

ผลของการเติมโคบอลต์ และนิกเกิลในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นนิกเกิลเกรดอินโคเนล 738 ที่มีการเติม  
อะลูมิเนียมเพิ่ม 1% โดยน้ำหนัก ด้วยกระบวนการหลอมแบบอาร์ค ต่อโครงสร้างจุลภาค และความ  
เสถียรของเฟสแกมมาไพรม์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการและวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2562  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF COBALT AND NICKEL ADDITIONS ON MICROSTRUCTURE AND GAMMA  
PRIME PHASE STABILITY IN NICKEL-BASE SUPERALLOYS, GRADE INCONEL 738 WITH 1  
WT.% ALUMINUM INCREASING, PREPARED BY ARC MELTING PROCESS



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Metallurgical and Materials Engineering  
Department of Metallurgical Engineering  
FACULTY OF ENGINEERING  
Chulalongkorn University  
Academic Year 2019  
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของการเติมโคบอลต์ และนิกเกิลในโลหะผสมพิเศษเนื้อ พื้ นนิกเกิลเกรดอินโคเนล 738 ที่มีการเติมอะลูมิเนียมเพิ่ม 1% โดยน้ำหนัก ด้วยกระบวนการหลอมแบบอาร์ค ต่อ โครงสร้างจุลภาค และความเสถียรของเฟสแกมมาไพรม์
โดย	นายวิชเวศร์ ก่อธรรมนิเวศน์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโลหการและวัสดุ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปัญญาวัชร วังยาว
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนพร โรจน์ศิริรัฐสกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปัญญาวัชร วังยาว)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนพร โรจน์ศิริรัฐสกุล)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุรรัตน์ ผลศิลป์)

วิชชเวศร์ ก่อธรรมนิเวศน์ : ผลของการเติมโคบอลต์ และนิกเกิลในโลหะผสมพิเศษเนื้อ  
 พื้นนิกเกิลเกรดอินโคเนล 738 ที่มีการเติมอะลูมิเนียมเพิ่ม 1% โดยน้ำหนัก ด้วย  
 กระบวนการหลอมแบบอาร์ค ต่อโครงสร้างจุลภาค และความเสถียรของเฟสแกมมา  
 ไพรม์. ( EFFECT OF COBALT AND NICKEL ADDITIONS ON MICROSTRUCTURE  
 AND GAMMA PRIME PHASE STABILITY IN NICKEL-BASE SUPERALLOYS,  
 GRADE INCONEL 738 WITH 1 WT.% ALUMINUM INCREASING, PREPARED BY  
 ARC MELTING PROCESS) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.ปัญญาวัชร วัชยาว, อ.ที่ปรึกษา  
 ร่วม : ผศ. ดร.ธนพร โรจน์ทิรัฐสกุล

งานวิจัยฉบับนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาผลของการเติมธาตุนิกเกิล และโคบอลต์ ใน  
 ปริมาณที่แตกต่างกันในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรดอินโคเนล 738 ที่เติมอะลูมิเนียมเพิ่ม  
 1% โดยน้ำหนัก และหลอมละลายแบบอาร์คสุญญากาศ ผลการทดลองที่ได้หลังจากขึ้นงานผ่าน  
 กรรมวิธีทางความร้อนมาตรฐาน ซึ่งประกอบด้วยการทำละลาย ที่อุณหภูมิ 1175°C เป็นเวลา 4  
 ชั่วโมง และ การบ่มแข็ง ที่อุณหภูมิ 845°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มธาตุผสม  
 นิกเกิล ลงในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลจะเป็นการเพิ่มความเสถียรของโครงสร้างพื้น รวมทั้ง  
 นิกเกิลยังเป็นธาตุหลักที่ใช้ในการ สร้างอนุภาคแกมมาไพรม์ อีกด้วย ในขณะที่การเพิ่มธาตุผสม  
 โคบอลต์ ส่งผลให้อัตราการโตของอนุภาคแกมมาไพรม์ลดลง โดยหลังการจำลองการใช้งานที่  
 อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง ชิ้นงานที่มีการเติมธาตุผสมโคบอลต์ 6 %โดยน้ำหนัก จะมี  
 ขนาดอนุภาคแกมมาไพรม์เล็กที่สุดคือขนาด 0.086 ตารางไมครอน และหลังจำลองการใช้งานที่  
 อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง ชิ้นงานที่มีการเติมธาตุผสมโคบอลต์ 4.5 %โดยน้ำหนัก  
 จะมีขนาดอนุภาคแกมมาไพรม์เล็กที่สุดคือขนาด 1.041 ตารางไมครอน นอกจากนี้ยังพบว่า  
 ตัวอย่างที่มีการเพิ่มธาตุผสมอะลูมิเนียม 1% โดยน้ำหนัก จะมีอัตราการโตของอนุภาคไพรม์ ทั้ง  
 กรณีหลังจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง และกรณีหลังการจำลองการใ้  
 งานที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง มีค่ามากกว่า ชิ้นงานที่ไม่มีการเติม ธาตุผสม  
 อะลูมิเนียมเพิ่ม

สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการและวัสดุ

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 5970457921 : MAJOR METALLURGICAL AND MATERIALS ENGINEERING

KEYWORD:

Witchawet Korthamniwet : EFFECT OF COBALT AND NICKEL ADDITIONS ON MICROSTRUCTURE AND GAMMA PRIME PHASE STABILITY IN NICKEL-BASE SUPERALLOYS, GRADE INCONEL 738 WITH 1 WT.% ALUMINUM INCREASING, PREPARED BY ARC MELTING PROCESS. Advisor: Asst. Prof. PANYAWAT WANGYAO, Ph.D. Co-advisor: Asst. Prof. Tanaporn Rojhirunsakool, Ph.D.

The effects of Nickel and Cobalt additions to Inconel 738 with 1 wt.% addition of Aluminium were studied and evaluated. The alloys with various contents of Nickel and Cobalt were prepared using vacuum arc melting process. All alloys were heat treated with standard heat treatment procedure, which consists of solution treatment at temperature of 1175°C for 4 hr. and precipitation aging at temperature of 845°C for 24 hr. The increase of Nickel content enhances the stability of gamma prime particles and gamma matrix as well as helps the formation of gamma prime particles. In case of Cobalt, the coarsening rate of gamma prime particles is decreased with increasing Cobalt content. After long-term exposure at temperature of 900°C for 400 hours, the average gamma prime particle area (size) has the lowest value (only 0.086  $\mu\text{m}^2$ ) in specimen with 6 wt.% Co addition. However, the smallest particle size (1.041  $\mu\text{m}^2$ ) was found in specimen with 4.5 wt.% Co addition after long-term exposure at temperature of 1000°C for 400 hours. Furthermore, the further addition of Aluminium to Inconel 738 results in size and area density of gamma prime phase increasing and the faster growth of gamma prime particles after long-term heating compared to those of the standard Inconel 738.

Field of Study: Metallurgical and Materials Engineering Student's Signature .....

Academic Year: 2019

Advisor's Signature .....

