึ่งจะสามารถมองเห็นขนาดของเกรนได้ด้วยตาเปล่า และสามารถเห็นทิศทางการเย็นตัวของน้ำโลหะได้ จากรูปที่ 48(ข) แสดงขนาดของเกรนทั้งหมดของชิ้นงานตามจุดต่างๆบนต้นโลหะพบว่าค่าที่ได้นั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกัน และเกาะกลุ่มกัน โดยค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางเกรนของชิ้นงานทั้งหมดมีค่า 1.65 มิลลิเมตร

โครงสร้างมหภาคของชิ้นงานที่หล่อด้วยกระบวนการหล่อกึ่งแข็งที่มีการกวนด้วยแก๊ส 15 และ 20 วินาที โครงสร้างมหภาคของชิ้นงานตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 47(ค) และรูปที่ 47(ง) จะเห็นได้ว่าชิ้นงานมีขนาดของเกรนที่เล็กละเอียดอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการหล่อแบบเดิม และกระบวนการหล่อกึ่งแข็งที่มีการกวนด้วยแก๊ส 10 วินาที ซึ่งเป็นผลมาจากพฤติกรรมการแข็งตัวของน้ำโลหะเมื่อเข้าสู่แบบปูนปลาสเตอร์ที่แตกต่างกัน กล่าวคือชิ้นงานที่หล่อด้วยกระบวนการหล่อเดิมเมื่อน้ำโลหะไหลเข้าสู่แบบการแข็งตัวจะค่อยๆแข็งมาจากบริเวณขอบของชิ้นงานเข้ามาด้านในเรื่อยๆจนแข็งตัวสุดท้าย แตกต่างกับกระบวนการหล่อกึ่งแข็งที่น้ำโลหะหลอมเหลวจะมีอนุภาคของแข็งบางส่วนที่อยู่ภายในน้ำโลหะหลอมเหลว ซึ่งจะเป็นจุดที่แข็งตัวควบคู่ไปกับบริเวณของขอบของชิ้นงาน เมื่อพิจารณาขนาดของเกรนของชิ้นงานในแต่ละกลุ่มตามจุดต่างๆบนต้นโลหะแสดงในรูปที่ 48(ค) และรูปที่ 48(ง) พบว่าค่าที่ได้นั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกัน และเกาะกลุ่มกัน โดยค่าเฉลี่ยของขนาดเกรนของชิ้นงานทั้งหมดมีค่า 0.65 มิลลิเมตร และ 0.69 มิลลิเมตรตามลำดับ

(ก) กระบวนการหล่อเดิม



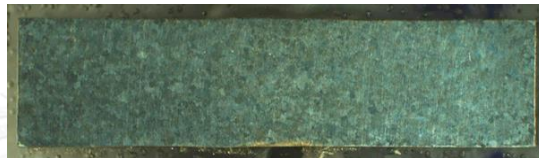
(ข) กระบวนการหล่อกึ่งแข็งที่มีการ
การกวนด้วยแก๊ส 10 วินาที



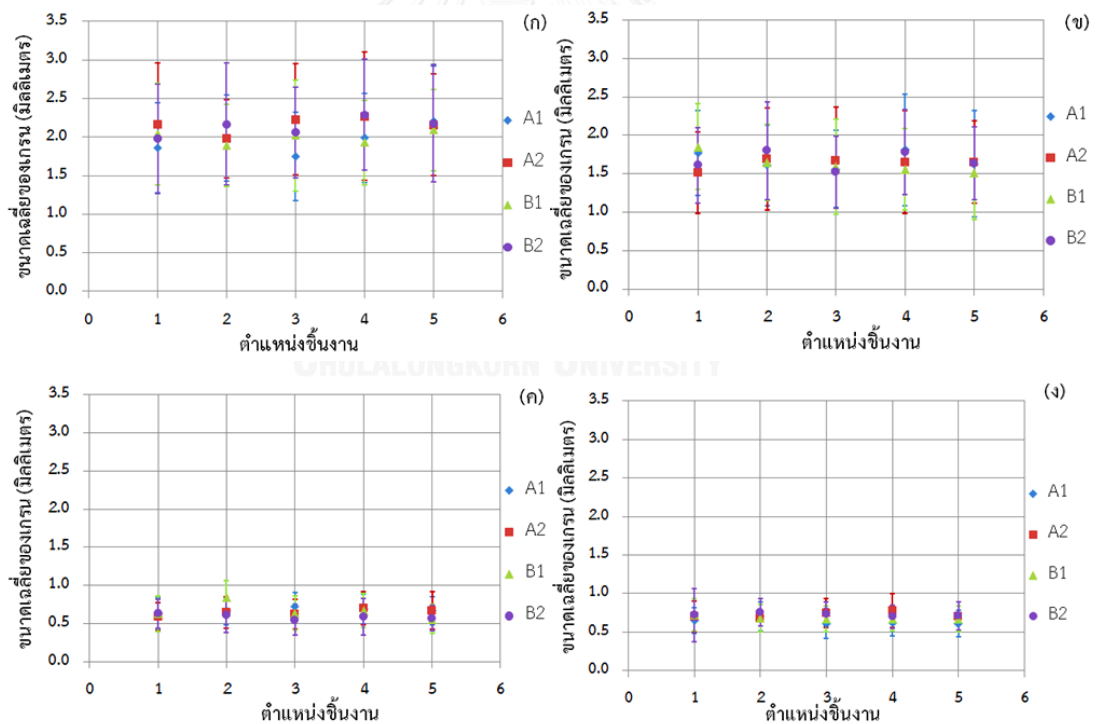
(ค) กระบวนการหล่อกึ่งแข็งที่มีการ
การกวนด้วยแก๊ส 15 วินาที



(ง) กระบวนการหล่อกึ่งแข็งที่มีการ
การกวนด้วยแก๊ส 20 วินาที



รูปที่ 47 แสดงโครงสร้างมหภาคของชิ้นงานที่ผ่านการหล่อกระบวนการต่างๆ

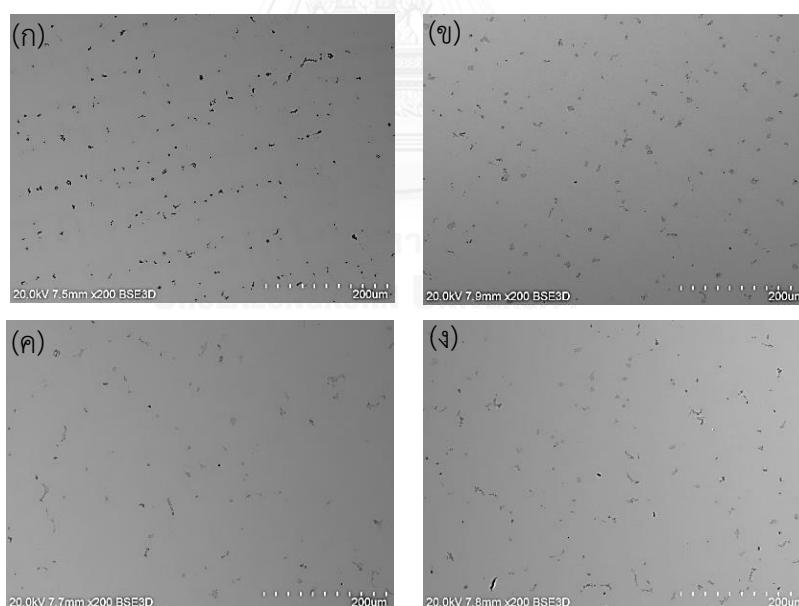


รูปที่ 48 แสดงขนาดเฉลี่ยของเกรนของชิ้นงานที่ผ่านการหล่อด้วยกระบวนการต่างๆ (ก) กระบวนการหล่อเดิม (ข) กระบวนการหล่อกึ่งแข็งที่มีการกวนด้วยแก๊ส 10 วินาที (ค) กระบวนการหล่อกึ่งแข็งที่มีการกวนด้วยแก๊ส 15 วินาที และ (ง) กระบวนการหล่อกึ่งแข็งที่มีการกวนด้วยแก๊ส 20 วินาที

ชิ้นงานที่ผ่านการหล่อกึ่งแข็งที่มีการกวนด้วยแก๊ส 20 วินาทีพบว่าจะมีค่าเฉลี่ยของขนาดของเกรนที่โตขึ้น คือ มีค่า 0.69 มิลลิเมตร ซึ่งมากกว่าค่าขนาดของเกรนเฉลี่ยชิ้นงานที่ผ่านการหล่อกึ่งแข็งที่มีการกวนด้วยแก๊ส 15 วินาที มีค่า 0.65 มิลลิเมตร การที่ขนาดเกรนมีค่าเฉลี่ยที่สูงขึ้นเกิดจากการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคของแข็ง และการโตต่อของอนุภาคของแข็ง (coarsening) สอดคล้องจากงานวิจัยของ Kareh และคณะ [31] ที่ทำการศึกษาโลหะกึ่งแข็งกึ่งเหลวของอลูมิเนียมผสมที่มีสัดส่วนของแข็ง 64-93 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อสัดส่วนของแข็งเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้เกิดการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคของแข็งในน้ำโลหะหลอมเหลว และส่งผลต่อรูปร่างของเกรนที่มีความกลม (sphericity) ลดน้อยลง

4.7.2 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

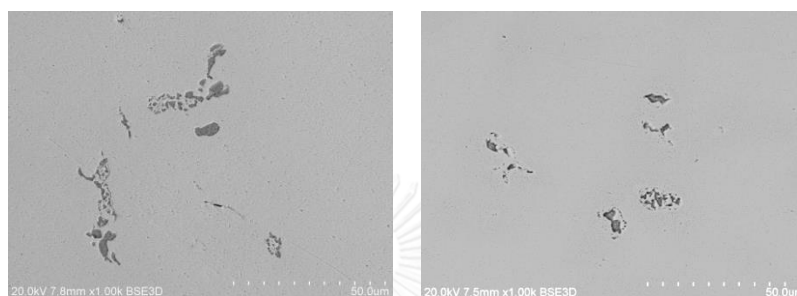
โครงสร้างจุลภาคของการหล่อแบบเดิมเมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่กำลังขยาย 200 เท่าดังรูปที่ 49(ก) ด้วยโหมด BSE (back scattered electron) แสดงโครงสร้างจุลภาคที่ผ่านกระบวนการหล่อเดิมจะเห็นได้ว่าโครงสร้างจุลภาคมีลักษณะเป็นเดนดริต และมีการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันตามแนวของช่องว่างระหว่างแขนเดนดริต และมีโครงสร้าง Eutectic (จุดสีดำ) ที่เกิดขึ้นจะเกิดตรงบริเวณระหว่างแขนเดนดริต (dendrite arm spacing) และมีการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันตามแนวของช่องว่างระหว่างแขนเดนดริต



รูปที่ 49 แสดงโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดโหมด BSE

- (ก) กระบวนการหล่อเดิม (ข) กระบวนการหล่อกึ่งแข็งที่มีการกวนด้วยแก๊ส 10 วินาที
(ค) กระบวนการหล่อกึ่งแข็งที่มีการกวนด้วยแก๊ส 15 วินาที (ง) กระบวนการหล่อกึ่งแข็งที่มีการกวนด้วยแก๊ส 20 วินาที

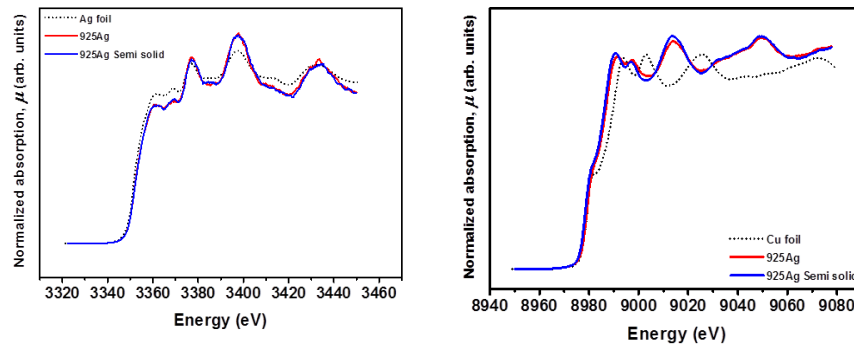
แต่เมื่อพิจารณาโครงสร้างของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อกึ่งแข็งที่ผ่านกระบวนการกวนด้วยแก๊สที่เวลาต่างๆ ดังรูปที่ 49(ข), 49(ค) และ 49(ง) พบว่าลักษณะการกระจายตัวของโครงสร้างยูเทคติกจะแตกต่างจากกระบวนการหล่อเดิม (กระจายตัวแบบสุ่ม) และมีปริมาณโครงสร้างยูเทคติกที่น้อยกว่า นอกจากนี้เมื่อพิจารณาลักษณะของโครงสร้างยูเทคติกของกระบวนการหล่อเดิมดังรูปที่ 50(ซ้าย) และกระบวนการหล่อกึ่งแข็ง (ขวา) พบว่าโครงสร้างยูเทคติกที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปโครงสร้างยูเทคติกที่ไม่สมบูรณ์ (Degenerated eutectic)



รูปที่ 50 แสดงโครงสร้างยูเทคติกของชิ้นงานที่หล่อด้วยกระบวนการเดิม (ซ้าย) และกระบวนการหล่อกึ่งแข็ง (ขวา) ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

4.7.3 การดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ (X-ray absorption near edge structure, XANES)

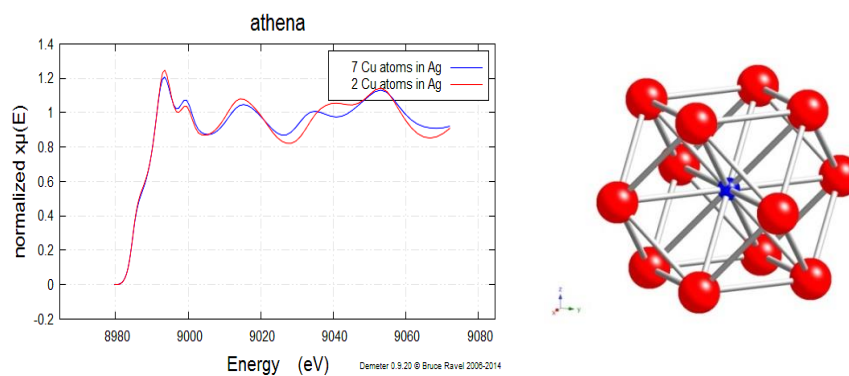
การดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ของธาตุเงินแสดงดังรูปที่ 51(ซ้าย) ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อเดิมเปรียบเทียบกับกระบวนการหล่อกึ่งแข็ง พบว่าลักษณะของกราฟนั้นมีรูปแบบที่เหมือนกันและพบว่าลักษณะของกราฟมีการเปลี่ยนแปลงคือ ในช่วงแรกของกราฟ (พีคที่ 3) กราฟของกระบวนการหล่อเดิมนั้นจะมีความสูงที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งหมายความว่ามีการเปลี่ยนแปลงในระดับอะตอมส่วนที่เป็นอะตอมรอบข้าง เช่นเดียวกับกับกราฟของการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ของธาตุทองแดงดังรูปที่ 51(ขวา) พบว่าลักษณะของกราฟของกระบวนการหล่อเดิมและกระบวนการหล่อกึ่งแข็งนั้นเหมือนกันแตกต่างกันที่ ความสูงของกราฟในพีคแรกซึ่งพบว่ากระบวนการหล่อกึ่งแข็งนั้นมีพีคที่สูงกว่า



รูปที่ 51 แสดงการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ของธาตุเงิน (ซ้าย) และการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ของธาตุทองแดง (ขวา)

เพื่อที่จะหาคำตอบถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในระดับอะตอม จึงมีการตั้งสมมติฐานว่า ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อกึ่งแข็งนั้นจะมีปริมาณของทองแดงเข้าไปแทนที่อะตอมของเงินในโครงสร้าง FCC มากกว่ากระบวนการหล่อเดิม เนื่องจากการกวนด้วยแก๊สนั้นจะเป็นการแลกเปลี่ยนความร้อนอย่างรวดเร็วในน้ำโลหะหลอมเหลวส่งผลทำให้การแพร่ออกของธาตุทองแดงออกจากโครงสร้างยากขึ้น

วิธีที่จะพิสูจน์สมมติฐานข้างต้นทำได้โดยการคำนวณหาลักษณะกราฟการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ของโครงสร้างสมมติที่ตั้งแสดงดังรูปที่ 52(ขวา) ที่มีธาตุทองแดง (สีน้ำเงิน) ไปแทนที่อะตอมของธาตุเงิน 1 ตำแหน่ง และมีอะตอมของธาตุเงินล้อมรอบ 12 อะตอม จากการคำนวณพบว่าเมื่อมีการเติมอะตอมของธาตุทองแดงลงไปแทนที่อะตอมเงินจะส่งผลทำให้พีคของกราฟในช่วงแรกลดลง ซึ่งสอดคล้องกับสมมติฐานข้างต้นที่กระบวนการหล่อกึ่งแข็งนั้นจะทำให้ธาตุทองแดงแทนที่ธาตุเงินในโครงสร้างมากกว่ากระบวนการหล่อเดิม