Co-advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากความช่วยเหลือจากหลายฝ่าย ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปัญญาวัชร วัชยาว ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธนพร โรจน์หิรัญสกุล ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงที่ท่านได้ถ่ายทอดความรู้ อบรมสั่งสอน และให้คำแนะนำระหว่างการวิจัย ตลอดจนช่วยคิดแก้ไขปัญหา และแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ ขอขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ ซึ่งเป็นประธานคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ สำหรับการตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ รวมทั้งอบรมสั่งสอน และให้คำแนะนำต่างๆ ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย และ รองศาสตราจารย์ ดร. สุรรัตน์ ผลศิลป์ ซึ่งเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่สละเวลาเพื่อเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ต่อการเขียนวิทยานิพนธ์นี้ ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่านสำหรับการอบรมสั่งสอน และให้ความรู้ ตลอดจนมา ขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ธุรการ และครูปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่าน ที่คอยช่วยเหลือและให้คำแนะนำ รวมทั้งให้กำลังใจแก่ข้าพเจ้าตลอดมา ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร. นิธิ แสนอาจหาญ และ ดร. สิริวรรณ สกุลตันเจริญชัย สำหรับการให้คำแนะนำทั้งทางวิชาการ และการใช้ชีวิตเสมอมา ขอขอบพระคุณทุนจากโครงการแผนพัฒนาวิชาการจุฬาฯ สร้างเสริมพลังจุฬาฯ ก้าวสู่ศตวรรษที่ 2 ที่ให้ทุนสำหรับค่าใช้จ่ายอุดหนุนงานวิจัยในการศึกษาระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต ขอขอบพระคุณ บุคลากรของสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ และบุคลากรของศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความกรุณาในการทดสอบชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด ขอขอบคุณนางสาวนภัส เกียรติวิศาลกิจ และนางสาวอาภาพร นรารักษ์ มหาบัณฑิตภาควิชาวิศวกรรมโลหการและวัสดุที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องการอบชิ้นงานนี้สำเร็จด้วยดี สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาที่เคารพรักของข้าพเจ้าที่คอยให้กำลังใจ ให้ความรัก และสนับสนุนด้านการศึกษามาโดยตลอด รวมทั้งขอขอบคุณพี่น้องๆ ที่คอยให้กำลังใจเสมอมา

วิชเวศร์ ก่อธรรมนิเวศน์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 .....	1
บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ .....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 .....	5
ทบทวนวรรณกรรม .....	5
2.1 โลหะผสมพิเศษ.....	5
2.2 โครงสร้างจุลภาคในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล.....	7
2.2.1 เนื้อพื้่นแกมมา (Gamma matrix, $\gamma$ ).....	7
2.2.2 แกมมาไพรม์ (Gamma prime, $\gamma'$ ).....	8
2.2.3 คาร์ไบด์ (carbides).....	8
2.2.4 TCP phases.....	10
2.3 อิทธิพลของธาตุผสมในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล.....	11

2.4 โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นนิกเกิลเกรดอินโคเนล 738 (Inconel 738, IN 738) .....	12
2.4.1 สมบัติทางกายภาพของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นนิกเกิลเกรดอินโคเนล 738 .....	14
2.4.2 สมบัติทางกลของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นนิกเกิลเกรด IN 738 .....	16
2.4.3 กรรมวิธีทางความร้อนในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นนิกเกิลเกรด IN 738.....	17
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
2.5.1 งานวิจัยที่เกี่ยวกับผลของโคบอลต์ในโลหะผสมเนื้อพื้่นนิกเกิล .....	18
2.5.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับผลของอะลูมิเนียมในโลหะผสมเนื้อพื้่นนิกเกิล .....	23
2.5.3 งานวิจัยที่เกี่ยวกับผลของนิกเกิลในโลหะผสมเนื้อพื้่นนิกเกิล .....	29
บทที่ 3 .....	31
ขั้นตอนและวิธีการทดลอง .....	31
3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย .....	31
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงาน .....	31
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมผิวชิ้นงาน .....	31
3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองการใช้งาน และการวิเคราะห์ผลการทดลอง .....	32
3.2 ขั้นตอนการทำวิจัย.....	32
3.2.1 ขั้นตอนการเตรียม และการหลอมชิ้นงาน .....	32
3.2.2 ขั้นตอนการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	37
3.3 แผนผังขั้นตอนทำการทดลอง.....	39
3.4 แผนดำเนินงานวิจัย และเวลา .....	40
บทที่ 4 .....	41
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล .....	41
4.1 ผลการทดลองและ วิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 และโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 ที่เติมอะลูมิเนียม นิกเกิล และโคบอลต์ ด้วยเทคนิค EDS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy).....	41



4.2 ผลการทดลองและ วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 และโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 ที่เติมอะลูมิเนียม นิกเกิล และโคบอลต์ ภายหลังจากหลอมละลายแบบอาร์กสตูญอากาศ.....	42
4.3 ผลการทดลองและ วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 และโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 ที่เติมอะลูมิเนียม นิกเกิล และโคบอลต์ ภายหลังจากทำละลายที่อุณหภูมิ 1175°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง.....	44
4.3.1 ผลการทดลองและ วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope, OM) ภายหลังจากทำละลายที่อุณหภูมิ 1175°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง .....	44
4.3.2 ผลการทดลองและ วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ภายหลังจากทำละลายที่อุณหภูมิ 1175°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง.....	45
4.4 ผลการทดลองและ วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 และโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 ที่เติมอะลูมิเนียม นิกเกิล และโคบอลต์ ภายหลังจากหลอมละลายแบบอาร์กสตูญอากาศ และการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 845°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง .....	49
4.4.1 ผลการทดลองและ วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope, OM) ภายหลังบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 845°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง .....	49
4.4.2 ผลการทดลองและ วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ภายหลังบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 845°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง .....	50
4.5 ผลการทดลองและ วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 และโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 ที่เติมอะลูมิเนียม นิกเกิล และโคบอลต์ ภายหลังจากจำลองการใช้งานอุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง.....	56
4.5.1 ผลการทดลองและ วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope, OM) ภายหลังจากจำลองการใช้งานอุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง.....	56

4.5.2 ผลการทดลองและ วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ภายหลังจากการใช้งาน อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง.....	59
4.6 ผลการทดลองและ วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 และโลหะ ผสมพิเศษเกรด Inconel 738 ที่เติมอะลูมิเนียม นิกเกิล และโคบอลต์ ภายหลังจากการใช้งาน อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง .....	64
4.6.1 ผลการทดลองและ วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope, OM) ภายหลังจากการใช้งานอุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง.....	64
4.6.2 ผลการทดลองและ วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ภายหลังจากการใช้งาน อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง .....	68
บทที่ 5 .....	73
สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ .....	73
5.1 สรุปผลการทดลอง .....	73
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	74
ภาคผนวก ก ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานในแต่ละบริเวณ ที่ตรวจสอบด้วย EDS.....	76
ภาคผนวก ข โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหลังการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง....	87
ภาคผนวก ค โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหลังการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 845°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง.....	93
ภาคผนวก ง โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหลังการใช้งานที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง.....	99
ภาคผนวก จ โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหลังการใช้งานที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง.....	105
บรรณานุกรม.....	111
ประวัติผู้เขียน.....	113

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ปริมาณธาตุผสมต่างๆที่อยู่ในโลหะผสมพิเศษทั้ง 3 กลุ่ม [3] .....	7
ตารางที่ 2.2 ปริมาณธาตุผสมต่างๆที่อยู่ในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นนิกเกิลเกรด IN 738 [9].....	13
ตารางที่ 2.3 ค่าความร้อนจำเพาะ และค่าการนำความร้อนของ IN 738 [9] .....	14
ตารางที่ 2.4 ค่า Modulus of elasticity และค่า Poisson's Ratio ของ IN 738 [9].....	15
ตารางที่ 2.5 สมบัติการทดลองดึงของ IN 738C และIN 738LC ที่อุณหภูมิห้อง [9] .....	16
ตารางที่ 2.6 สมบัติการทดลองดึงของ IN 738 ที่อุณหภูมิต่างๆ [9].....	16
ตารางที่ 2.7 ผลการทดสอบความเคีบของ IN 738 [9] .....	17
ตารางที่ 2.8 เงื่อนไขการทำสารละลายเนื้อเดียวของชิ้นงานทั้ง 3 ชิ้น [11].....	21
ตารางที่ 2.9 เงื่อนไขกรรมวิธีทางความร้อนที่ใช้ในการทดลอง [12].....	24
ตารางที่ 3.1 ร้อยละโดยน้ำหนักของ IN 738, โคบอลต์, นิกเกิล และอะลูมิเนียม ที่ต้องการเตรียมใน ชิ้นงานแต่ละชิ้น.....	33
ตารางที่ 3.2 น้ำหนักของโลหะผสมเนื้อพื้่นนิกเกิลเกรดอินโคเนล 738 และน้ำของธาตุผสมต่างๆที่ใช้ ในชิ้นงานแต่ละชิ้น.....	33
ตารางที่ 3.3 ร้อยละโดยน้ำหนักจริงของ IN 738, โคบอลต์, นิกเกิล และอะลูมิเนียม ที่เตรียมใน ชิ้นงานแต่ละชิ้น.....	34
ตารางที่ 3.4 ร้อยละโดยน้ำหนักของแต่ละธาตุจากการอ้างอิงผล OES ในชิ้นงาน 0 ของชิ้นงาน 0 – ชิ้นงาน 5 .....	34
ตารางที่ 3.5 ร้อยละโดยน้ำหนักของแต่ละธาตุจากการอ้างอิงผล EDS ในชิ้นงาน 0 ของชิ้นงาน 0 – ชิ้นงาน 5 .....	35
ตารางที่ 4.1 แสดงส่วนผสมทางเคมีโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 และโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 ที่เติมอะลูมิเนียม นิกเกิล และโคบอลต์ .....	41
ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงอัตราส่วน Ni : Co ในชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 และโลหะ ผสมพิเศษเกรด Inconel 738 ที่เติมอะลูมิเนียม นิกเกิล และโคบอลต์.....	48



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 รูปลักษณะเครื่องยนต์ส่วนปีกของเครื่องบินเจ็ทที่มีการใช้งานโลหะผสมพิเศษ [6].....	5
รูปที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างแบบ เฟซเซ็นเตอร์คิวบิก (Face-centered cubic, FCC) [7].....	7
รูปที่ 2.3 ลักษณะโครงสร้างเฟซเซ็นเตอร์คิวบิกของแกมมาไพรม์ [8] .....	8
รูปที่ 2.4 ลักษณะการไปต์ในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นนิกเกิล [3] .....	10
รูปที่ 2.5 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน ณ ที่อุณหภูมิต่างๆ และค่าเฉลี่ยจาก อุณหภูมิ 70°F ถึงอุณหภูมิที่สนใจ [9].....	15
รูปที่ 2.6 เคนไดรต์ที่ได้หลังหลอมของชิ้นงานทั้ง 4 ชิ้นที่มีการเติมปริมาณธาตุ Co แตกต่างกัน (a) 0 wt.% (b) 5wt.% (c) 10wt.% และ(d) 15wt.% [10].....	19
รูปที่ 2.7 ลักษณะของ $\gamma'$ ที่แกนเคนไดรต์ของชิ้นงานทั้ง 4 ชิ้นที่มีการเติมปริมาณธาตุ Co แตกต่าง กัน (a) 0 wt.% (b) 5 wt.% (c) 10 wt.% และ(d) 15 wt.% [10].....	19
รูปที่ 2.8 ลักษณะของ $\gamma'$ ที่บริเวณใกล้ขอบเคนไดรต์ของชิ้นงานทั้ง 4 ชิ้นที่มีการเติมปริมาณธาตุ Co แตกต่างกัน (a) 0 wt.% (b) 5 wt.% (c) 10 wt.% และ(d) 15 wt.% [10].....	20
รูปที่ 2.9 ลักษณะของ $\gamma'$ ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนของชิ้นงานทั้ง 4 ชิ้นที่มีการเติมปริมาณธาตุ Co แตกต่างกัน (a) 0 wt.% (b) 5 wt.% (c) 10 wt.% และ(d) 15 wt.% [10] .....	20
รูปที่ 2.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง k และธาตุผสมต่างๆ ในชิ้นงานทั้ง 3 ชิ้น [11].....	21
รูปที่ 2.11 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน (a) S1, (b) S2 และ(c) S3หลังผ่านการบ่มแข็ง [11] .....	22
รูปที่ 2.12 ลักษณะของอนุภาค $\gamma'$ ในชิ้นงานทั้ง 3 ชิ้น หลังผ่านการจำลองการใช้งานที่ 1000°C โดย (a) – (d) คือชิ้นงาน S1, (e) – (h) คือชิ้นงาน S2, (i) – (l) คือชิ้นงาน S3 ที่ระยะเวลา 100, 200, 500 และ 1000 ชั่วโมง ตามลำดับ [11] .....	22
รูปที่ 2.13 ลักษณะของ TCP ในชิ้นงานทั้ง 3 ชิ้น หลังผ่านการจำลองการใช้งานที่ 1000°C โดย (a) – (d) คือชิ้นงาน S1, (e) – (h) คือชิ้นงาน S2, (i) – (l) คือชิ้นงาน S3 ที่ระยะเวลา 100, 200, 500 และ 1000 ชั่วโมง ตามลำดับ [11] .....	23

รูปที่ 2.14 โครงสร้างจุลภาคของ IN738 ที่มีปริมาณ Al แตกต่างกันหลังผ่านการทำละลายเนื้อเดียว 1125°C/6 h และบ่มแข็ง 845°C/24 h (AC) [12].....	24
รูปที่ 2.15 โครงสร้างจุลภาคของ IN738 ที่มีปริมาณ Al แตกต่างกันหลังผ่านการทำละลายเนื้อเดียว 1185°C/6 hr. และบ่มแข็ง 845°C/24 hr. (AC) [12].....	25
รูปที่ 2.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความแข็ง และอุณหภูมิการทำละลายของ IN 738 ที่มี ปริมาณ Al แตกต่างกัน [12].....	26
รูปที่ 2.17 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของ IN738 ที่มีปริมาณ Al แตกต่างกันหลังผ่านกรรมวิธีทาง ความร้อน [13].....	27
รูปที่ 2.18 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของ IN738 ที่มีปริมาณ Al แตกต่างกันหลังผ่านการจำลอง การ ใช้งานที่อุณหภูมิ 900°C นาน 110 ชั่วโมง [13].....	28
รูปที่ 2.19 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของ IN738 ที่มีปริมาณ Al แตกต่างกันหลังผ่านการจำลอง การ ใช้งานที่อุณหภูมิ 1000°C นาน 110 ชั่วโมง [13].....	28
รูปที่ 2.20 พฤติกรรมการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 900°C [13] .....	29
รูปที่ 2.21 พฤติกรรมการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1000°C [13] .....	29
รูปที่ 3.1 ลักษณะเตาหลอมแบบอาร์ค (Arc melting Furnace) model No. SA-200.....	36
รูปที่ 3.2 แผนภาพลักษณะการจำลองการใช้งาน .....	38
รูปที่ 3.3 แผงผังขั้นตอนทำการทดลอง.....	39
รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 และโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 ที่เติมอะลูมิเนียม นิกเกิล และโคบอลต์ หลังหลอมละลายแบบอาร์คสุญญากาศ รูปจาก กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง กำลังขยาย 725 เท่า ก) ชิ้นงาน 0, ข) ชิ้นงาน 1, ค) ชิ้นงาน 2, ง) ชิ้นงาน 3, จ) ชิ้นงาน 4 และ ฉ) ชิ้นงาน 5 .....	43
รูปที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 และโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 ที่เติมอะลูมิเนียม นิกเกิล และโคบอลต์ หลังหลอมละลายแบบอาร์คสุญญากาศ และทำ ละลายที่อุณหภูมิ 1175 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง รูปจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง กำลังขยาย 725 เท่า ก) ชิ้นงาน 0, ข) ชิ้นงาน 1, ค) ชิ้นงาน 2, ง) ชิ้นงาน 3, จ) ชิ้นงาน 4 และ ฉ) ชิ้นงาน 5 .....	44
รูปที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 และโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 ที่เติมอะลูมิเนียม นิกเกิล และโคบอลต์ หลังจากการหลอมละลายแบบอาร์คสุญญากาศ	