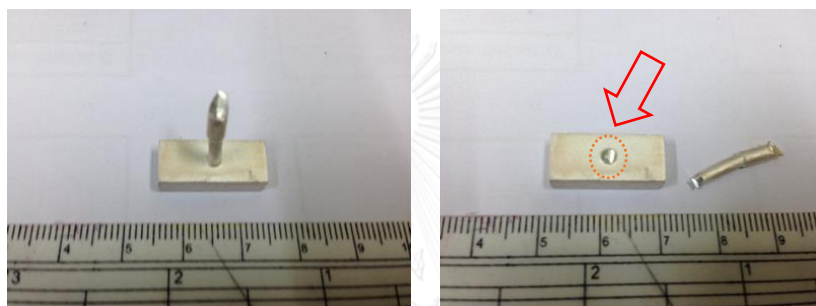


รูปที่ 52 แสดงการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ของธาตุทองแดงที่ได้จากการคำนวณ (ซ้าย) และอะตอมของธาตุทองแดงที่แทนที่ตำแหน่งของธาตุเงินในโครงสร้าง FCC (ขวา)

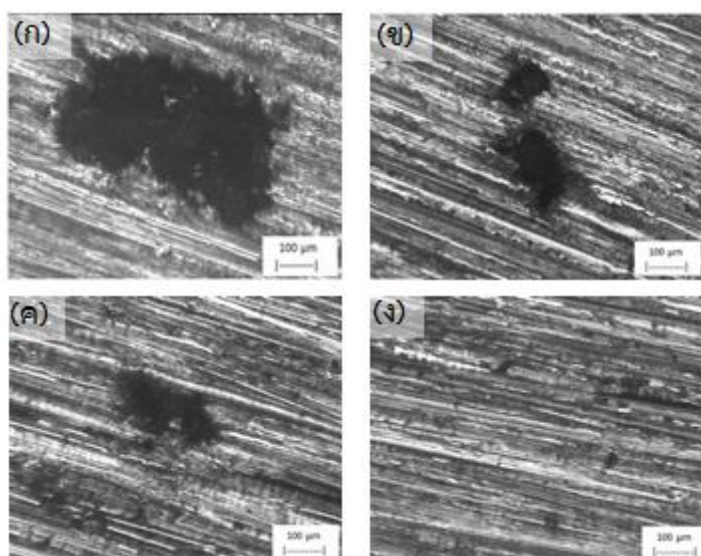
4.8 การศึกษาการหดตัวของน้ำโลหะ

4.8.1 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope)

เตรียมชิ้นงานโดยการตัดชิ้นงานแต่ละชิ้นออกมาจากต้นโลหะผสมเงินที่ผ่านการหล่อชิ้นงานมาด้วยกรรมวิธีต่างๆ จากนั้นนำชิ้นงานด้านที่ติดกับทางไหลเข้าของน้ำโลหะ (gating) ดังรูปที่ 53 มาตัดทางไหลเข้าออกแล้วนำไปขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 80 ให้เรียบเพียงเบอร์เดียว เพราะการขัดกระดาษทรายเบอร์อื่นๆจะเป็นการทำให้พื้นผิวสึกกร่อนไปเรื่อยๆจนสุดท้ายบริเวณของรูพรุนที่ปรากฏก็จะหายไป เมื่อขัดผิวของชิ้นงานไปจนได้ระนาบก็จะสังเกตเห็นรูพรุนที่เกิดจากการหดตัวของน้ำโลหะ จากนั้นนำชิ้นงานไปถ่ายภาพด้วยกล้องขยาย 50 เท่าในบริเวณที่เกิดรูพรุนจากการหดตัว



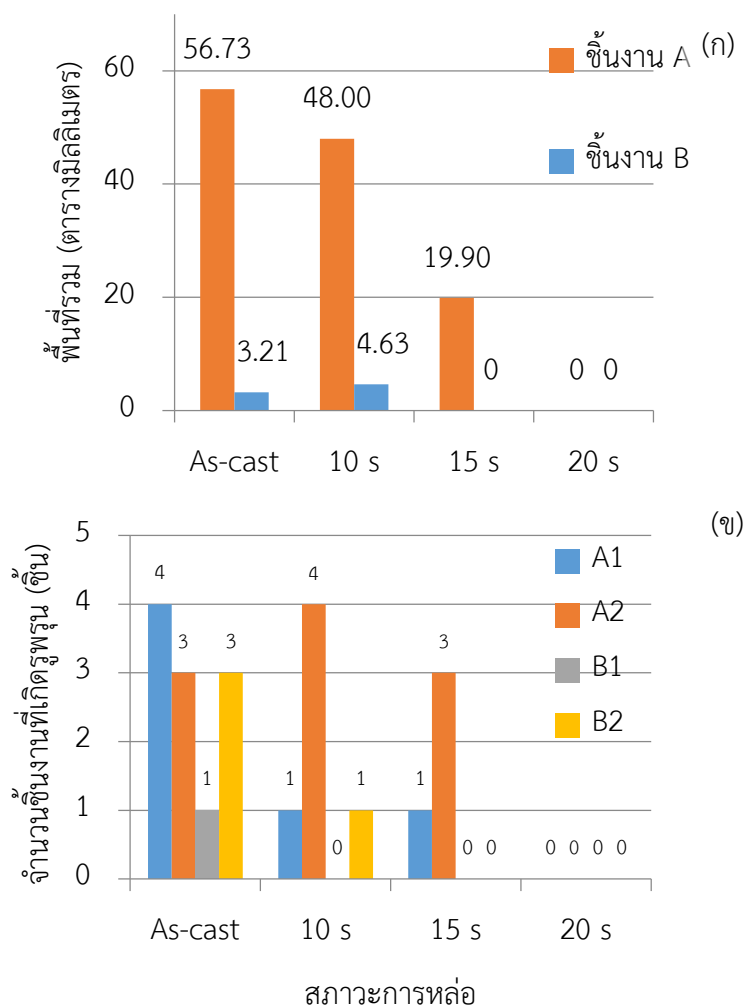
รูปที่ 53 แสดงบริเวณที่เกิดรูพรุนจากการหดตัวของโลหะหลอมเหลว



รูปที่ 54 แสดงรูพรุนที่เกิดจากการหดตัวของน้ำโลหะ (ก) กระบวนการหล่อเดิม (ข) การหล่อกึ่งแข็ง 10 วินาที (ค) การหล่อกึ่งแข็ง 15 วินาที (ง) การหล่อกึ่งแข็ง 20 วินาที

จากรูปที่ 54 แสดงชิ้นงานตัวอย่างจากชิ้นงานทั้งหมด ซึ่งเป็นชิ้นงานที่เกิดการหดตัวของน้ำโลหะที่ผ่านกระบวนการหล่อเดิมและกระบวนการหล่อกึ่งแข็ง พบว่ากระบวนการหล่อกึ่งแข็งนั้น

สามารถลดรูพรุนที่เกิดจากการหดตัวของน้ำโลหะได้ เนื่องจากอนุภาคของแข็งที่เกิดขึ้นในน้ำโลหะหลอมเหลวนั้นจะทำให้การเปลี่ยนแปลงของปริมาตรที่เกิดจากการเย็นตัวของน้ำโลหะหลอมเหลวลดน้อยลง เมื่อเปรียบเทียบลักษณะของชิ้นงานก็จะพบว่าชิ้นงาน A (ที่มีขนาดใหญ่กว่า) จะเกิดรูพรุนที่เกิดจากการหดตัวมากกว่าชิ้นงาน B ที่มีขนาดเล็กกว่า ดังแสดงในรูปที่ 55

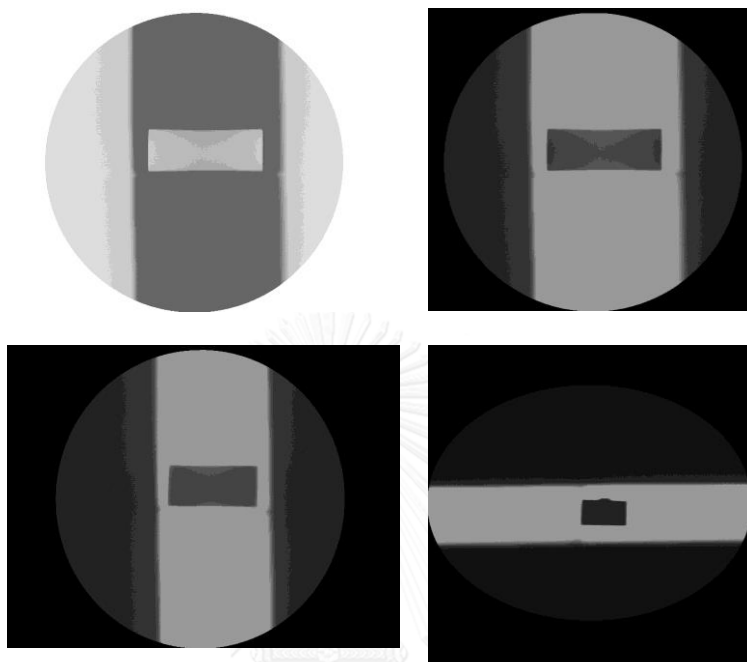


รูปที่ 55 (ก) แสดงพื้นที่รวมของรูพรุนที่เกิดจากการหดตัวของน้ำโลหะ และ (ข) จำนวนชิ้นงานรวมที่เกิดรูพรุนจากการหดตัวของน้ำโลหะหลอมเหลวของชิ้นงานทั้งหมด

4.8.2 ภาพถ่ายจากรังสีเอ็กซ์

เพื่อที่จะศึกษารูพรุนที่เกิดจากการหดตัวของน้ำโลหะในส่วนของความลึก การศึกษารูพรุนภายในชิ้นงานด้วยการถ่ายภาพรังสีเอ็กซ์ (X-Ray) ไปยังชิ้นงาน โดยให้พลังงานของเครื่องกำเนิดพลังงานสูงที่สุดอยู่ที่ 110 kV จะได้ภาพถ่ายชิ้นงานที่เกิดขึ้นนั้นแสดงในรูปที่ 56 พบว่าลักษณะของเงาของชิ้นงานไม่เปลี่ยนแปลง ทั้งนี้อาศัยการหมุนชิ้นงานไปในทิศทางต่างๆ ไม่ว่าจะป็นด้านข้าง

ด้านบน ด้านล่าง ซึ่งเกิดจากรังสีเอ็กซ์ไม่สามารถแทรกผ่านโลหะผสมเงินได้ เนื่องจากโลหะเงินนั้นมีความหนาแน่น (Density) ที่สูง และมีความสามารถในการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ จึงทำให้รังสีเอ็กซ์ไม่สามารถส่องผ่านได้ลักษณะของเงาของภาพที่เกิดขึ้นจึงไม่เปลี่ยนแปลง



รูปที่ 56 แสดงภาพถ่ายโดยใช้รังสีเอ็กซ์จากเครื่องที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC)

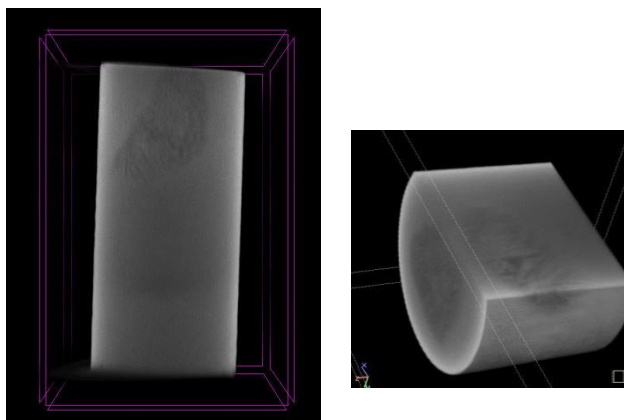
4.8.3 ภาพถ่ายจากรังสีเอ็กซ์ในรูปแบบสามมิติ (Computed tomography)

1. เครื่องถ่ายภาพจากรังสีเอ็กซ์รุ่น Sky-scan ของศูนย์เทคโนโลยีทางทันตกรรมขั้นสูง (ADTEC)



รูปที่ 57 แสดงการถ่ายภาพด้วยรังสีเอ็กซ์ด้วยเครื่อง Sky-Scan

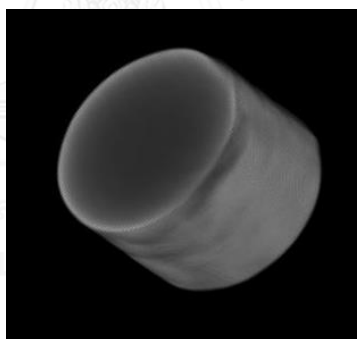
การเตรียมชิ้นงานทำได้โดยการตัดชิ้นงานบริเวณที่เกิดรูพรุนของการหดตัวด้วยให้มีรูปร่างเป็นทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 2 มิลลิเมตรยาว 5 มิลลิเมตร ใช้พลังงาน 70 kV ความละเอียดของภาพที่ถ่ายอยู่ที่ 6 ไมโครเมตร



รูปที่ 58 แสดงผลการทดลองจากเครื่อง Sky-Scan

จากรูปที่ 58 พบว่าไม่ปรากฏให้เห็นรูพรุนที่เกิดจากการหดตัวของชิ้นงาน เนื่องจากรังสีเอ็กซ์ไม่สามารถที่จะทะลุทะลวงไปยังบริเวณกึ่งกลางของชิ้นงานได้อันเนื่องมาจากความหนาแน่นของโลหะเงินผสมที่มีค่าสูง

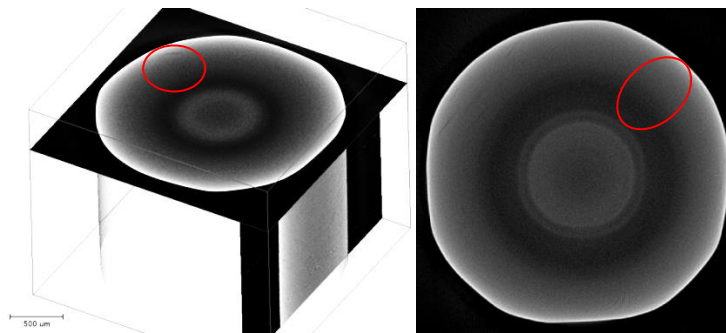
เพื่อทำการทดลองต่อในเครื่อง Sky-Scan จึงได้ไปเตรียมชิ้นงานใหม่ที่มีขนาดเล็กลงจากเดิมเพื่อร่นระยะในการทะลุทะลวงของรังสีเอ็กซ์ โดยเตรียมชิ้นงานให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 1.7 มิลลิเมตร ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 59 ซึ่งรังสีเอ็กซ์ ก็ยังไม่สามารถทะลุทะลวงไปได้



รูปที่ 59 แสดงผลการทดลองจากเครื่อง Sky-Scan ของชิ้นงานที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 1.7 มิลลิเมตร

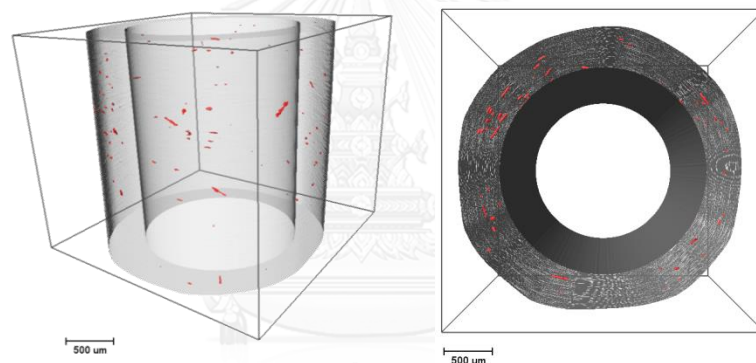
2. เครื่อง CT-Scan ของ MXIF (Manchester X-ray Imaging Facility)

การทดสอบวัดค่ารูพรุนด้วยการถ่ายภาพจากรังสีเอ็กซ์ในรูปแบบสามมิติ ด้วยเครื่องนี้จะเป็นเครื่องที่มีกำลังของเครื่องกำเนิดรังสีเอ็กซ์ ที่มีพลังงานที่สูงคือใช้พลังงานที่ 80 kV และมีความละเอียดของภาพอยู่ที่ 2.63 ไมโครเมตร ผลการทดลองการถ่ายภาพจะได้ภาพสามมิติออกมาดังรูปที่ 60 จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าจะมีบริเวณที่แสดงความหนาแน่นที่แตกต่างอย่างเห็นได้ชัด (ในวงกลมสีแดง) มีลักษณะเป็นเส้นยาว แต่ไม่สามารถมองเห็นรูพรุนที่เกิดจากการหดตัวของน้ำโลหะซึ่งควรจะมองเห็นบริเวณตรงกลางของชิ้นงานทรงกระบอกนี้



รูปที่ 60 แสดงผลการทดลองจากเครื่อง MXIF ของชิ้นงานที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 2 มิลลิเมตร