และทำละลายที่อุณหภูมิ 1175°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง รูปจากกล้องจุลทรรศน์กล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 20000 เท่า ก) ชิ้นงาน 0, ข) ชิ้นงาน 1, ค) ชิ้นงาน 2, ง) ชิ้นงาน 3, จ) ชิ้นงาน 4 และ ฉ) ชิ้นงาน 5.....	46
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงพื้นที่โดยเฉลี่ยของอนุภาค $\gamma'$ หลังการทำละลายในแต่ละชิ้นงาน .....	47
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงสัดส่วนเชิงพื้นที่โดยเฉลี่ยของเฟส $\gamma'$ หลังการทำละลายในแต่ละชิ้นงาน .....	47
รูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 และโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 ที่เติมอะลูมิเนียม นิกเกิล และโคบอลต์ หลังหลอมละลายแบบอาร์กสัณฐานภาค และทำ ละลายที่อุณหภูมิ 1175 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 845 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง รูปจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง กำลังขยาย 725 เท่า ก) ชิ้นงาน 0, ข) ชิ้นงาน 1, ค) ชิ้นงาน 2, ง) ชิ้นงาน 3, จ) ชิ้นงาน 4 และ ฉ) ชิ้นงาน 5.....	49
รูปที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 และโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 ที่เติมอะลูมิเนียม นิกเกิล และโคบอลต์ หลังหลอมละลายแบบอาร์กสัณฐานภาค และทำ ละลายที่อุณหภูมิ 1175°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 845°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง รูปจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 20000 เท่า ก) ชิ้นงาน 0, ข) ชิ้นงาน 1, ค) ชิ้นงาน 2, ง) ชิ้นงาน 3, จ) ชิ้นงาน 4 และ ฉ) ชิ้นงาน 5.....	51
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่าความกลมโดยเฉลี่ยของอนุภาค $\gamma'$ หลังการบ่มแข็งในแต่ละชิ้นงาน .....	52
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงพื้นที่โดยเฉลี่ยของอนุภาค $\gamma'$ หลังการบ่มแข็งในแต่ละชิ้นงาน.....	53
รูปที่ 4.10 กราฟสามมิติของการเปลี่ยนแปลงธาตุผสมนิกเกิล และโคบอลต์ ต่อขนาดอนุภาค $\gamma'$ หลัง บ่มแข็งที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละชิ้นงาน .....	54
รูปที่ 4.11 กราฟสามมิติของการเปลี่ยนแปลงธาตุผสมนิกเกิล และโคบอลต์ ต่อขนาดอนุภาค $\gamma'$ หลัง บ่มแข็งที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละชิ้นงาน (มองกราฟด้านบน) .....	54
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงสัดส่วนเชิงพื้นที่โดยเฉลี่ยของอนุภาค $\gamma'$ หลังการบ่มแข็งในแต่ละชิ้นงาน ....	55
รูปที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 และโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 ที่เติมอะลูมิเนียม นิกเกิล และโคบอลต์ หลังหลอมละลายแบบอาร์กสัณฐานภาค และ ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนมาตรฐาน จากนั้นจำลองการใช้งานอุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง กำลังขยาย 725 เท่า ก) ชิ้นงาน 0, ข) ชิ้นงาน 1, ค) ชิ้นงาน 2, ง) ชิ้นงาน 3, จ) ชิ้นงาน 4 และ ฉ) ชิ้นงาน 5.....	56

รูปที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 และโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 ที่เติมอะลูมิเนียม นิกเกิล และโคบอลต์ หลังหลอมละลายแบบอาร์กสัณฐานอากาศ และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนมาตรฐาน จากนั้นจำลองการใช้งานอุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง กำลังขยาย 7250 เท่า ก) ชิ้นงาน 0, ข) ชิ้นงาน 1, ค) ชิ้นงาน 2, ง) ชิ้นงาน 3, จ) ชิ้นงาน 4 และ ฉ) ชิ้นงาน 5..... 57

รูปที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 และโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 ที่เติมอะลูมิเนียม นิกเกิล และโคบอลต์ หลังหลอมละลายแบบอาร์กสัณฐานอากาศ และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนมาตรฐาน จากนั้นจำลองการใช้งานอุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง รูปจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 20000 เท่า ก) ชิ้นงาน 0, ข) ชิ้นงาน 1, ค) ชิ้นงาน 2, ง) ชิ้นงาน 3, จ) ชิ้นงาน 4 และ ฉ) ชิ้นงาน 5..... 59

รูปที่ 4.16 กราฟแสดงค่าความกลมโดยเฉลี่ยของอนุภาค  $\gamma'$  ภายหลังจากจำลองการใช้งานอุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง ในแต่ละชิ้นงาน..... 60

รูปที่ 4.17 กราฟแสดงพื้นที่โดยเฉลี่ยของอนุภาค  $\gamma'$  ภายหลังจากจำลองการใช้งานอุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง ในแต่ละชิ้นงาน ..... 61

รูปที่ 4.18 กราฟสามมิติของการเปลี่ยนแปลงธาตุผสมนิกเกิล และโคบอลต์ ต่อขนาดอนุภาค  $\gamma'$  หลังจำลองการใช้งานอุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมงที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละชิ้นงาน ..... 62

รูปที่ 4.19 กราฟแสดงสัดส่วนเชิงพื้นที่โดยเฉลี่ยของเฟส  $\gamma'$  ภายหลังจากจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง ..... 63

รูปที่ 4.20 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 และโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 ที่เติมอะลูมิเนียม นิกเกิล และโคบอลต์ หลังการหลอมละลายแบบอาร์กสัณฐานอากาศ และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนมาตรฐาน จากนั้นจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง กำลังขยาย 725 เท่า ก) ชิ้นงาน 0, ข) ชิ้นงาน 1, ค) ชิ้นงาน 2, ง) ชิ้นงาน 3, จ) ชิ้นงาน 4 และ ฉ) ชิ้นงาน 5..... 65

รูปที่ 4.21 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 และโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 ที่เติมอะลูมิเนียม นิกเกิล และโคบอลต์ หลังหลอมละลายแบบอาร์กสัณฐานอากาศ และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนมาตรฐาน จากนั้นจำลองการใช้งานอุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง กำลังขยาย 7250 เท่า ก) ชิ้นงาน 0, ข) ชิ้นงาน 1, ค) ชิ้นงาน 2, ง) ชิ้นงาน 3, จ) ชิ้นงาน 4 และ ฉ) ชิ้นงาน 5..... 66



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงสัดส่วนเชิงพื้นที่โดยเฉลี่ยของเฟส  $\gamma'$  ภายหลังจากการใช้งานที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง..... 67

รูปที่ 4.23 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 และโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 ที่เติมอะลูมิเนียม นิกเกิล และโคบอลต์ หลังการหลอมละลายแบบอาร์กสตูญญากาศ และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนมาตรฐาน จากนั้นจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง รูปจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 20000 เท่า ก) ชิ้นงาน 0, ข) ชิ้นงาน 1, ค) ชิ้นงาน 2, ง) ชิ้นงาน 3, จ) ชิ้นงาน 4 และ ฉ) ชิ้นงาน5 ..... 68

รูปที่ 4.24 กราฟแสดงค่าความกลมโดยเฉลี่ยของอนุภาค  $\gamma'$  ขนาดใหญ่ ภายหลังจากการใช้งานอุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง ในแต่ละชิ้นงาน ..... 69

รูปที่ 4.25 กราฟแสดงพื้นที่โดยเฉลี่ยของอนุภาค  $\gamma'$  ขนาดใหญ่ ภายหลังจากการใช้งานอุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง ในแต่ละชิ้นงาน..... 70

รูปที่ 4.26 กราฟสามมิติของการเปลี่ยนแปลงธาตุผสมนิกเกิล และโคบอลต์ ต่อขนาดอนุภาค  $\gamma'$  หลังจำลองการใช้งานอุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมงที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละชิ้นงาน ..... 71

รูปที่ 4.27 กราฟเปรียบเทียบขนาดอนุภาค  $\gamma'$  ภายหลังจากจำลองการใช้งานที่ 900°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง และภายหลังจากจำลองการใช้งานที่ 1000°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง ..... 72

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

โลหะผสมพิเศษ (Superalloys) [1] ถูกพัฒนาขึ้นในประเทศสหรัฐอเมริกาในช่วงคริสต์ศักราช 1930 เพื่อพัฒนาหัวสตูที่สามารถทนความร้อนได้ดีมาใช้งานแทน สเตนเลสสตีลในเครื่องยนต์อากาศยาน โดยเริ่มต้นพัฒนาจากโลหะผสมนิโครม (Nichrome alloy) ซึ่งเป็นโลหะผสมที่มีปริมาณธาตุ นิกเกิล (Nickel, Ni) ประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และปริมาณธาตุ โครเมียม (Chromium, Cr) 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จนกระทั่งคริสต์ศักราช 1940 ได้มีการพัฒนาโลหะผสมพิเศษสำเร็จเป็นครั้งแรกคือ นิโมนิก 75 (Nimonic 75) ซึ่งเกิดจากการผสมนิโครมเข้ากับ ไทเทเนียม (Titanium, Ti) 0.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และคาร์บอน (Carbon, C) 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้มีสมบัติทางกลที่อุณหภูมิสูงที่ดี

โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล (Nickel based superalloys) เป็นโลหะผสมพิเศษประเภทหนึ่งที่มีเนื้อพื้นเป็นนิกเกิล และมีการผสมธาตุอื่นลงไปเช่น โครเมียม (Chromium, Cr), อะลูมิเนียม (Aluminium, Al), ไทเทเนียม (Titanium, Ti) เป็นต้น เพื่อพัฒนาสมบัติทางกลที่อุณหภูมิสูงให้ดียิ่งขึ้น โดยในปัจจุบันมีการใช้งานโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลอยู่หลายเกรดเช่น จีทีดี 111 (GTD 111), ยูดีเมท 500 (Udimet 500), เอ็มจีเอ 1400 (MGA 1400), อินโคเนล 738 (Inconel 738, IN738) เป็นต้น โดยโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลแต่ละเกรดมีชนิดธาตุผสม และปริมาณของธาตุผสมแตกต่างกันไปเพื่อให้ได้คุณสมบัติที่ดีเหมาะสมต่อการใช้งานในงานที่แตกต่างกันไป

โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรดอินโคเนล 738 (Inconel 738, IN738) ถูกพัฒนาขึ้นที่ Paul D. Merica Research Laboratory [2] โดยจุดมุ่งหมายในการพัฒนาเพื่อต้องการโลหะผสมพิเศษชนิดใหม่ที่มีความแข็งแรงเหมือนโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรดอินโคเนล 713 (Inconel 713, IN713) และมีคุณสมบัติความต้านทานการทำปฏิกิริยากับสารประกอบกำมะถัน (Sulfidation resistance) และความต้านทานการรวมตัวกับออกซิเจน (Oxidation Resistance) ที่อุณหภูมิสูงเหมือนโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรดยูดีเมท 500 โดยปัจจุบันในประเทศไทยมีการใช้โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรดอินโคเนล 738 ในอุตสาหกรรมโรงไฟฟ้าพลังกังหันก๊าซโดยใช้โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรดอินโคเนล 738 ในส่วนของใบพัดของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ (Gas turbine

blades) โดยอุณหภูมิที่ใช้งานใบพัดของเครื่องยนต์กังหันก๊าซอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 730 – 1,370 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงมากและหากมีการใช้งานที่อุณหภูมิสูงมากเป็นเวลานานจะทำให้สมบัติทางกลที่อุณหภูมิสูงของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเปลี่ยนแปลงไป

สมบัติทางกลที่อุณหภูมิสูงของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลจะเปลี่ยนแปลงไปนั้นมาจากการที่โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเปลี่ยนแปลงไป [3] เช่นเฟสแกมมาไพรม์ (Gamma prime,  $\gamma'$ ) และเฟสคาร์ไบด์ซึ่งทั้งคู่เป็นกลไกที่สำคัญในการให้ความแข็งแรงในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลนั้นมีขนาด และรูปร่างเปลี่ยนแปลงไปจากก่อนหน้าการใช้งานที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน หรือการเกิดขึ้นมาของเฟสที่มีความเปราะและเป็นจุดศูนย์รวมความเค้น (Topologically close-packed phase, TCP phase) ก็สามารถทำให้สมบัติทางกลที่อุณหภูมิสูงของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเปลี่ยนแปลงไปได้ โดยปกติการเติมธาตุผสมเพิ่มเติมลงในโลหะผสมพิเศษจะสามารถปรับปรุงให้โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลมีความเสถียรของโครงสร้างจุลภาคเมื่อผ่านการใช้งานที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานได้ดียิ่งขึ้นดังนั้นในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาผลของธาตุ โคบอลต์ (Cobalt, Co) อะลูมิเนียม (Aluminium, Al) และนิกเกิล (Nickel, Ni) ในปริมาณธาตุผสมที่แตกต่างกันที่ใส่ผสมลงในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรดอินโคเนล 738 ต่อโครงสร้างจุลภาค และความเสถียรของโครงสร้างจุลภาคหลังจากผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลาหนึ่งเพื่อใช้เป็นแนวทางในการหาส่วนผสมที่เหมาะสมของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรดใหม่ต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของธาตุผสมนิกเกิล โคบอลต์ และนิกเกิลผสมโคบอลต์ที่เติมลงในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรดอินโคเนล 738 ที่มีการเติมอะลูมิเนียมเพิ่ม 1% โดยน้ำหนัก ต่อโครงสร้างจุลภาค และความเสถียรของโครงสร้างจุลภาคหลังจากผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลาหนึ่ง

1.2.2 เพื่อศึกษาเฟสต่างๆในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลที่อาจจะเกิดขึ้นมาหลังจากผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลาหนึ่ง

1.2.3 เพื่อศึกษาแนวทางความเป็นไปได้ในการผลิตโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรดใหม่ที่มีความเสถียรของโครงสร้างจุลภาคที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานได้ดียิ่งขึ้น

### 1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 ศึกษาปริมาณธาตุผสมต่างๆที่อยู่ในโลหะผสมเนื้อพื้นนิกเกิลเกรดอินโคเนล 738 ที่ได้รับมาจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตด้วยเครื่องมือสเปกโตรออปติคอลอิมิซชันสเปกโตรมิเตอร์ (Spark optical emission spectrometer, OES)