เมื่อนำผลการทดลองที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ต่อโดยตัดพื้นที่บริเวณตรงกลางของชิ้นงานออก แสดงเฉพาะพื้นที่ที่รังสีเอ็กซ์สามารถผ่านเข้าไปได้เพื่อวิเคราะห์ต่อได้ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 61 จะเห็นได้ว่าจะมีบริเวณที่มีลักษณะความหนาแน่นที่น้อยกว่าชิ้นงาน แสดงเป็นเส้นสีแดงกระจายอยู่ทั่วไปในชิ้นงาน แสดงเป็นรูพรุนขนาดเล็กๆที่เกิดขึ้นจากการหล่อชิ้นงาน (micro porosity)



รูปที่ 61 แสดงผลการทดลองจากเครื่อง MXIF ส่วนของการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ

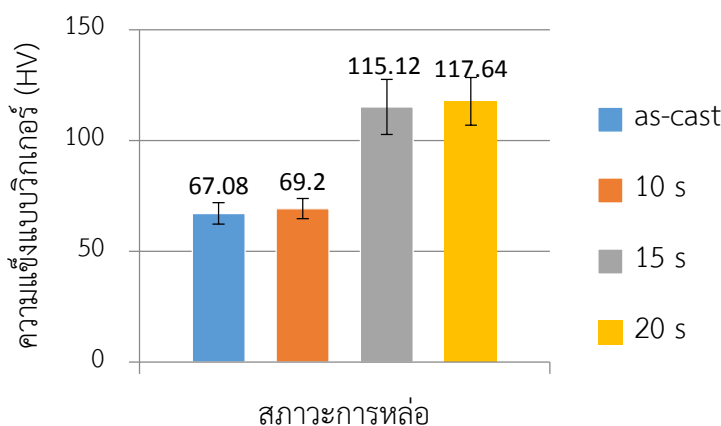
แม้เทคโนโลยีของการถ่ายภาพด้วยรังสีเอ็กซ์ในปัจจุบันของวัสดุต่างๆจะมีความก้าวหน้ามากก็ตาม แต่ด้วยความหนาแน่นของโลหะเงินผสมที่มีค่าสูงนั้นส่งผลต่อการทะลุผ่านของรังสีเอ็กซ์ การวิเคราะห์รูพรุนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่เป็นโลหะเงินด้วยรังสีเอ็กซ์ จึงมีข้อจำกัดอย่างมาก วิธีที่ใช้การถ่ายภาพด้วยรังสีเอ็กซ์จึงไม่เหมาะสมกับการวิเคราะห์รูพรุนที่เกิดจากการหดตัวของน้ำโลหะของโลหะผสมเงิน

4.9 การทดสอบสมบัติทางกล

4.9.1 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์

การวัดค่าความแข็งของชิ้นงานจากกระบวนการหล่อด้วยกรรมวิธีหล่อแบบเดิมเปรียบเทียบกับกระบวนการหล่อกึ่งแข็ง โดยแต่ละสภาวะการทดลองนั้นจะทำการวัดค่าเฉลี่ยจากชิ้นงานทั้งหมด 20 ชิ้น วัดค่าความแข็งชิ้นละ 3 จุด แล้วนำค่าความแข็งของชิ้นงานแต่ละสภาวะการทดลองมาหาค่าเฉลี่ย ดังแสดงในรูปที่ 62 ชิ้นงานที่ผ่านการหล่อกึ่งแข็งที่มีการกวนด้วยแก๊สใช้เวลา 10 วินาทีนั้นมีค่าความแข็งที่ใกล้เคียงกับการหล่อแบบเดิมทั้งนี้ เป็นผลมาจากปริมาณสัดส่วนของแข็งที่เกิดขึ้นยังมีปริมาณที่น้อย ส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคยังไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง

การหล่อกึ่งแข็งที่มีการกวนด้วยแก๊สใช้เวลา 15 วินาที มีค่าเฉลี่ย 115.12 HV และ ที่การหล่อกึ่งแข็งที่มีการกวนด้วยแก๊สใช้เวลา 20 วินาที มีค่า 117.64 HV โดยความแข็งที่เพิ่มขึ้นนั้นเกิดจากโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไป



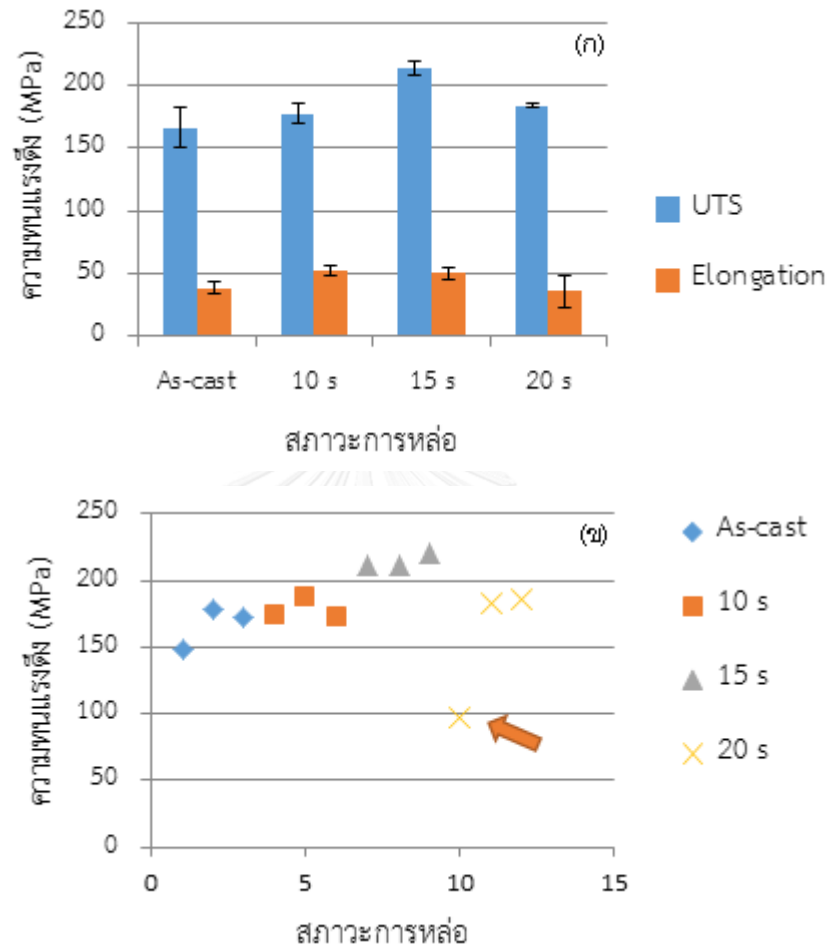
รูปที่ 62 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความแข็งแบบวิกเกอร์ที่สภาวะการหล่อต่างๆ

4.9.2 การทดสอบความทนแรงดึง

ผลการทดสอบความทนแรงดึงของชิ้นงานในแต่ละสภาวะการหล่อ พบว่าค่าเฉลี่ยความทนแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength) ของการหล่อด้วยวิธีเดิมมีค่าอยู่ที่ 166.66 MPa การหล่อด้วยกระบวนการหล่อกึ่งแข็งที่มีการกวนด้วยแก๊ส 10 วินาที มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 177.66 MPa แต่การหล่อด้วยกระบวนการกึ่งแข็งที่มีการกวนด้วยแก๊ส 15 วินาทีมีค่าสูงขึ้นไปถึง 214.33 MPa และมีค่าลดลงมาที่ 184.5 MPa เมื่อมีการเพิ่มเวลาในการกวนด้วยแก๊สเป็น 20 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 63 (ก)

จากรูปที่ 63 (ข) พบว่าค่าเชิงแรงดึงของชิ้นงานที่ผ่านการหล่อกึ่งแข็งที่มีการกวนด้วยแก๊สเป็นเวลา 20 วินาทีนั้น จะมีชิ้นงานอยู่ 1 ชิ้นที่มีค่าความแข็งแรงดึงที่ต่ำกว่าปกติ (แสดงดังลูกศร) ซึ่งอาจจะเกิดจากสาเหตุเรื่องของการไหลเข้าสู่แบบที่ไม่สม่ำเสมอเนื่องจากความหนืดในน้ำโลหะ

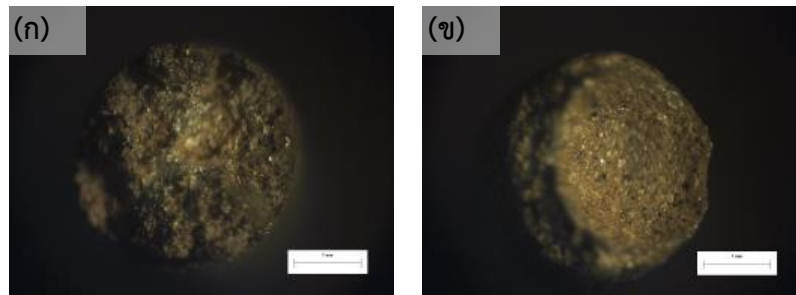
หลอมเหลวเพิ่มมากขึ้น หรือเกิดจากฟองอากาศที่ตกค้างขณะน้ำโลหะหลอมเหลวเข้าสู่แบบ เพื่อพิสูจน์สมมติฐานดังกล่าวจึงได้มีการทดลองเพิ่มเติมในส่วนการทดสอบความแข็งแรงดึงของชิ้นงานในจุดต่างๆ



รูปที่ 63 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความทนแรงดึงเฉลี่ย (ก) และ ค่าความทนแรงดึงของการหล่อสถานะต่างๆ (ข)

4.9.2.1 การศึกษารอยแตกของชิ้นงาน

ชิ้นงานทดสอบความแข็งแรงดึงที่มาจากกระบวนการหล่อกึ่งแข็งที่มีการกวนด้วยแก๊ส 20 วินาที นำชิ้นงานทดสอบที่มีค่าแข็งแรงดึงต่ำไปวิเคราะห์ลักษณะรอยแตกพบว่าเนื้อของโลหะที่เป็นลักษณะก่อนมาอุดตันอยู่ดังแสดงในรูปที่ 65(ข) และมีลักษณะรอยแตกเป็นแบบเปราะ น่าจะเป็นผลมาจากการการโตต่อของอนุภาคของแข็ง (coarsening) เมื่ออนุภาคของแข็งในน้ำโลหะหลอมเหลวมีปริมาณมากขึ้น ส่งผลต่อความหนืดของน้ำโลหะเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้การเติมเต็มแบบของน้ำโลหะหลอมเหลวแย่ลง

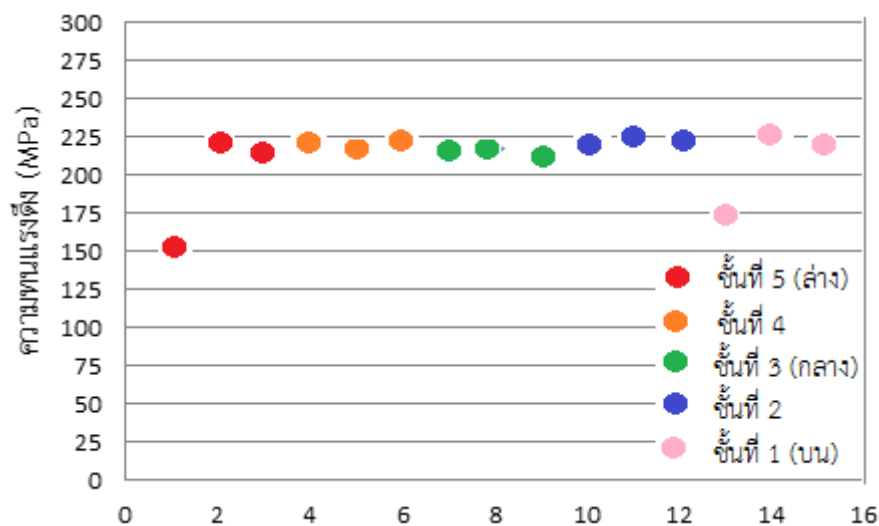


รูปที่ 64 แสดงรอยแตกของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบการทดสอบดึง

(ก) รอยแตกแบบเหนียว และ (ข) รอยแตกแบบเปราะ

4.9.2.2 การทดสอบความทนแรงดึงของชิ้นงานในจุดต่างๆ

จากผลการทดลองการวัดค่าความทนแรงดึง พบว่าเมื่อปริมาณของสัดส่วนของแข็งเพิ่มขึ้น กลับทำให้ค่าแรงดึงลดน้อยลง จึงมีสมมติฐานเพิ่มเติมในเรื่องของการไหลของน้ำโลหะเข้าสู่แบบ นั้นมีความสม่ำเสมอในแต่ละจุดหรือไม่ และอนุภาคของแข็งที่สัดส่วนของแข็งเพิ่มขึ้นนั้นจะส่งผลต่อการไหลหรือไม่ จึงได้มีทำการทดลองเพิ่มเติมโดยการหล่อชิ้นงานเพิ่มเติมด้วยกระบวนการหล่อกึ่งแข็ง ที่ใช้เวลาในการกวนด้วยแก๊ส 15 วินาที แต่ชิ้นงานที่ติดต้นเทียนจะเป็นชิ้นงานที่ใช้วัดค่าความทนแรงดึงทั้งหมด 5 ชั้น ชั้นละ 3 จุด ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 64 พบว่ามีชิ้นงาน 2 ชิ้นจาก 15 ชิ้นที่มีค่าแรงดึงอยู่ที่ 154 MPa และ 171 MPa น้อยกว่าชิ้นอื่นๆที่เกาะกลุ่มอยู่ในช่วง 215-223 MPa ซึ่งเป็นผลมาจากการกระจายสัดส่วนของแข็งที่ไม่สม่ำเสมอของน้ำโลหะกึ่งแข็งกึ่งเหลวขณะไหลเข้าสู่แบบ ส่งผลให้เกิดตำหนิ (defects) ในชิ้นงานที่นำไปทดสอบความทนแรงดึง



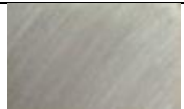

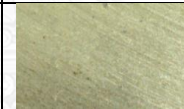







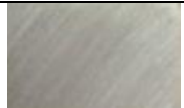

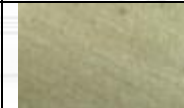
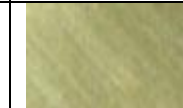






รูปที่ 65 แสดงผลการทดสอบการทนแรงดึงของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อกึ่งแข็งที่มีการกวนด้วยแก๊ส 15 วินาที

4.10 การทดสอบการต้านทานการหมอง

4.10.1 การทดลองในบรรยากาศไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S)

จากการทดสอบการต้านทานความหมองของชิ้นงานในบรรยากาศไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 0.4 โดยปริมาตร พบว่าแต่ละสภาวะการทดลองนั้นมีการเปลี่ยนแปลงของสีที่แตกต่างกัน ซึ่งเมื่อทำการพิจารณาเปรียบเทียบสีที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดก็จะพบว่าที่การทดลองในบรรยากาศไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นเวลา 4 ชั่วโมงความเข้มของสีของสภาวะที่หล่อกิ่งแข็งจะมีสีที่เข้มกว่ากระบวนการหล่อแบบเดิม

ตารางที่ 7 แสดงผลการทดสอบการต้านทานการหมองที่เวลาต่างๆ

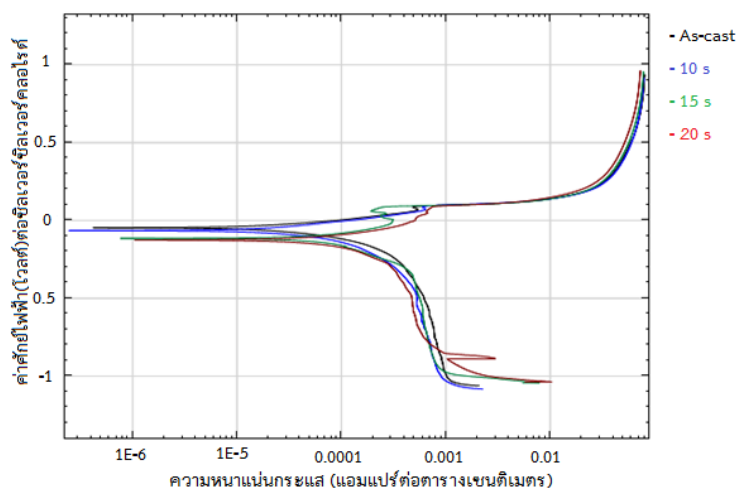
สภาวะการหล่อ	เวลา (ชั่วโมง)				
	0	1	2	3	4
As-cast					
10 s					
15 s					
20 s					

4.10.2 การทดลองวัดศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน

จากผลการศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของชิ้นงานโลหะเงินผสมที่ผ่านการหล่อด้วยกระบวนการหล่อเดิมและกระบวนการหล่อกิ่งแข็ง ที่เตรียมผิวชิ้นงานด้วยการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1200 ด้วยเครื่องโพเทนทีโอดนามิก (Potentiodynamic) ในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยมวล โดยแต่ละชิ้นงานจะทำการวัดค่าเฉลี่ยจากชิ้นงาน 3 ครั้ง ได้ผลการทดลองดังแสดงด้วยเส้นโค้งโพรวาโรเซชันดังแสดงในรูปที่ 66 จะเห็นได้ว่าชิ้นงานโลหะเงินผสมที่ผ่านการหล่อแบบเดิมกับชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อกิ่งแข็งจะมีความแตกต่างกัน

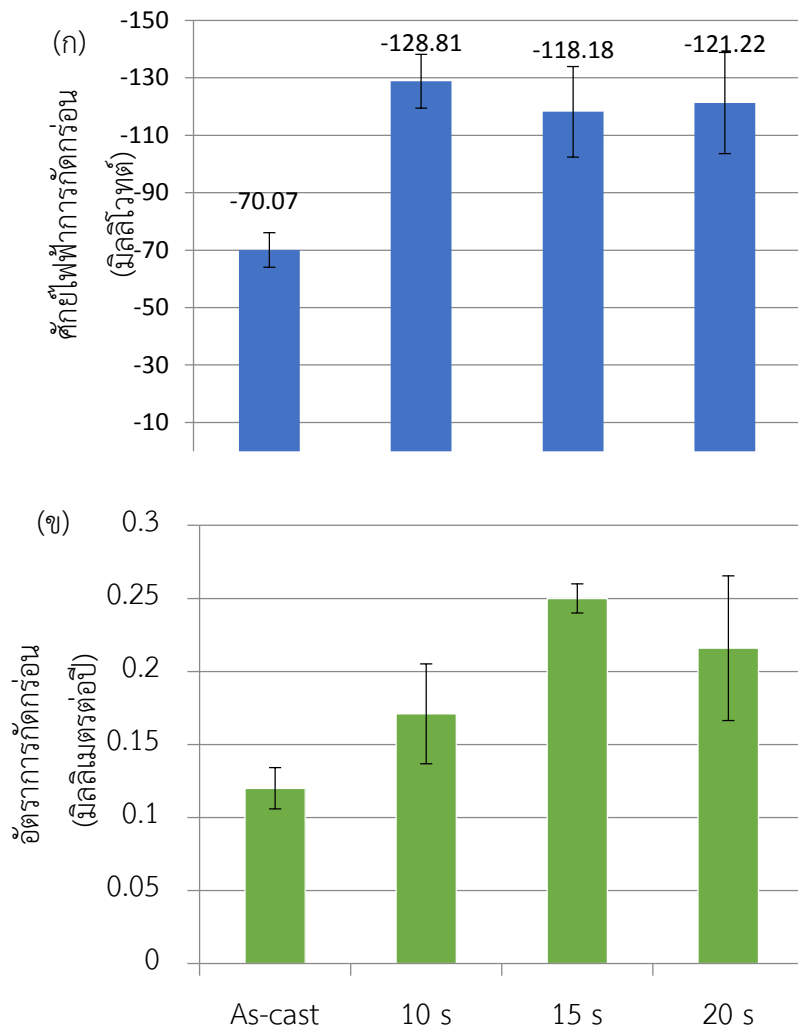
ศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion potential, E_{corr}) ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อเดิมมีค่าอยู่ที่ $-70.07 \mu\text{A}$ ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อกิ่งแข็งที่ใช้เวลาในการกวนด้วยแก๊สที่ 10

วินาที 15 วินาที และ 20 วินาที มีค่าอยู่ที่ -128.81 มิลลิโวลต์ -118.18 มิลลิโวลต์ และ -121.23 มิลลิโวลต์ ซึ่งบอกให้ทราบว่าชิ้นงานที่ผ่านการหล่อแบบเดิม (กราฟเส้นสีดำ) จะมีค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนที่สูงกว่าชิ้นงานอื่นๆ จึงสามารถบอกได้ว่าชิ้นงานที่ผ่านการหล่อด้วยกระบวนการเดิมนั้นสามารถทนการกัดกร่อนได้ดีกว่าชิ้นงานที่หล่อด้วยการหล่อแบบกึ่งแข็ง



รูปที่ 66 แสดงโค้งโพลาไรเซชันของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อต่างๆ

ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน (Corrosion current density, i_{corr}) ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อเดิมมีค่าอยู่ที่ 50.94 ไมโครแอมแปร์ ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อกึ่งแข็งที่ใช้เวลาในการกวนด้วยแก๊สที่ 10 วินาที 15 วินาที และ 20 วินาที มีค่าอยู่ที่ 73.62 ไมโครแอมแปร์ 108.29 ไมโครแอมแปร์ และ 118.57 ไมโครแอมแปร์ ตามลำดับ



รูปที่ 67 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าการกักความร้อน (ก) และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกักความร้อน (ข)

เมื่อพิจารณาอัตราการกักความร้อนดังรูปที่ 67(ข) พบว่าชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อกึ่งแข็ง นั้นจะมีค่าที่สูงกว่ากระบวนการหล่อเดิม นั่นหมายความว่าชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อกึ่งแข็งนั้น จะมีความต้านทานการกักความร้อนที่น้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกว่ากระบวนการหล่อเดิม ซึ่งเป็นผลมาจาก ขนาดของเกรนของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อกึ่งแข็งนั้นมีขนาดเล็กกว่าและละเอียดกว่า โดย ขนาดของเกรนที่เล็ก ละเอียดนั้นจะเป็นจุดรวมของอิเล็กตรอนส่งผลทำให้มีการนำไฟฟ้าที่ดีกว่า ความต้านทานการกักความร้อนของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อกึ่งแข็งจึงแย่ลงกว่าเดิม

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

การผลิตชิ้นงานเครื่องประดับเงินในอุตสาหกรรมนั้น สิ่งที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ คือ ปัญหาการพองจากการหดตัวของน้ำโลหะ ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของน้ำโลหะหลอมเหลว งานวิจัยนี้สามารถช่วยลดปัญหาดังกล่าวข้างต้นได้ นอกจากนี้ยังทำให้ชิ้นงานมีสมบัติทางกลที่ดีขึ้น งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนากระบวนการผลิตเครื่องประดับจากโลหะเงินที่ใช้วิธีการแบบเดิมในอุตสาหกรรมด้วยการหล่อกึ่งแข็ง ซึ่งสามารถต่อยอดเข้าไปสู่ภาคอุตสาหกรรมและนำไปใช้งานจริงได้ โดยจะสรุปผลการทดลองในส่วนต่างๆดังต่อไปนี้

5.1 สัณฐานวิทยา (Morphology)

โครงสร้างจุลภาคที่เปลี่ยนไปจากเดิมทั้งในระดับมหภาค คือ ขนาดของเกรนของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อกึ่งแข็งจะมีขนาดของเกรนที่เล็กกว่ากระบวนการหล่อเดิม การเปลี่ยนแปลงในระดับโครงสร้างจุลภาค คือ การเรียงตัวของโครงสร้างยูเทคติกที่เปลี่ยนไป รูปร่างที่เปลี่ยนไปของโครงสร้างยูเทคติก และสุดท้ายการเปลี่ยนแปลงในระดับอะตอม คือ กระบวนการหล่อกึ่งแข็งนั้นจะมีอะตอมของธาตุทองแดงเข้าไปแทนที่อะตอมของธาตุเงินในโครงสร้าง FCC มากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการหล่อเดิม ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของสัณฐานวิทยาข้างต้นนี้จะส่งผลโดยตรงสมบัติต่างๆของชิ้นงาน

5.2 รูพรุนที่เกิดจากการหดตัวของน้ำโลหะ (Shrinkage Porosity)

ชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่จะมีรูพรุนที่เกิดจากการหดตัวมากกว่าชิ้นงานขนาดเล็ก เมื่อเปรียบเทียบปริมาณและพื้นที่ของรูพรุนที่เกิดจากการหดตัวของน้ำโลหะหลอมเหลว พบว่ากระบวนการหล่อกึ่งแข็งนั้นเมื่อเพิ่มเวลาในการกวนด้วยแก๊สก็สามารถลดจำนวนของชิ้นงานที่เกิดรูพรุนที่เกิดจากการหดตัวของน้ำโลหะหลอมเหลวได้ หากเทียบกับกระบวนการหล่อแบบเดิมและการวิเคราะห์รูพรุนที่เกิดจากการหดตัวของน้ำโลหะด้วยการใช้รังสีเอ็กซ์นั้นไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์เนื่องจากความหนาแน่นที่สูงของโลหะผสมเงิน

5.3 ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test)

จากการนำค่าความแข็งของชิ้นงานแต่ละสภาวะการทดลองมาหาค่าเฉลี่ย ได้ผลการทดลองดังแสดงจะเห็นได้ว่ากระบวนการหล่อที่เป็นการหล่อแบบกึ่งแข็งนั้นจะทำให้ชิ้นงานมีค่าความแข็งที่สูงขึ้นเกือบ 2 เท่าหากเทียบกับกระบวนการหล่อชิ้นงานแบบเดิม

5.4 สมบัติทางกลความทนแรงดึง (Tensile Test)

ผลการทดลองวัดสมบัติทางกลด้วยการดึงของชิ้นงานแต่ละการทดลอง พบว่าค่าเฉลี่ยความทนแรงดึงที่จุดคราก (Yield Stress) ของการหล่อด้วยวิธีเดิมมีค่าอยู่ที่ 166.66 MPa แต่การหล่อด้วยกระบวนการกึ่งแข็งที่มีการกวนด้วยแก๊ส 15 วินาทีมีค่าสูงขึ้นไปถึง 214.33 MPa ส่วนชิ้นงานที่ผ่านการหล่อกึ่งแข็งที่มีการกวนด้วยแก๊ส 20 วินาที จะมีค่าความทนแรงดึงเฉลี่ยที่ลดลงเนื่องจากเกิดตำหนิ (defect) ภายในชิ้นงานทดสอบ ที่เป็นผลมาจากการความหนืดของน้ำโลหะกึ่งแข็งที่เพิ่มมากขึ้น เพื่อที่จะได้ผลการทดสอบความทนแรงดึงของระบบที่มีการกวนด้วยแก๊สควรจะออกแบบชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบใหม่ ในเรื่องของการออกแบบทางไหลเข้าของน้ำโลหะเข้าสู่แบบ

5.5 การทดสอบการต้านทานการหมอง (Tarnish Test)

จากการทดลองวัดค่าการกัดกร่อนด้วยการวางชิ้นงานในบรรยากาศแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ พบว่า สีของชิ้นงานที่เปลี่ยนไปนั้นไม่สามารถบอกหรือเปรียบเทียบได้ว่าชิ้นงานในการทดลองที่สถานะต่าง ๆ นั้นดีหรือแย่งอย่างไร ดังนั้นการทดสอบวัดค่าการกัดกร่อนที่สามารถบอกค่าได้ดีกว่าคือการทดลองด้วยวิธีการวัดศักย์ไฟฟ้าจากการกัดกร่อนจึงเป็นวิธีการทดสอบที่ดีกว่าซึ่งสามารถบอกได้ว่าชิ้นงานที่ผ่านการหล่อแบบกึ่งแข็งนั้นจะมีอัตราการต้านทานการกัดกร่อนที่ลดลงกว่าการหล่อชิ้นงานด้วยกระบวนการเดิม

5.6 ประโยชน์ที่ได้รับ

เมื่อพัฒนากระบวนการผลิตเครื่องประดับเงินจากเทคนิคการหล่อชิ้นงานแบบเดิมเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อกึ่งแข็ง พบว่าสามารถช่วยลดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของน้ำโลหะหลอมเหลวให้น้อยลง ส่งผลให้ลดปัญหาการพองที่ที่เกิดจากการหดตัวของน้ำโลหะ นอกจากนี้กระบวนการหล่อกึ่งแข็งนั้นทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสัณฐานวิทยาส่งผลให้สมบัติทางกลของชิ้นงานดีขึ้น แต่ทำให้สมบัติการต้านทานการกัดกร่อนลดลง ข้อดีอีกอย่างของกระบวนการหล่อกึ่งแข็งคือ อุณหภูมิของน้ำโลหะที่ไหลเข้าสู่แบบน้อยลง ซึ่งอุณหภูมิที่ลดลงจะทำให้การเกิดปฏิกิริยาระหว่างน้ำโลหะหลอมเหลวกับแบบปูนพลาสเตอร์ลดลง ซึ่งจะมีประโยชน์ในเพิ่มขึ้นในกระบวนการรีไซเคิล

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนากระบวนการผลิตเครื่องประดับเงินโดยเป็นการพัฒนาจากกระบวนการผลิตเดิม หากมีการนำไปพัฒนาต่อยอดหรือใช้งานจริงในภาคอุตสาหกรรมก็จะมีประโยชน์เป็นอย่างมาก

รายการอ้างอิง

- [1] กรมศุลกากร. (2013). *Thailand Economy at a glance*. Available: <http://www2.ops3.moc.go.th/>
- [2] K. Bangyikhan, and YosraweeMeemongkol. (2010). *THAILAND METAL STATISTICS YEAR 2009*.
- [3] (2012). *Silver standards of the world*. Available: http://www.925-1000.com/a_Standards.html
- [4] J. Wannasin, *et al.*, "Grain refinement of an aluminum alloy by introducing gas bubbles during solidification," *Scripta Materialia*, vol. 55, pp. 115-118, 2006.
- [5] M. C. Flemings, "Behavior of Metal Alloys in the Semisolid State.," *The 1990 Edward Campell Memorial Lecture Metallurgical Transactions B*, pp. 1991-2269, 1991.
- [6] M. C. Fleming, "Behavior of metal alloys in the semisolid state [J]," *Metallurgical Transactions B* vol. 22B, pp. 269-293, 1991.
- [7] L.-n. Guan, *et al.*, "Effects of stirring parameters on microstructure and tensile properties of (ABOw+SiCp)/6061Al composites fabricated by semi-solid stirring technique," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 21, Supplement 2, pp. s274-s279, 2011.
- [8] R. Haghayeghi, *et al.*, "An investigation on semi-solid Al-7Si-0.3Mg alloy produced by mechanical stirring," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 169, pp. 382-387, 2005.
- [9] X. H. Qin, *et al.*, "Nanometer, submicron and micron sized aluminum powder prepared by semi-solid mechanical stirring method with addition of ceramic particles," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 385, pp. 31-37, 2004.
- [10] Y.-l. Bai, *et al.*, "Annulus electromagnetic stirring for preparing semisolid A357 aluminum alloy slurry," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 19, pp. 1104-1109, 2009.

- [11] Z. Liu, *et al.*, "Research on semi-solid slurry of a hypoeutectic Al-Si alloy prepared by low superheat pouring and weak electromagnetic stirring," *Rare Metals*, vol. 25, pp. 177-183, 2006.
- [12] Z. Liu, *et al.*, "Effect of grain refining on primary α phase in semi-solid A356 alloy prepared by low superheat pouring and slight electromagnetic stirring," *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, vol. 21, pp. 57-64, 2008.
- [13] Z.-d. Zhao, *et al.*, "Preparation of semisolid AlSi7Mg alloy slurry through weak traveling-wave electromagnetic stirring," *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, vol. 16, pp. 554-558, 2009.
- [14] S. Lü, *et al.*, "The indirect ultrasonic vibration process for rheo-squeeze casting of A356 aluminum alloy," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 212, pp. 1281-1287, 2012.
- [15] S. Lü, *et al.*, "Preparation and rheocasting of semisolid slurry of 5083 Al alloy with indirect ultrasonic vibration process," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 528, pp. 8635-8640, 2011.
- [16] S. Wu, *et al.*, "Microstructure and property of rheocasting aluminum-alloy made with indirect ultrasonic vibration process," *Materials Letters*, vol. 73, pp. 150-153, 2012.
- [17] R. Burapa, *et al.*, "Effects of primary phase morphology on mechanical properties of Al-Si-Mg-Fe alloy in semi-solid slurry casting process," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 20, Supplement 3, pp. s857-s861, 2010.
- [18] R. I. Nigmatulin and N. S. Khabeev, "Heat exchange between a gas bubble and a liquid," *Fluid Dynamics*, vol. 9, pp. 759-764, 1974/09/01 1974.
- [19] D. B. Spencer, Ph.D., Massachusetts Institute of Technology, 1971.
- [20] N. J. Petch, "The Cleavage Strength of Polycrystals," *Journal of the Iron and Steel Institute*, vol. 25, p. 174, 1953.
- [21] R. Wiesinger. (2009). *Development and application of surface sensitive methods for the in-situ investigation of atmospheric corrosion processes on*

non-transparent materials. Available:

http://www.fch.akbild.ac.at/Forschung2010/Metal_Corrosion3.html

- [22] N. B. K.D. Ralston, C.H.J. Davies, "Revealing the relationship between grain size and corrosion rate of metals," *Scripta Materialia*, vol. 63, pp. 1201-1204, 2010.
- [23] K. E. E. D.A. Porter, *Phase Transformations in Metals and Alloys*. 2-6 Boundary Row, London SE1 SHK, UK: Chapman & Hall, 1992.
- [24] A. Einstein, "Eine neue bestimmung der molekül dimensionen," *Ann. Physik*, vol. 19, pp. 289-306, 1906.
- [25] R. Canyook, *et al.*, "Characterization of the microstructure evolution of a semi-solid metal slurry during the early stages," *Acta Materialia*, vol. 60, pp. 3501-3510, 2012.
- [26] S. M. Liang, *et al.*, "Thermal analysis and solidification pathways of Mg–Al–Ca system alloys," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 480, pp. 365-372, 2008.
- [27] S. Zabler, *et al.*, "Particle and liquid motion in semi-solid aluminium alloys: A quantitative in situ microradiography study," *Acta Materialia*, vol. 61, pp. 1244-1253, 2013.
- [28] S. Woedtke, "Ph.D. thesis," Ph.D. thesis, Inst. f. Exp. u. Ang. Phys, CAU, 2002.
- [29] G. P. a. G. Effenberg, *Ternary Alloys* vol. 1. Weinheim, Germany: VCH Verlagsgesellschaft, 1988.
- [30] J. Campbell, "Ten Rules for Good Casting," *Modern Castings*, vol. 4, pp. 36-39, 1997.
- [31] K. M. Kareh, *et al.*, "Revealing the micromechanisms behind semi-solid metal deformation with time-resolved X-ray tomography," *Nat Commun*, vol. 5, 2014.