1.3.2 ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรดอินโคเนล 738 ก่อนและหลังเพิ่มเติมธาตุผสม อะลูมิเนียม 1.0% โดยน้ำหนัก การเติมธาตุโคบอลต์ 1.5%, 3.0%, 4.5%, 6.0% โดยน้ำหนัก และการเติมธาตุนิกเกิล 1.5%, 3.0%, 4.5%, 6.0% โดยน้ำหนัก หลังทำการหลอมด้วยเตาอาร์ค (Electric Arc Furnace) ภายใต้บรรยากาศก๊าซอาร์กอน

1.3.3 ศึกษาโครงสร้างจุลภาคหลังการทำละลาย (solution heat treatment) ที่อุณหภูมิ 1,175 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope, OM)

1.3.4 ศึกษาโครงสร้างจุลภาคหลังทำการบ่มแข็ง (Aging) ที่อุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

1.3.5 ศึกษาโครงสร้างจุลภาคหลังทำการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และ 1000 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 400 ชั่วโมง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงผลของการเติมธาตุนิกเกิล โคบอลต์ และนิกเกิลผสมโคบอลต์ที่เติมลงในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรดอินโคเนล 738 ที่มีการเติมอะลูมิเนียมเพิ่ม 1% โดยน้ำหนัก ต่อโครงสร้างจุลภาค และความเสถียรของโครงสร้างจุลภาคหลังจากผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลา

1.4.2 ทราบถึงความเป็นไปได้ของเฟสต่างๆในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลที่อาจจะเกิดขึ้นมาหลังจากผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลา

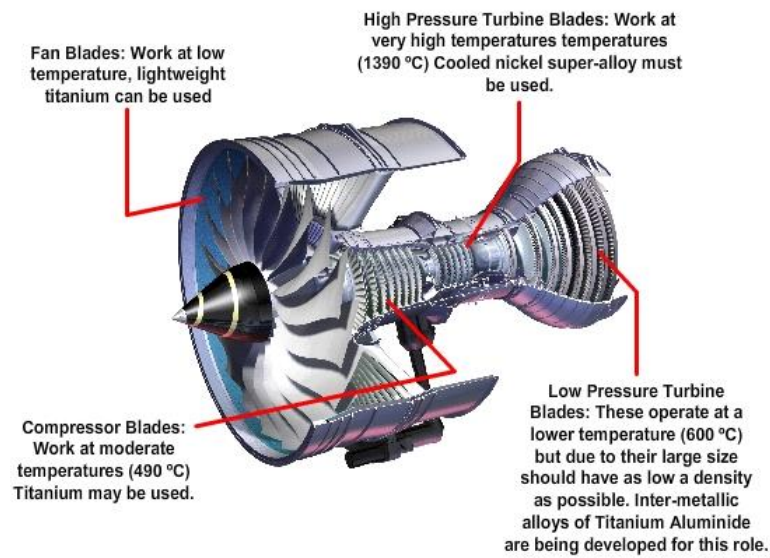
1.4.3 ทราบถึงแนวทางการเป็นไปได้ในการผลิตโลหะผสมพิเศษเนื้อพ่นนิกเกิลเกรดใหม่ที่มีความเสถียรของโครงสร้างจุลภาคที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานได้ดียิ่งขึ้น



## บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม

### 2.1 โลหะผสมพิเศษ [1, 3-5]

โลหะผสมพิเศษถูกพัฒนาขึ้นครั้งแรกเพื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูงแทนสแตนเลสสตีล โดยโลหะผสมพิเศษมีสมบัติเด่นในเรื่องมีความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง มีความต้านทานความล้า (fatigue) ที่ดี มีการหดความคืบ (Creep Resistant) สูง และมีความต้านทานการกัดกร่อน (Corrosion Resistant) ที่อุณหภูมิสูง ด้วยสมบัติเด่นเหล่านี้โลหะผสมพิเศษจึงถูกนำมาใช้งานในงานที่มีการใช้อุณหภูมิมากมาย เช่นการใช้งานโลหะผสมพิเศษในอุตสาหกรรมโรงไฟฟ้าพลังกังหันก๊าซโดยใช้โลหะผสมพิเศษในส่วนของใบพัดของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ (Gas turbine blades) โดยอุณหภูมิที่ใช้งานใบพัดของเครื่องยนต์กังหันก๊าซอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 730 – 1,370 องศาเซลเซียส การใช้งานเป็นชิ้นส่วนส่วนใบพัด (turbine blades) ในเครื่องยนต์ส่วนปีกของเครื่องบินเจ็ท ซึ่งมีการใช้งานที่อุณหภูมิสูงถึง 1,390 องศาเซลเซียส เป็นต้น



รูปที่ 2.1 รูปลักษณะเครื่องยนต์ส่วนปีกของเครื่องบินเจ็ทที่มีการใช้งานโลหะผสมพิเศษ [6]

โลหะผสมพิเศษนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มตามธาตุที่เป็นเนื้อพื้นของโลหะผสมพิเศษ

กลุ่มที่ 1 โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล (Nickel base superalloys)

เป็นโลหะผสมพิเศษที่มีส่วนผสมหลักเป็นนิกเกิลโดยปกติมีนิกเกิลผสมอยู่ในปริมาณมากกว่า 40% โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลนั้นจะมีกลไกการเพิ่มความแข็งแรงหลักๆ 3 ส่วนคือ จากการเกิดสารละลายของแข็ง (Solid solution strengthening), จากตะกอนแกมมาไพรม์ (Gamma prime,  $\gamma'$ ) และจากเฟสคาร์ไบด์ที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ นอกจากสามส่วนหลักนี้ ในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลที่มีการเติมไนโอเบียม จะมีการกลไกการเพิ่มความแข็งแรงจากตะกอนแกมมาดับเบิลไพรม์ (Gamma double prime,  $\gamma''$ ) โลหะผสมพิเศษกลุ่มนี้มีการใช้งานอย่างกว้างขวางทั้งในอุตสาหกรรมการผลิตไฟฟ้า อุตสาหกรรมเครื่องบิน อุตสาหกรรมปิโตรเคมี ใช้เป็นโลหะผสมเพื่อความต้านทานแม่เหล็กและไฟฟ้า เป็นต้น

กลุ่มที่ 2 โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นเหล็ก-นิกเกิล (Iron – Nickel base superalloys)

โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นเหล็ก-นิกเกิลจะมีส่วนผสมหลักคือ นิกเกิล 25 – 60 % และเหล็ก 15 – 60 % โลหะผสมพิเศษกลุ่มนี้จะมีกลไกการเพิ่มความแข็งแรงเหมือนโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นเหล็ก-นิกเกิล จะมีการลดปริมาณส่วนผสมของนิกเกิลลงน้อยกว่าโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล แต่จะเพิ่มส่วนผสมของเหล็กขึ้นมาแทนส่วนผสมนิกเกิลที่ลดลง โดยการเพิ่มส่วนผสมของเหล็กแทนส่วนผสมของนิกเกิลมีข้อดีคือทำให้ต้นทุนในการผลิตโลหะผสมพิเศษมีราคาถูกลง แต่จะทำให้ใช้งานโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นเหล็ก-นิกเกิลได้ช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่าโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล

กลุ่มที่ 3 โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นโคบอลต์ (Cobalt-base superalloys)

โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นโคบอลต์มีส่วนผสมหลักคือโคบอลต์ โดยทั่วไปจะมีส่วนผสมของโคบอลต์อยู่ในช่วง 35-60% โลหะผสมพิเศษกลุ่มนี้จะมีกลไกการเพิ่มความแข็งแรงเพียง 2 ส่วน คือ จากการเกิดสารละลายของแข็ง และจากเฟสคาร์ไบด์ที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ เนื่องจากโลหะผสมพิเศษกลุ่มนี้มีส่วนผสมหลักเป็นโคบอลต์ทำให้โลหะผสมพิเศษกลุ่มนี้มีน้ำหนักมากกว่าสองกลุ่มแรก ดังนั้นการใช้งานโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นโคบอลต์จะเหมาะสมกับการใช้เป็นชิ้นส่วนในงานที่ไม่มีการเคลื่อนที่

ตารางที่ 2.1 ปริมาณธาตุผสมต่างๆที่อยู่ในโลหะผสมพิเศษทั้ง 3 กลุ่ม [3]

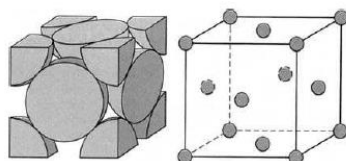
ธาตุผสม	เปอร์เซ็นต์ (wt.%)	
	กลุ่ม Ni base และ Fe-Ni base	กลุ่ม Co base
Cr	5 - 25	19 - 30
Mo, W	0 - 12	0 - 11
Al	0 - 6	0 - 4.5
Ti	0 - 6	0 - 4
Co	0 - 20	...
Ni	...	0 - 22
Nb	0 - 5	0 - 4
Ta	0 - 12	0 - 9
Re	0 - 6	0 - 2

## 2.2 โครงสร้างจุลภาคในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล [1, 3, 7, 8]

ในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลจะมีโครงสร้างจุลภาคหลักอยู่ 4 ส่วน คือ

### 2.2.1 เนื้อพื้นแกมมา (Gamma matrix, $\gamma$ )

เนื่องจากโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล มีปริมาณนิกเกิลสูงทำให้โครงสร้างเนื้อพื้น  $\gamma$  มีโครงสร้างผลึกเป็น เฟซเซ็นเตอร์คิวบิก (Face-centered cubic, FCC) หรือออสเทนไนต์ (Austenite) ทำให้  $\gamma$  มีสมบัติทางไฟฟ้าเป็น nonmagnetic ภายในเนื้อพื้นแกมมาจะมีปริมาณธาตุที่สามารถเพิ่มความแข็งแรงของโลหะผสมพิเศษแบบสารละลายของแข็งอยู่มาก เช่น โคบอลต์, เหล็ก, โครเมียม, โมลิบดีนัม และทังสแตน โดยโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลทุกเกรดจะต้องมีเนื้อพื้นเป็นเฟส  $\gamma$



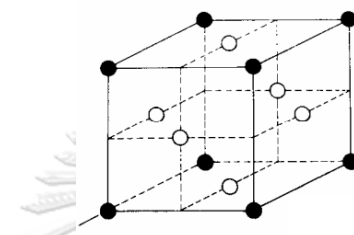
รูปที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างแบบ เฟซเซ็นเตอร์คิวบิก (Face-centered cubic, FCC) [7]



## 2.2.2 แกมมาไพรม์ (Gamma prime, $\gamma'$ )

แกมมาไพรม์ เป็นสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic compound) มีโครงสร้างผลึกเหมือนเนื้อพื้นแกมมา คือเฟสเซ็นเตอร์คิวบิก และมีสูตรทางเคมีคือ  $A_3B$  โดย A คือ นิกเกิล และ B คือ ธาตุที่ละลายอยู่ในเนื้อพื้น เช่น อะลูมิเนียม ไทเทเนียม แกมมาไพรม์มักพบอยู่ในรูป  $Ni_3(Al,Ti)$

- Al or Ti atoms
- Ni atoms



รูปที่ 2.3 ลักษณะโครงสร้างเฟสเซ็นเตอร์คิวบิกของแกมมาไพรม์ [8]

การเกิดอนุภาคแกมมาไพรม์ตกตะกอนบนเนื้อพื้น หากอนุภาคแกมมาไพรม์มีขนาดที่เหมาะสมจะสามารถช่วยเพิ่มความแข็งแรงในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลได้ เนื่องจากตะกอนแกมมาไพรม์จะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน (Dislocation)

เนื่องจากธาตุผสมที่ละลายอยู่ในเนื้อพื้นมีขนาดอะตอมไม่เท่ากับขนาดอะตอมของนิกเกิลทำให้ค่าแลตทิซ พารามิเตอร์ (lattice parameters) ของเนื้อพื้นแกมมา และแกมมาไพรม์มีค่าไม่เท่ากัน โดยความแตกต่างแลตทิซ พารามิเตอร์นี้จะเรียกว่าแลตทิซมismatch (Lattice mismatch) ซึ่งแลตทิซมismatch นั้นจะเป็นตัวกำหนดลักษณะรูปร่างของแกมมาไพรม์ ที่จะเกิดขึ้นมา กรณีค่าแลตทิซมismatch อยู่ในช่วง 0 – 0.2 % อนุภาคแกมมาไพรม์จะมีลักษณะรูปร่างทรงกลม กรณีแลตทิซมismatch อยู่ในช่วง 0.5 - 1 % อนุภาคแกมมาจะมีลักษณะลูกบาศก์ และกรณีค่าแลตทิซมismatch มากกว่า 1.25 % ตะกอนแกมมาไพรม์จะมีลักษณะเป็นแผ่น [3]

### 2.2.3 คาร์ไบด์ (carbides) [1, 3]

ในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลนั้นมีปริมาณคาร์บอนผสมอยู่ 0.02 – 0.2 % ทำให้โลหะธาตุผสมต่างๆที่อยู่ในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลสามารถรวมตัวกับคาร์บอนเกิดเป็นคาร์ไบด์ขึ้นได้

คาร์ไบด์นั้นสามารถอยู่ได้ทั้งบริเวณขอบเกรน และภายในเนื้อพื้นของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล หากอนุภาคคาร์ไบด์กระจายตัวสม่ำเสมออยู่ในเนื้อพื้นของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลด้วยกลไกการขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันเหมือนเกมมาไพร์ม แต่เกมมาไพร์มมีผลต่อการเพิ่มความแข็งแรงให้โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลมากกว่าคาร์ไบด์ หากอนุภาคคาร์ไบด์อยู่บริเวณขอบเกรนและมีลักษณะเป็นเม็ดไม่ต่อกันจะทำให้ขอบเกรนเกิดการเลื่อนได้ยากขึ้นส่งผลให้ความต้านทานความคืบในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลดีขึ้น หากคาร์ไบด์บริเวณขอบเกรนมีลักษณะเชื่อมต่อกันตามแนวขอบเกรนเกินเป็นฟิล์มจะส่งผลเสียต่อโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเพราะบริเวณฟิล์มคาร์ไบด์นั้นจะเป็นจุดที่เกิดการแตกหักต่อเนื่องตามขอบผลึกได้ง่าย

คาร์ไบด์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทตามลักษณะการเกิด

ประเภทที่ 1 คาร์ไบด์ปฐมภูมิ (Primary carbide) เป็นคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นขณะเย็นตัวของน้ำโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลจนเป็นของแข็ง คาร์ไบด์ประเภทนี้มีชนิดเดียวคือ MC คาร์ไบด์