ภาคผนวก

1.ผลการทดลองการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยเครื่อง ICP

Sequence No. 1

Analyst: Sterling

silver

Sample ID: re-blank

Date collected 6/9/2556

Mean data : re-blank

Analysis	Intensity	Std.Dev.	RSD %
Mg 285.213	-217.4	36.08	16.60
Mn 257.610	80.9	13.67	16.90
Fe 238.204	224.5	4.57	2.03
Ni 231.604	9.9	14.31	144.87
Cu 327.393	806.1	89.34	11.08
Zn 296.200	97.4	12.96	13.30
Al 396.153	1334.3	104.28	7.82
Si 251.611	974.7	17.55	1.80
Sn 189.927	-8.1	15.31	187.97
Pb 220.353	-113.1	15.95	14.09
In 230.606	-65.5	11.28	17.22
Pd 340.458	-314.0	39.01	12.42
Pt 265.945	-294.7	25.04	8.49

Sequence No. 2

Analyst: Sterling silver

Sample ID: re-blank

Date collected 6/9/2556

.....

Mean data : re-blank

Analysis	Intensity	Std.Dev.	RSD %
Mg 285.213	1205.6	38.65	3.21
Mn 257.610	-345.0	10.11	2.93
Fe 238.204	624.2	76.21	12.21
Ni 231.604	113.5	64.16	56.54
Cu 327.393	25095394.6	222573.04	0.89
Zn 296.200	1996334.1	40405.17	2.02
Al 396.153	1981.3	122.37	6.18
Si 251.611	1494.7	27.93	1.87
Sn 189.927	18765.8	476.22	2.54
Pb 220.353	434.4	13.53	3.11
In 230.606	-150.9	45.97	30.47
Pd 340.458	2044.3	92.90	4.54
Pt 265.945	-312.5	59.68	19.10

Sequence No. 3

Analyst:

Sterling silver

Sample ID: re-blank

Date collected 6/9/25

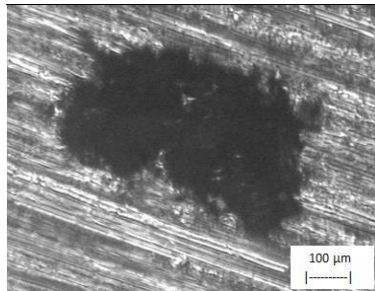
.....
Mean data : re-blank

Analysis	Intensity	Std.Dev.	RSD %
Mg 285.213	1061.0	28.85	2.72
Mn 257.610	-299.0	54.97	18.38
Fe 238.204	612.7	41.12	6.71
Ni 231.604	142.7	60.88	42.65
Cu 327.393	22599284.3	186639.48	0.83
Zn 296.200	1798532.5	20916.21	1.16
Al 396.153	2574.5	114.30	4.44
Si 251.611	2007.6	61.77	3.08
Sn 189.927	16504.71	211.07	1.28
Pb 220.353	407.5	27.22	6.68
In 230.606	-104.9	50.16	47.84
Pd 340.458	2022.8	119.48	5.91
Pt 265.945	-306.4	86.35	28.18

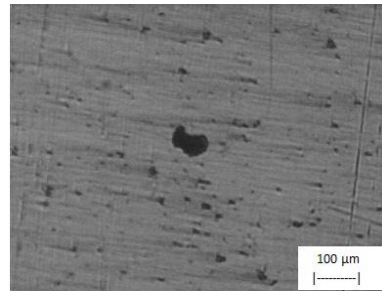
2. รุพรูปที่เกิดจากการหดตัวจากน้ำโลหะ

ชิ้นงานที่หล่อด้วยกระบวนการเดิม (As-cast)

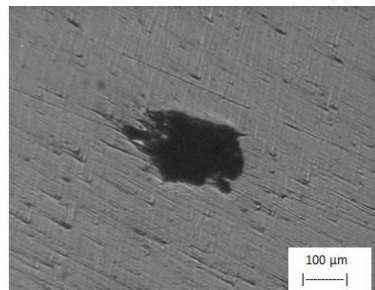
ชิ้นงาน A



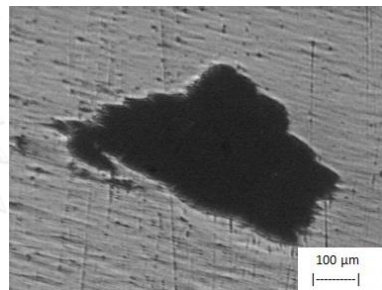
A1-1



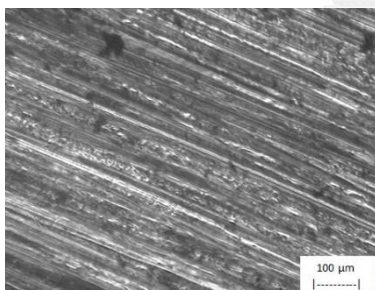
A1-2



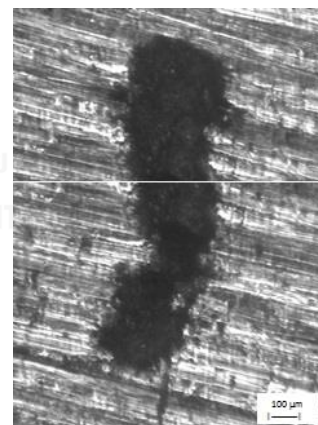
A1-3



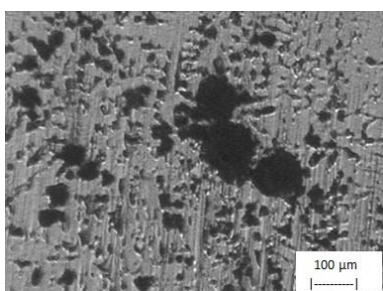
A1-4



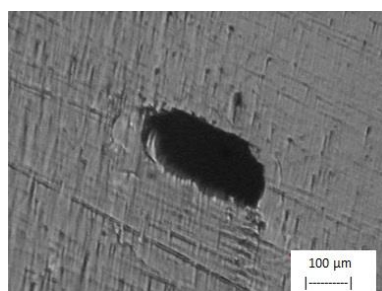
A1-5



A2-1



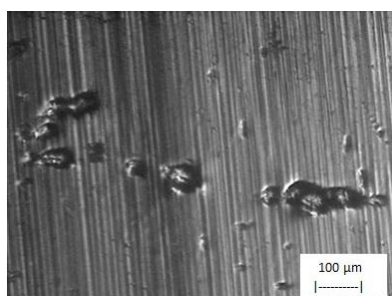
A2-3



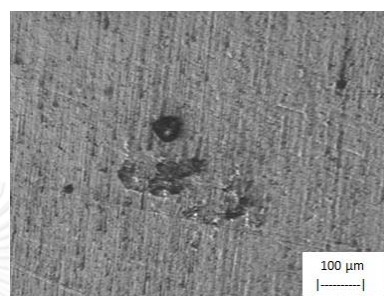
A2-4

จากการสังเกตพบว่าชิ้นงานในกลุ่มชิ้นงาน A มีชิ้นงานที่เกิดรูพรุนการหดตัวอย่างเห็นได้ชัด อยู่ 7 ชิ้นจากทั้งหมด 10 ชิ้นทั้งชิ้นงานที่มีทางไหลเข้าของน้ำโลหะขนาด 4 มิลลิเมตร และชิ้นงานที่มีทางไหลเข้าขนาด 2 ,b]]bg,9i ได้แก่ ชิ้นงาน A1-1 ชิ้นงาน A1-2 ชิ้นงาน A1-3 ชิ้นงาน A1-4 ชิ้นงาน A2-1 ชิ้นงาน A2-3 และชิ้นงาน A2-4 ซึ่งรูพรุนที่เกิดจากการหดตัวของน้ำโลหะของแต่ละชิ้นงานนั้นมีขนาดใหญ่มากกว่า 100 ไมโครเมตร

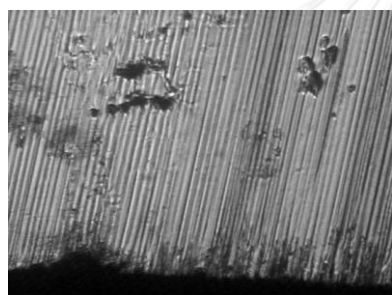
ชิ้นงาน B



B1-1



B1-4

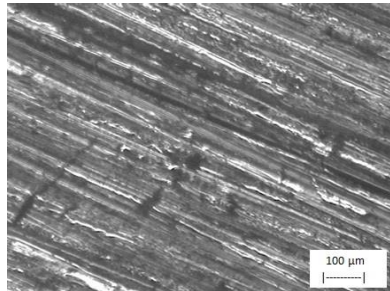


B2-1

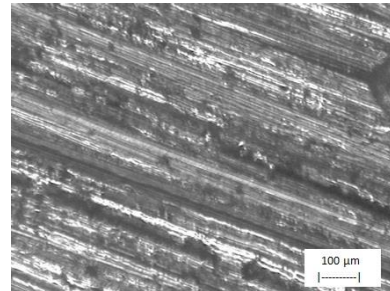
จากการสังเกตพบว่าชิ้นงานในกลุ่มชิ้นงาน B มีชิ้นงานที่เกิดรูพรุนการหดตัวอย่างเห็นได้ชัด อยู่ 3 ชิ้นจากทั้งหมด 10 ชิ้นทั้งชิ้นงานที่มีทางไหลเข้าของน้ำโลหะขนาด 4 มิลลิเมตร และชิ้นงานที่มีทางไหลเข้าขนาด 2 ,b]]bg,9i ได้แก่ ชิ้นงาน B1-1 ชิ้นงาน B1-4 และชิ้นงาน B2-1 ซึ่งรูพรุนที่เกิดจากการหดตัวของน้ำโลหะของแต่ละชิ้นงานนั้นมีขนาดใหญ่มากกว่า 100 ไมโครเมตร

ชิ้นงานที่หล่อด้วยการหล่อกึ่งแข็งที่ใช้เวลาในการกวนด้วยแก๊ส 10 วินาที (Semi-solid casting at 10 seconds bubbling time)

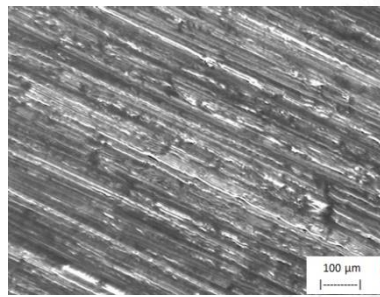
ชิ้นงาน A



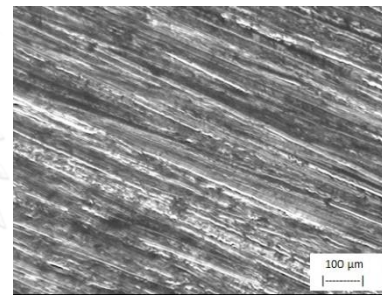
A1-1



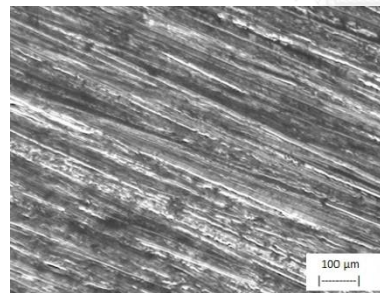
A1-2



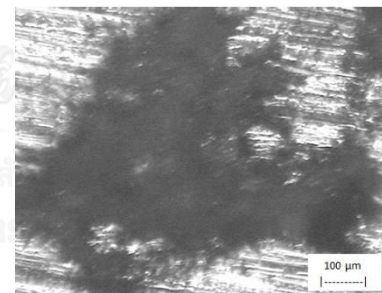
A1-3



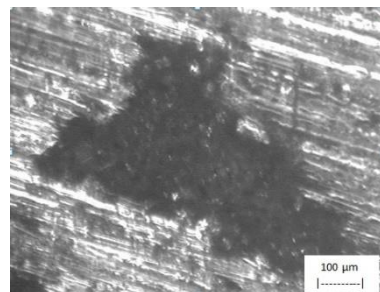
A1-4



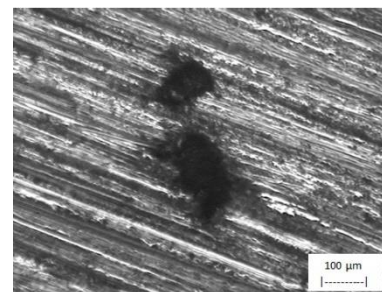
A1-5



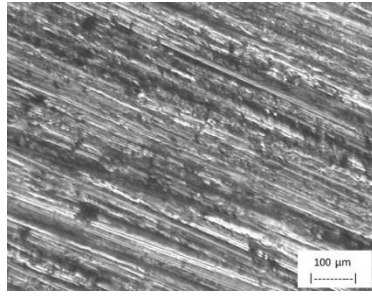
A2-1



A2-3



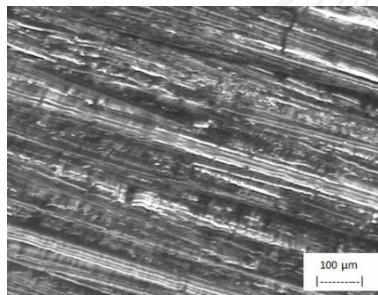
A2-4



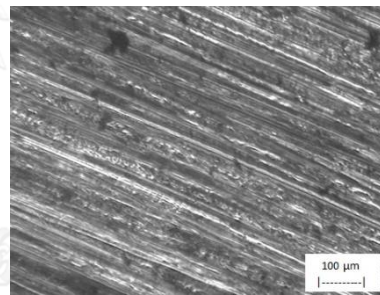
A2-5

จากการสังเกตพบว่าชิ้นงานในกลุ่มชิ้นงาน A มีชิ้นงานที่เกิดรูพรุนการกัดตัวอย่างเห็นได้ชัดอยู่ 5 ชิ้นจากทั้งหมด 10 ชิ้นทั้งชิ้นงานที่มีทางไหลเข้าของน้ำโลหะขนาด 4 มิลลิเมตร และชิ้นงานที่มีทางไหลเข้าขนาด 2 มิลลิเมตร ได้แก่ ชิ้นงาน A1-1 ชิ้นงาน A2-1 ชิ้นงาน A2-3 ชิ้นงาน A2-4 และชิ้นงาน A2-5 ซึ่งรูพรุนที่เกิดจากการกัดตัวของน้ำโลหะของแต่ละชิ้นงานนั้นมีขนาดใหญ่กว่า 100 ไมโครเมตรอยู่ 3 ชิ้นงานได้แก่ ชิ้นงาน A2-1 ชิ้นงาน A2-3 และชิ้นงาน A2-4

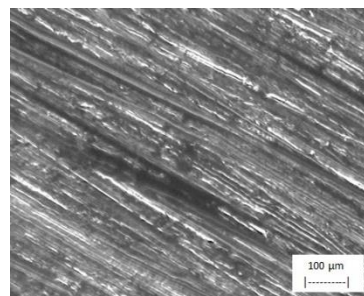
ชิ้นงาน B



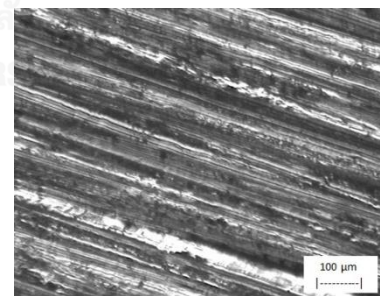
B1-1



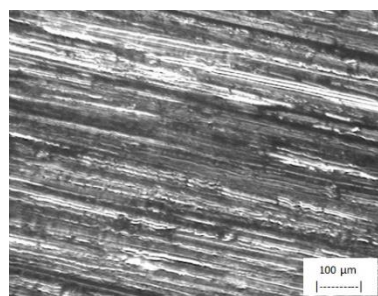
B1-2



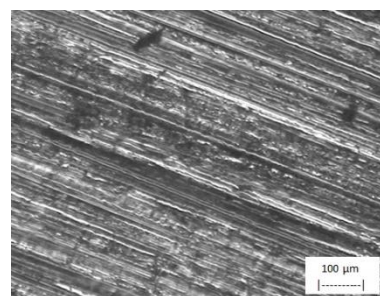
B1-3



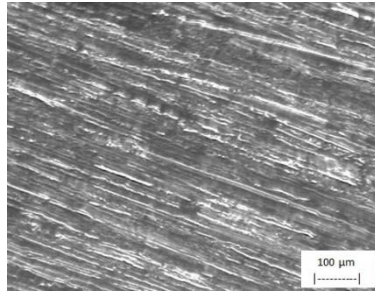
B1-4



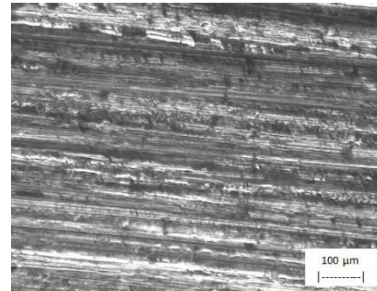
B1-5



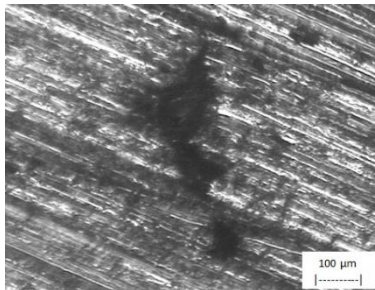
B2-1



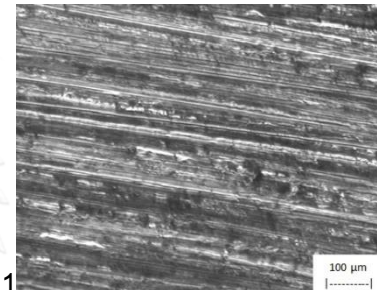
B2-2



B2-3



B2-4

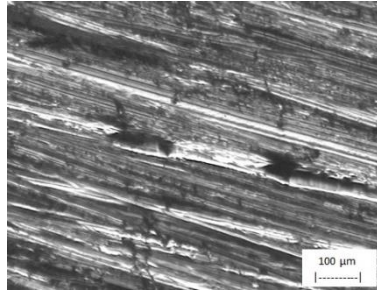


B2-5

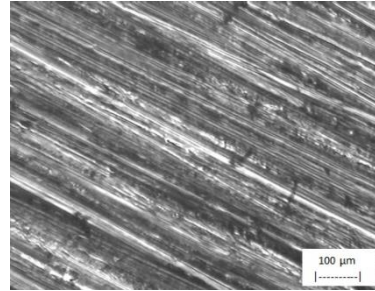
จากการสังเกตพบว่าชิ้นงานในกลุ่มชิ้นงาน B มีชิ้นงานที่เกิดรูพรุนการกัดตัวอย่างเห็นได้ชัด อยู่ 1 ชิ้นจากทั้งหมด 10 ชิ้นจากชิ้นงานที่มีทางไหลเข้าขนาด 2 mm คือชิ้นงาน B2-4 ซึ่งรูพรุนที่เกิดจากการกัดตัวของน้ำโลหะของมีขนาดใหญ่กว่า 100 ไมโครเมตร

ชิ้นงานที่หล่อด้วยการหล่อกึ่งแข็งที่ใช้เวลาในการกวนด้วยแก๊ส 15 วินาที (Semi-solid casting at 15 seconds bubbling time)

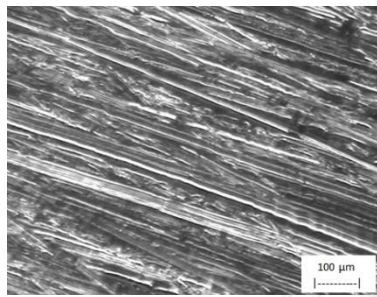
ชิ้นงาน A



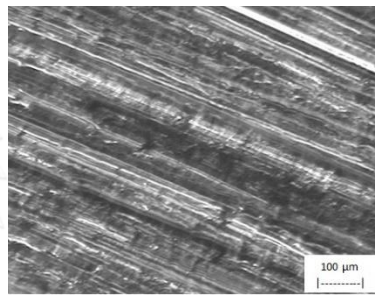
A1-1



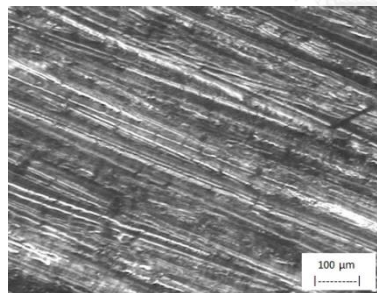
A1-2



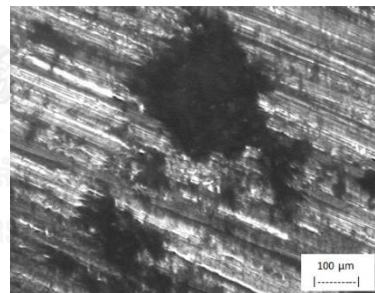
A1-3



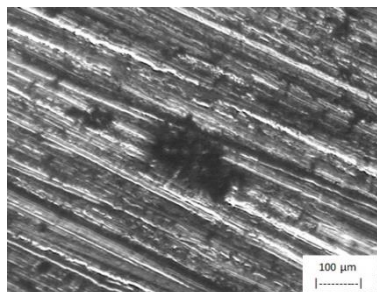
A1-4



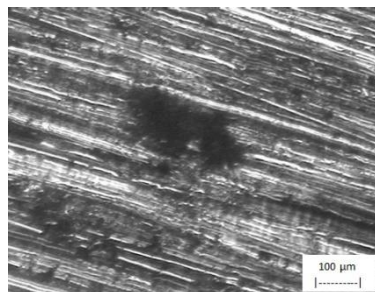
A1-5



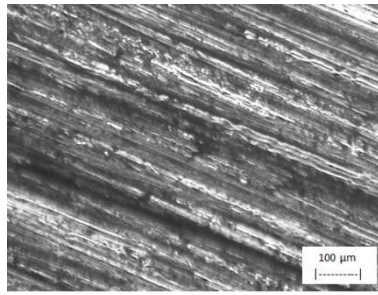
A2-1



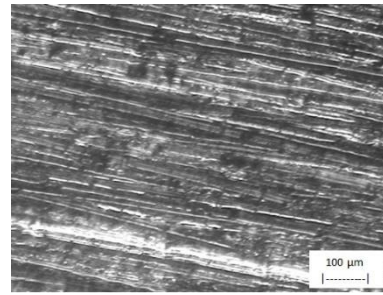
A2-2



A2-3



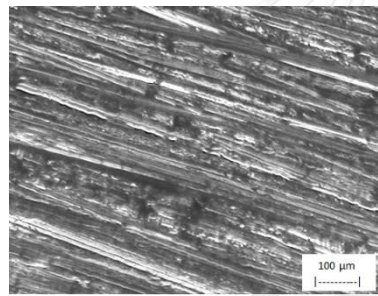
A2-4



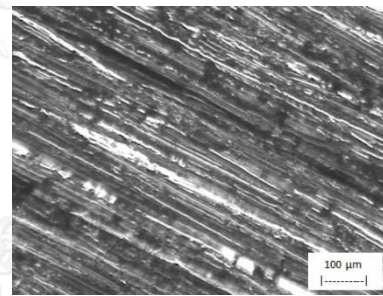
A2-5

จากการสังเกตพบว่าชิ้นงานในกลุ่มชิ้นงาน A มีชิ้นงานที่เกิดรูพรุนการกัดตัวอย่างเห็นได้ชัดอยู่ 4 ชิ้นจากทั้งหมด 10 ชิ้นทั้งชิ้นงานที่มีทางไหลเข้าของน้ำโลหะขนาด 4 มิลลิเมตร และชิ้นงานที่มีทางไหลเข้าขนาด 2 มิลลิเมตร ได้แก่ ชิ้นงาน A1-1 ชิ้นงาน A2-3 ชิ้นงาน A2-4 และชิ้นงาน A2-5 ซึ่งรูพรุนที่เกิดจากการกัดตัวของน้ำโลหะของมีขนาดใหญ่กว่า 100 ไมโครเมตรอยู่ 3 ชิ้นงาน A2-1 ชิ้นงาน A2-2 และชิ้นงาน A2-3

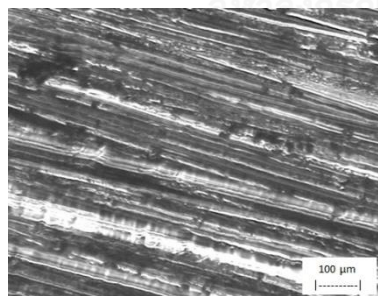
ชิ้นงาน B



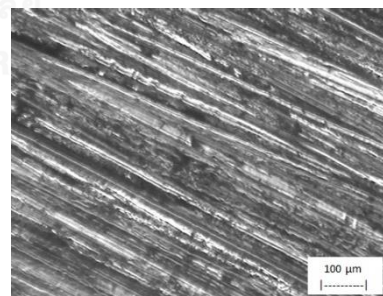
B1-1



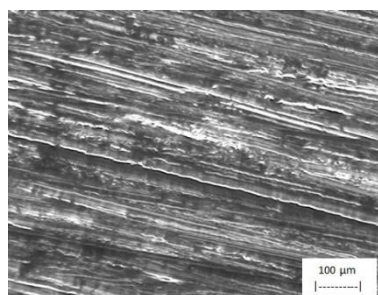
B1-2



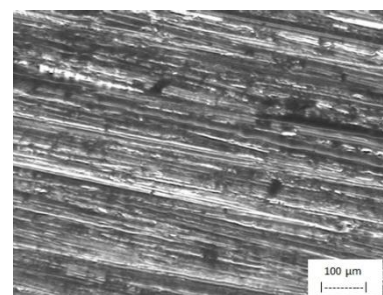
B1-3



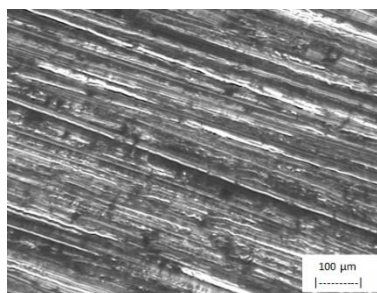
B1-4



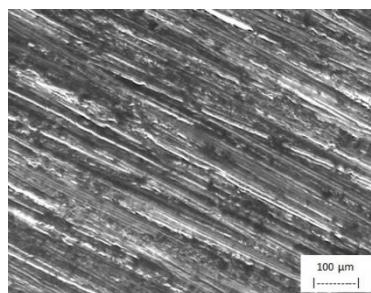
B1-5



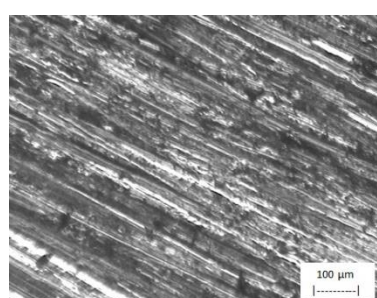
B2-1



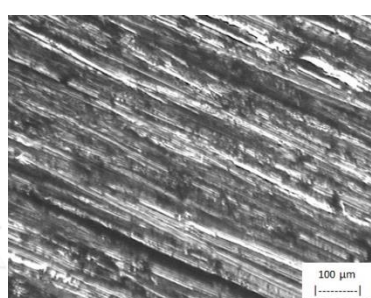
B2-2



B2-3



B2-4

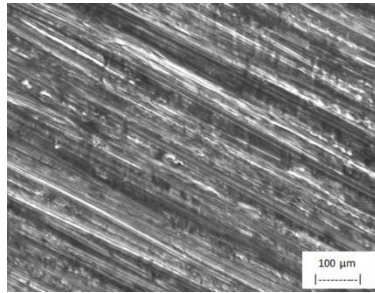


B2-5

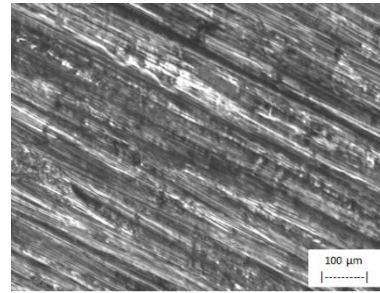
จากการสังเกตพบว่าชิ้นงานในกลุ่มชิ้นงาน B ในกลุ่มการทดลองที่หล่อด้วยการหล่อกึ่งแข็งที่ใช้เวลาในการกวนด้วยแก๊ส 15 วินาที นี้ไม่พบรูพรุนที่เกิดการหดตัวของน้ำโลหะ

ชิ้นงานที่หล่อด้วยการหล่อกึ่งแข็งที่ใช้เวลาในการกวนด้วยแก๊ส 20 วินาที (Semi-solid casting at 20 seconds bubbling time)

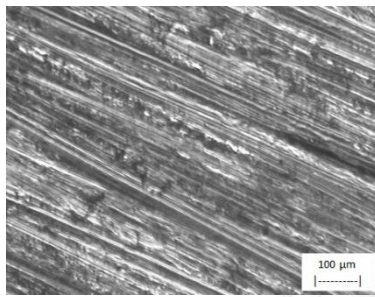
ชิ้นงาน A



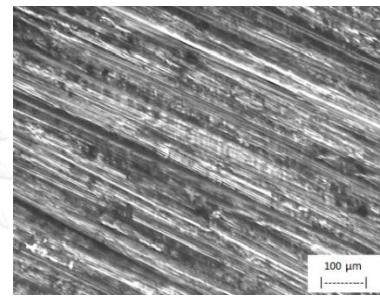
A1-1



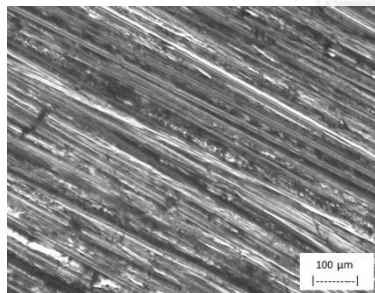
A1-2



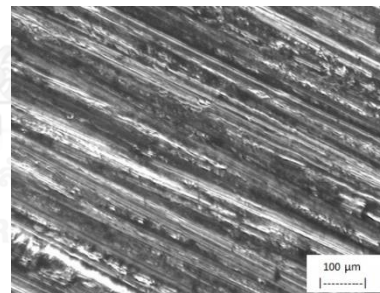
A1-3



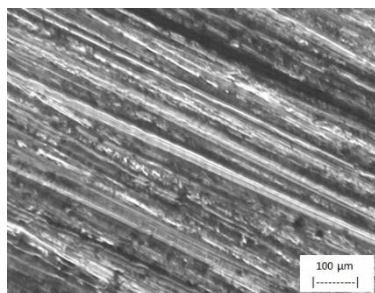
A1-4



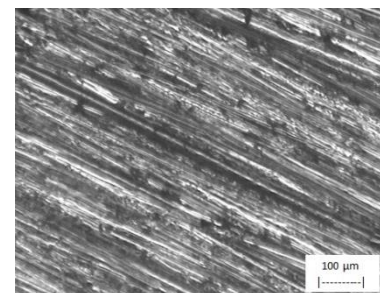
A1-5



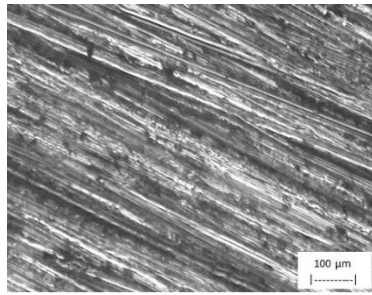
A2-1



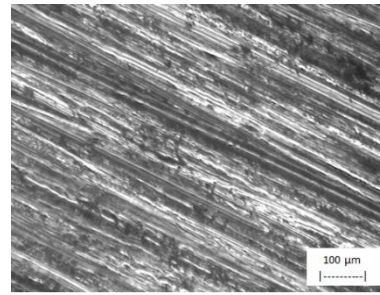
A2-2



A2-3



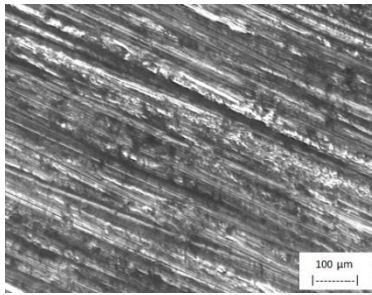
A2-4



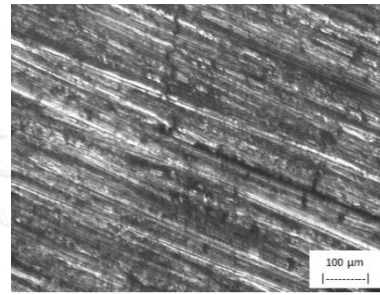
A2-5

จากการสังเกตพบว่าชิ้นงานในกลุ่มชิ้นงาน A ในกลุ่มการทดลองที่หล่อด้วยการหล่อกึ่งแข็งที่ใช้เวลาในการกวาดด้วยแก๊ส 20 วินาที นี้ไม่พบรูพรุนที่เกิดการหดตัวของน้ำโลหะแม่แต่ชิ้นเดียว

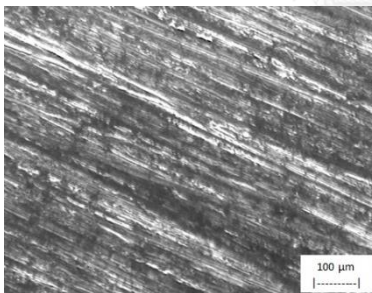
ชิ้นงาน B



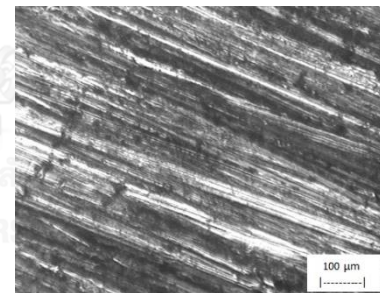
B1-1



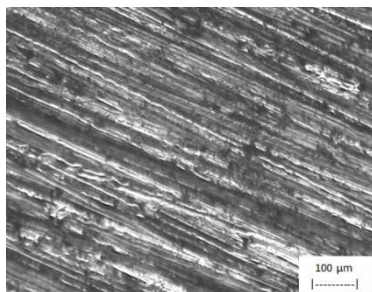
B1-2



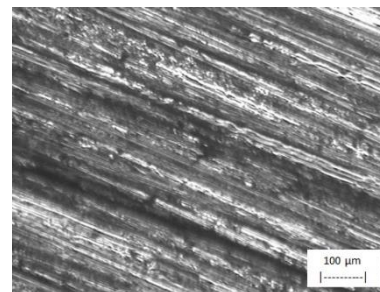
B1-3



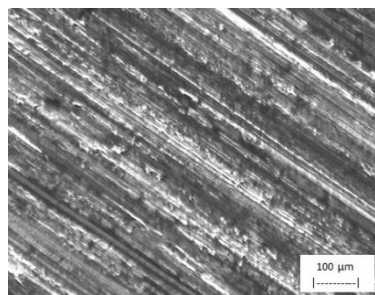
B1-4



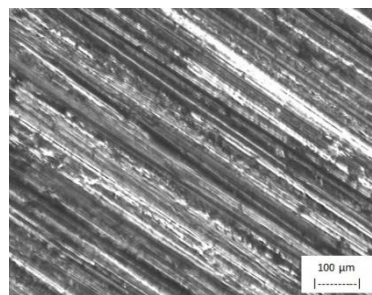
B1-5



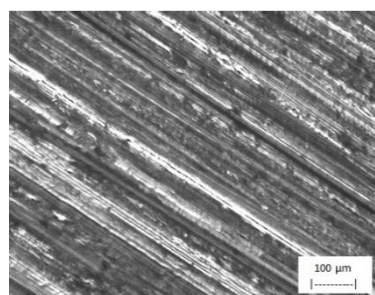
B2-1



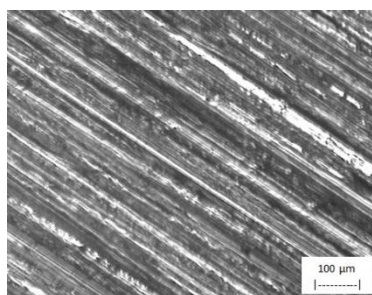
B2-2



B2-3



B2-4



B2-5

จากการสังเกตพบว่าชิ้นงานในกลุ่มชิ้นงาน B ในกลุ่มการทดลองที่หล่อด้วยการหล่อกึ่งแข็งที่ใช้เวลาในการกวนด้วยแก๊ส 20 วินาที นี้ไม่พบรูพรุนที่เกิดการหดตัวของน้ำโลหะ

3. การวัดค่าความแข็งแบบวิกเกอร์

3.1 ตารางแสดงผลการทดลองการวัดค่าความแข็งชิ้นงานที่หล่อด้วยกระบวนการเดิม (As-cast)

Sample	Vickers Hardness (HV)		
	Point 1	Point 2	Point 3
A1-1	64.2	68	66.6
A1-2	70.2	68.9	69.7
A1-3	71.6	72.0	68.7
A1-4	63.6	64.4	67.7
A1-5	74.0	68.1	74.9
A2-1	61.2	53.9	55.9
A2-2	61.0	66.2	63.2
A2-3	60.6	57.8	59.8
A2-4	61.8	59.9	66.0
A2-5	64.3	66.2	64.8
B1-1	67.5	68.8	68.2
B1-2	70.4	67.5	67.8
B1-3	69.0	60.4	71.2
B1-4	65.7	69.5	67.9
B1-5	70.7	73.1	68.2
B2-1	70.9	61.9	67.4
B2-2	74.5	67.8	66.1
B2-3	70.2	69.9	63.9
B2-4	69.8	66.4	73.2
B2-5	75.0	77.2	69.5

4.3.2 ตารางแสดงผลการทดลองการวัดค่าความแข็งชิ้นงานหล่อกิ่งแข็งที่ใช้เวลาในการกวนด้วยแก๊ส 10 วินาที

Sample	Vickers Hardness (HV)		
	Point 1	Point 2	Point 3
A1-1	72	69.9	72.7
A1-2	66.8	70.6	68.1
A1-3	69.7	64.7	66.7
A1-4	69.8	66.6	71
A1-5	66.9	65.8	67.8
A2-1	73.9	67.5	67.7
A2-2	62.7	67.6	65.2
A2-3	63.2	62.5	69.4
A2-4	64.4	62.4	61.8
A2-5	62.8	61.4	61.7
B1-1	78	72.2	81.2
B1-2	69.7	73.6	68.1
B1-3	66.8	62.7	67.8
B1-4	74.3	71.2	75.6
B1-5	70	63.5	69.6
B2-1	73.2	73.5	76.8
B2-2	65.7	70.2	74.6
B2-3	66.8	74	73
B2-4	74.1	69.2	73.1
B2-5	71.7	76.2	72.6

4.3.3 ตารางแสดงผลการทดลองการวัดค่าความแข็งชิ้นงานหล่อกึ่งแข็งที่ใช้เวลาในการกวนด้วยแก๊ส 10 วินาที

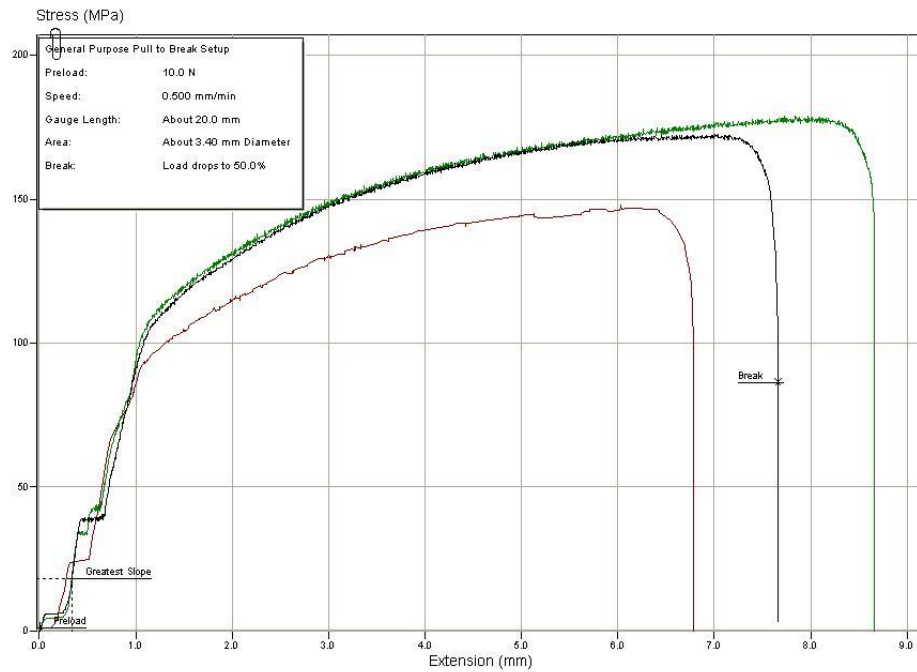
Sample	Vickers Hardness (HV)		
	Point 1	Point 2	Point 3
A1-1	104.1	108.4	106.9
A1-2	126.7	134.1	138.5
A1-3	102.6	96.7	95.3
A1-4	113.7	123.0	127.7
A1-5	133.4	132.7	129.0
A2-1	129.7	127.4	131.7
A2-2	129.9	128.1	129.9
A2-3	116.6	106.5	100.7
A2-4	130.5	128.2	135.1
A2-5	97.3	103.1	108.1
B1-1	100.7	104.7	118.3
B1-2	118.6	114.9	105.7
B1-3	107.7	125.9	119.2
B1-4	126.3	114.1	115.3
B1-5	114.9	100.9	120.7
B2-1	105.7	96.7	93.9
B2-2	123.8	106.5	103.7
B2-3	101.5	93.9	114.9
B2-4	115.3	120.9	108.1
B2-5	119.2	115.2	104.7

4.3.4 ตารางแสดงผลการทดลองการวัดค่าความแข็งชิ้นงานหล่อกิ่งแข็งที่ใช้เวลาในการกวนด้วยแก๊ส 20 วินาที

Sample	Vickers Hardness (HV)		
	Point 1	Point 2	Point 3
A1-1	119.8	121.2	118.8
A1-2	99.2	91.5	95.2
A1-3	121.9	132.7	114.8
A1-4	111.1	125.9	112.0
A1-5	113.2	105.2	122.5
A2-1	130.5	131.3	122.4
A2-2	130.5	131.3	111.3
A2-3	123.5	119.4	124.8
A2-4	129.8	124.2	133.7
A2-5	125.2	122.6	114.2
B1-1	121.2	114.4	103.2
B1-2	99.2	95.3	101.4
B1-3	111.4	116.3	122.5
B1-4	112.3	132.0	123.5
B1-5	124.2	122.1	112.3
B2-1	106.1	103.9	123.7
B2-2	132.7	116.3	101.4
B2-3	114.8	103.2	110.9
B2-4	126.2	124.2	132.1
B2-5	126.2	125.9	119.8

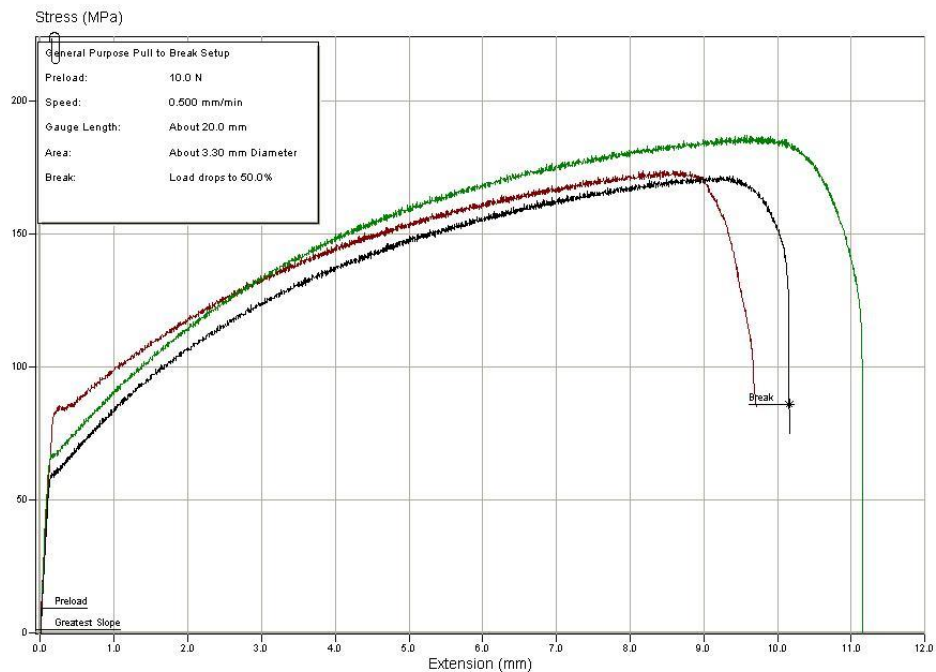
4. ความแข็งแรงดึง

4.1 ผลการทดสอบความแข็งแรงการดึงชิ้นงานที่หล่อด้วยกระบวนการเดิม (As-cast)



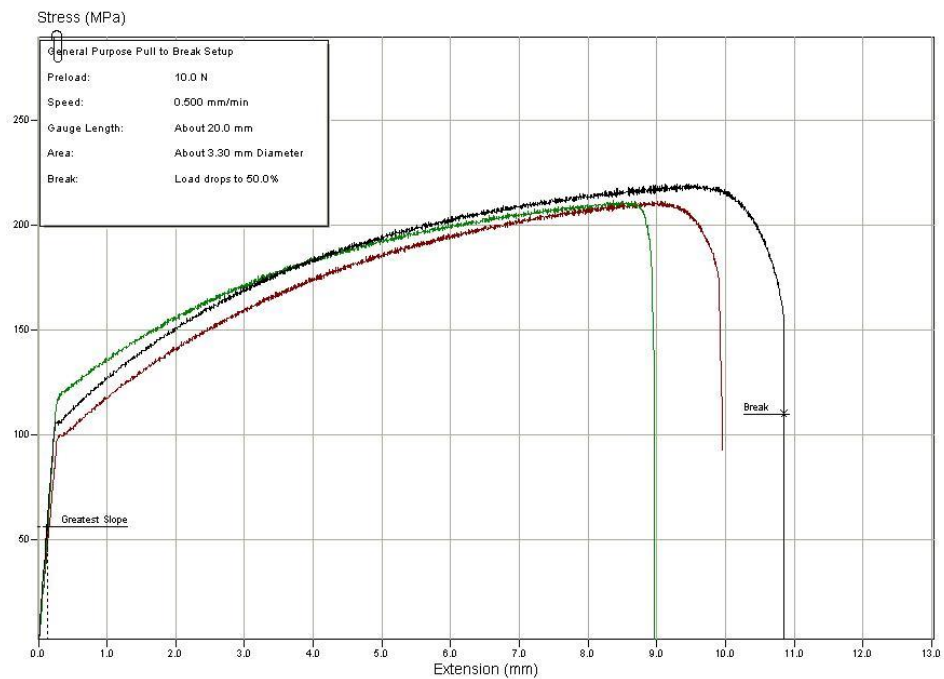
ผลการทดลองวัดสมบัติทางกลด้วยการดึงของชิ้นงานทั้ง 3 ชิ้น พบว่าความแข็งแรงที่จุดคราก (Yield Stress) ของการหล่อด้วยวิธีเดิมชิ้นแรกมีค่าอยู่ที่ 24.30 MPa และชิ้นที่สองมีค่า 33.80 MPa และชิ้นที่สามมีค่า 38.30 MPa ค่าเฉลี่ยของความแข็งแรงที่จุดคราก อยู่ที่ 32.13 MPa ความทนแรงดึง (Tensile strength หรือ Ultimate strength) ชิ้นแรกมีค่าอยู่ที่ 148.00 MPa และชิ้นที่สองมีค่า 179MPa และชิ้นที่สามมีค่า 173.00 MPa ค่าเฉลี่ยของความแข็งแรงแรงดึง อยู่ที่ 166.66 MPa

4.2 ผลการทดสอบความแข็งแรงการดึงชิ้นงานหล่อกิ่งแข็งที่ใช้เวลาในการควน 10 วินาที



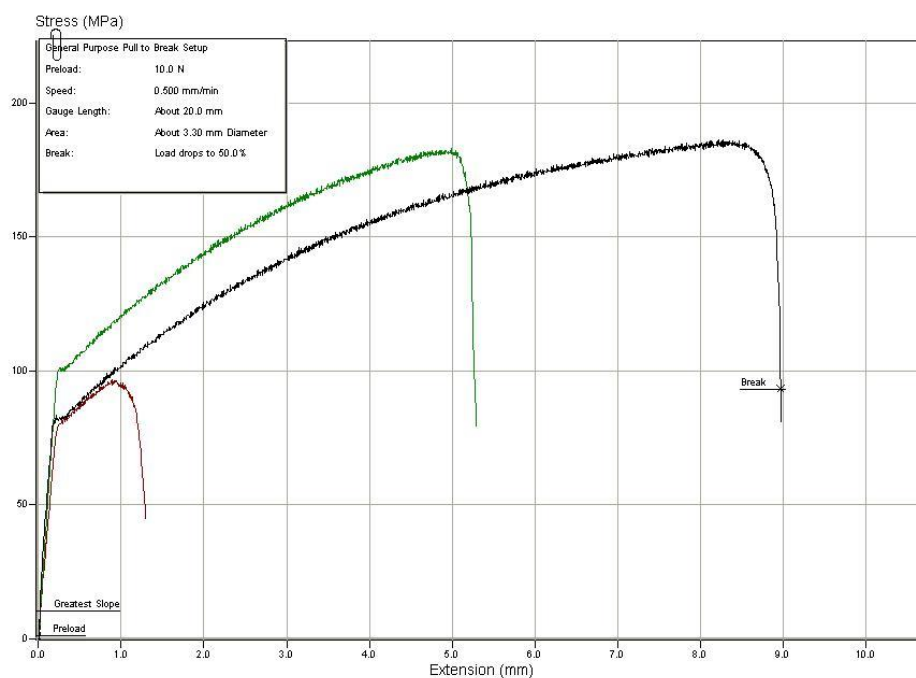
ผลการทดลองวัดสมบัติทางกลด้วยการดึงของชิ้นงานทั้ง 3 ชั้น พบว่าความแข็งแรงที่จุดคราก (Yield Stress) ของการหล่อด้วยวิธีเดิมชั้นแรกมีค่าอยู่ที่ 84.60 MPa และชั้นที่สองมีค่า 68.60 MPa และชั้นที่สามมีค่า 61.20 MPa ค่าเฉลี่ยของความแข็งแรงที่จุดคราก อยู่ที่ 71.46 MPa ความทนแรงดึง (Tensile strength หรือ Ultimate strength) ชั้นแรกมีค่าอยู่ที่ 174.00 MPa และชั้นที่สองมีค่า 187.00 MPa และชั้นที่สามมีค่า 172.00 MPa ค่าเฉลี่ยของความแข็งแรงแรงดึง อยู่ที่ 177.66 MPa

4.3 ผลการทดสอบความแข็งแรงการดึงชิ้นงานหล่อกิ่งแข็งที่ใช้เวลาในการกวน 15 วินาที



ผลการทดลองวัดสมบัติทางกลด้วยการดึงของชิ้นงานทั้ง 3 ชั้น พบว่าความแข็งแรงที่จุดคราก (Yield Stress) ของการหล่อด้วยวิธีเดิมชิ้นแรกมีค่าอยู่ที่ 99.60 MPa และชิ้นที่สองมีค่า 120.20 MPa และชิ้นที่สามมีค่า 106.40 MPa ค่าเฉลี่ยของความแข็งแรงที่จุดคราก อยู่ที่ 108.73 MPa ความทนแรงดึง (Tensile strength หรือ Ultimate strength) ชิ้นแรกมีค่าอยู่ที่ 211.00 MPa และชิ้นที่สองมีค่า 212.00 MPa และชิ้นที่สามมีค่า 220.00 MPa ค่าเฉลี่ยของความแข็งแรงแรงดึง อยู่ที่ 214.33 MPa

4.4 ผลการทดสอบความแข็งแรงการดึงชิ้นงานหล่อกิ่งแข็งที่ใช้เวลาในการกวน 20 วินาที



ผลการทดลองวัดสมบัติทางกลด้วยการดึงของชิ้นงานทั้ง 3 ชั้น พบว่าความแข็งแรงที่จุดคราก (Yield Stress) ของการหล่อด้วยวิธีเดิมชิ้นแรกมีค่าอยู่ที่ 82.10 MPa และชิ้นที่สองมีค่า 100.90 MPa และชิ้นที่สามมีค่า 82.30 MPa ค่าเฉลี่ยของความแข็งแรงที่จุดคราก อยู่ที่ 88.43 MPa ความทนแรงดึง (Tensile strength หรือ Ultimate strength) ชิ้นแรกมีค่าอยู่ที่ 96.60 MPa และชิ้นที่สองมีค่า 183.00 MPa และชิ้นที่สามมีค่า 186.00 MPa ค่าเฉลี่ยของความแข็งแรงแรงดึง อยู่ที่ 155.20 MPa

ตารางสรุปผลการทดสอบความแข็งแรงดึง

Sample	Maximum Load (N)	Young's Modulus (MPa)	Elongation (%)	Stress at maximum Load (MPa)	Yield Strength (MPa)
As-cast 1	1508.0	4075.1	33.071	148	24.3
2	1624	5932.3	43.231	179	33.8
3	1568	5029.2	38.275	173	38.3
10 Sec 1	1487.0	12579	48.509	174.0	84.6
2	1601.0	13123	55.752	187.0	68.6
3	1470.0	10515	50.785	172.0	61.2
15 Sec 1	1808.0	7711.9	49.749	211	99.6
2	1810.0	10530.0	44.754	212	120.2
3	1880.0	10189.0	54.239	220	106.4
20 Sec 1	826.4	9301.4	6.4186	96.6	82.1
2	1567.0	10196	26.377	183.0	100.9
3	1594.0	13173	44.844	186.0	82.3

5. โครงสร้างมหภาคของชิ้นงาน

5.1 กระบวนการหล่อเดิม



A1-1



A2-1



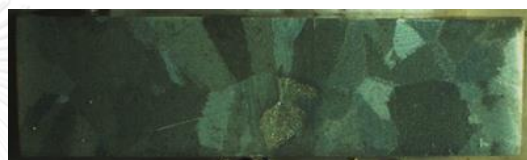
A1-2



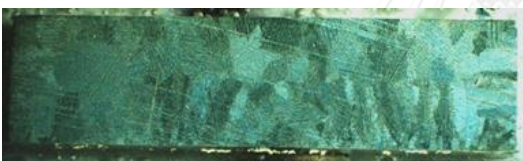
A2-2



A1-3



A2-3



A1-4



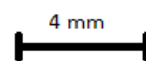
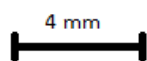
A2-4

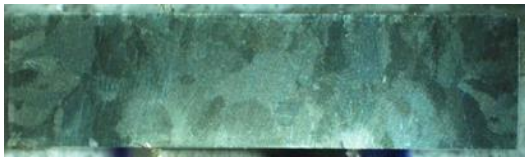


A1-5

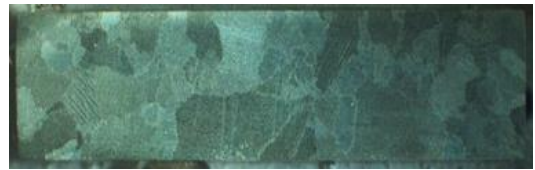


A2-5





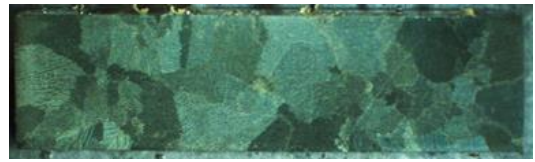
B1-1



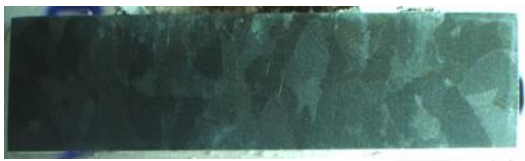
B2-1



B1-2



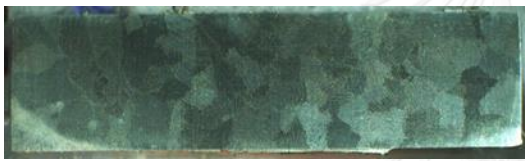
B2-2



B1-3



B2-3



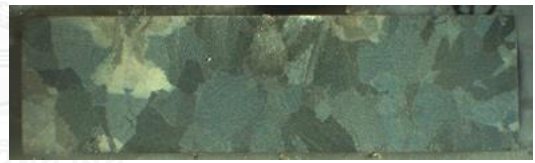
B1-4



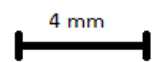
B2-4



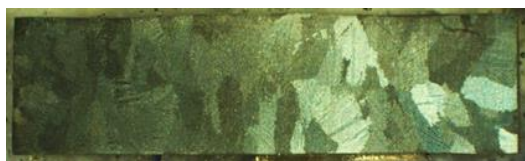
B1-5



B2-5



5.2 กระบวนการหล่อกิ่งแข็งที่มีการกวนด้วยแก๊ส 10 วินาที



A1-1



A2-1



A1-2



A2-2



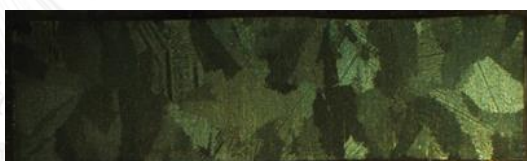
A1-3



A2-3



A1-4



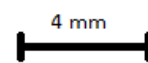
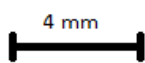
A2-4



A1-5

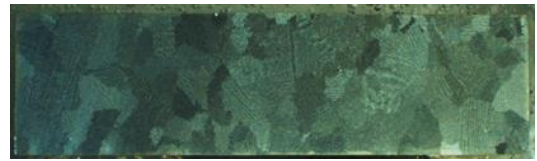


A2-5

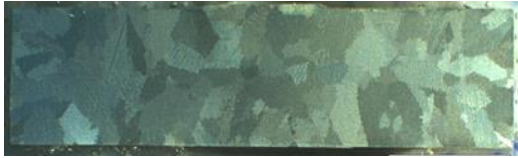




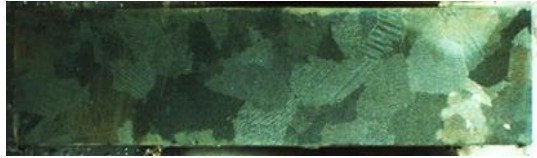
B1-1



B2-1



B1-2



B2-2



B1-3



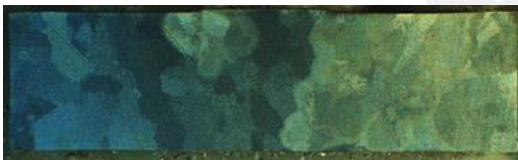
B2-3



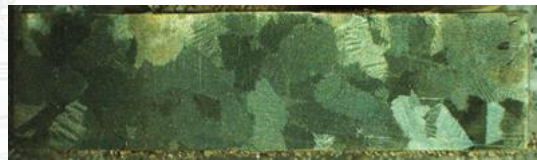
B1-4



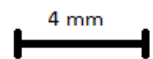
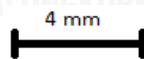
B2-4



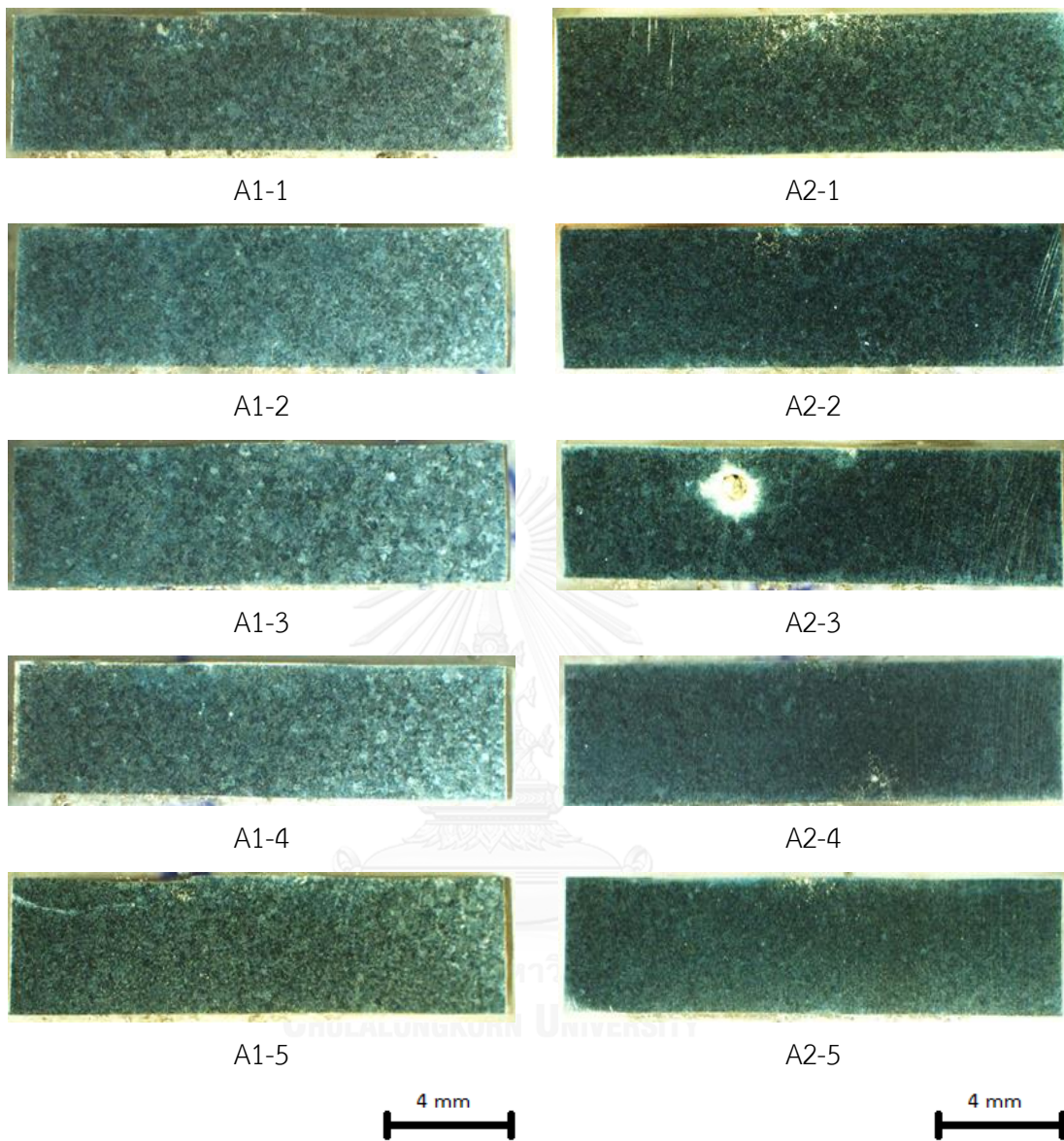
B1-5

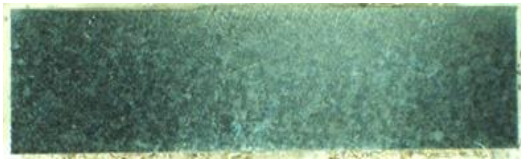


B2-5



5.3 กระบวนการหล่อกิ่งแข็งที่มีการกวนด้วยแก๊ส 15 วินาที





B1-1



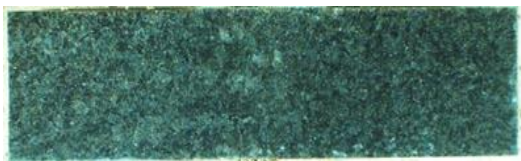
B2-1



B1-2



B2-2



B1-3



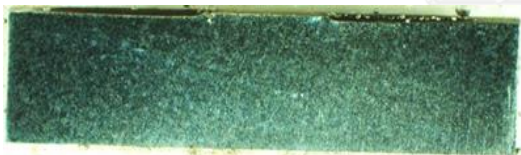
B2-3



B1-4



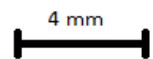
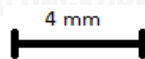
B2-4



B1-5



B2-5



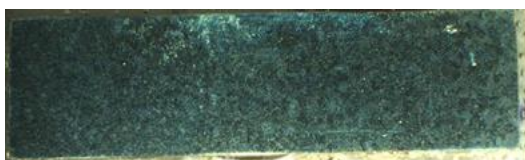
5.3 กระบวนการหล่อกิ่งแข็งที่มีการกวนด้วยแก๊ส 20 วินาที



A1-1



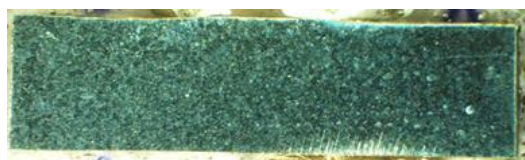
A2-1



A1-2



A2-2



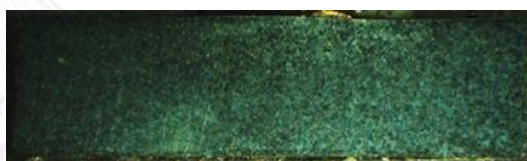
A1-3



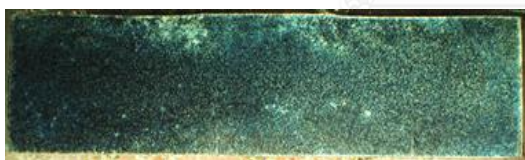
A2-3



A1-4



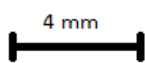
A2-4

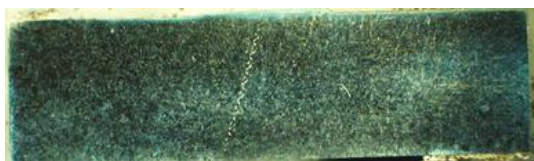


A1-5



A2-5

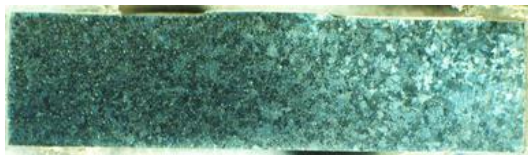




B1-1



B2-1



B1-2



B2-2



B1-3



B2-3



B1-4



B2-4

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ นายปัญญา วิโรจน์ เกิดเมื่อวันที่ 27 ตุลาคม 2532 ระดับมัธยมศึกษามัธยมศึกษา
ตอนปลาย จบการศึกษาจากโรงเรียนสุราษฎร์ธานี 2 เมื่อปี พ.ศ.2551 ระดับปริญญาตรีจบ
วิศวกรรมบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เมื่อ พ.ศ. 2555