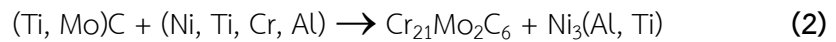
MC คาร์ไบด์ คาร์ไบด์ชนิดนี้สามารถเจอได้ทั้งบริเวณขอบเกรนและบริเวณเนื้อพื้น โดยที่ M สามารถแทนได้ด้วยโลหะหลายชนิดคือ Ta, Nb, Ti, Hf, V, Mo, และ W ในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลที่มีการเติม ไนโอเบียม และแทนทาลัมในปริมาณที่มาก MC คาร์ไบด์จะมีความเสถียรที่สูงนั่นก็คือ MC จะไม่สลายได้ง่ายในการใช้งานหรือการทำละลาย (solution treatment) ในช่วงอุณหภูมิ 1,200 – 1,260°C

ประเภทที่ 2 คาร์ไบด์ทุติยภูมิ (Secondary carbides) เป็นคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวของคาร์ไบด์ปฐมภูมิขณะผ่านกรรมวิธีทางความร้อน หรือการใช้งานที่อุณหภูมิสูงมี 2 ชนิดคือ  $M_{23}C_6$  และ  $M_6C$

$M_{23}C_6$  คาร์ไบด์ เกิดจากการสลายตัวของคาร์ไบด์ปฐมภูมิขณะผ่านกรรมวิธีทางความร้อน หรือการใช้งานที่อุณหภูมิประมาณ 760 – 980°C โดยปกติมักพบ  $M_{23}C_6$  คาร์ไบด์ตรงบริเวณขอบเกรน โดยปฏิกิริยาการเกิด  $M_{23}C_6$  สามารถเขียนสมการเคมีอย่างง่ายได้คือ



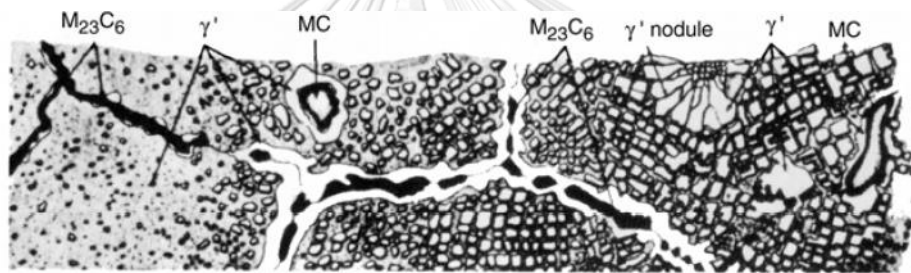
หรือสามารถเขียนเป็นสมการเต็มได้คือ



$M_6C$  คาร์ไบด์ จะเกิดในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลที่มีการเติมโลหะทนความร้อนเช่น Mo ในปริมาณที่สูง โดย  $M_6C$  คาร์ไบด์จะเกิดจากการสลายตัวของคาร์ไบด์ปฐมภูมิขณะผ่านกรรมวิธีทางความร้อน หรือการใช้งานที่อุณหภูมิประมาณ 815 – 980°C ซึ่ง  $M_6C$  นั้นเป็นคาร์ไบด์ทุติยภูมิที่มีความเสถียรที่อุณหภูมิสูงมากกว่า  $M_{23}C_6$  คาร์ไบด์ปฏิกิริยาการเกิด  $M_6C$  สามารถเขียนสมการเคมีอย่างง่ายได้คือ



หรือสามารถเขียนเป็นสมการเต็มได้คือ



รูปที่ 2.4 ลักษณะคาร์ไบด์ในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล [3]

#### 2.2.4 TCP phases [1, 3]

เป็นเฟสที่มีความแข็งแรงสูงเกิดขึ้นขณะโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลผ่านกรรมวิธีทางความร้อนหรือใช้งานที่อุณหภูมิสูง TCP phases ที่พบในโลหะผสมเนื้อพื้นนิกเกิลมีหลายชนิดเช่น  $\mu$ ,  $\sigma$ , และ laves phase เป็นต้น เฟส TCP เหล่านี้เป็นอันตรายต่อโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเนื่องจากมีลักษณะเป็นแผ่นบาง แต่มีความแข็งแรงสูงทำให้เป็นจุดกำเนิดการแตกให้ และเป็นจุดที่การแตกหักจะแผ่ขยายไปได้ โดยเฟสที่เป็นอันตรายเหล่านี้มักพบว่าโตออกมาจากบริเวณคาร์ไบด์ที่ขอบเกรน

## 2.3 อิทธิพลของธาตุผสมในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิล [1-3]

ในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิลจะมีการใส่โลหะผสมลงไปหลายชนิดเพื่อพัฒนาคุณสมบัติต่างๆ ของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิลให้ดีขึ้น โดยโลหะผสมผสมแต่ละชนิดจะส่งต่อโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิลต่างกันออกไป โลหะผสมที่สำคัญที่ผสมลงในโลหะผสมพิเศษมีดังนี้

### 2.3.1 นิกเกิล (Nickel, Ni)

- เป็นโลหะผสมหลักของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิล ทำให้โครงสร้างพื้นเสถียร
- เป็นโลหะผสมที่ใช้ในการสร้างอนุภาค  $\gamma'$  ร่วมกับ Al, Ti, Nb, และ Ta

### 2.3.2 โครเมียม (Chromium, Cr)

- ในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิลโดยปกติจะมีโครเมียมอยู่ 6 – 22 % โดยน้ำหนัก
- โครเมียมจะเกิดเป็น  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  ช่วยต้านทานการเกิด Oxidation และ Hot corrosion
- เป็นโลหะผสมที่ใช้ในการสร้าง  $\text{M}_{23}\text{C}_6$  คาร์ไบด์
- ช่วยเพิ่มความแข็งแรงในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิลด้วยกลไกความแข็งแรงแบบสารละลายของแข็ง

### 2.3.3 โมลิบดีนัม (Molybdenum, Mo)

- ช่วยเพิ่มความแข็งแรงในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิลด้วยกลไกความแข็งแรงแบบสารละลายของแข็ง
- เป็นโลหะผสมที่ใช้ในการสร้าง MC คาร์ไบด์

### 2.3.4 ทังสเทน (Tungsten, W)

- ช่วยเพิ่มความแข็งแรงในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิลด้วยกลไกความแข็งแรงแบบสารละลายของแข็ง
- เป็นโลหะผสมที่ใช้ในการสร้าง MC คาร์ไบด์

### 2.3.5 อะลูมิเนียม (Aluminum, Al)

- อะลูมิเนียมจะเกิดเป็น  $Al_2O_3$  ช่วยต้านทานการเกิด Oxidation
- เป็นโลหะผสมที่ใช้ในการสร้างอนุภาค  $\gamma'$

### 2.3.6 ไทเทเนียม (Titanium, Ti)

- เป็นโลหะผสมที่ใช้ในการสร้างอนุภาค  $\gamma'$
- เป็นโลหะผสมที่ใช้ในการสร้าง MC คาร์ไบด์

### 2.3.7 โคบอลต์ (Cobalt, Co)

- เพิ่ม creep strength ของเฟส  $\gamma$  ที่อุณหภูมิสูง
- เพิ่ม solvus temperature ของอนุภาค  $\gamma'$

### 2.3.8 คาร์บอน (Carbon, C)

- ใช้ในการสร้างคาร์ไบด์ชนิดต่างๆ

### 2.3.9 ไนโอเบียม (Niobium, Nb)

- เป็นโลหะผสมที่ใช้ในการสร้าง MC คาร์ไบด์

### 2.3.10 แทนทาลัม (Tantalum, Ta)

- ช่วยเพิ่มความแข็งแรงในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้หนักเกิดด้วยกลไกการเกิดสารละลายของแข็ง
- เป็นโลหะผสมที่ใช้ในการสร้าง MC คาร์ไบด์

### 2.3.11 ธาตุเจือปน : กำมะถัน (Sulphur, S), ฟอสฟอรัส (Phosphorus, P), ซิลิคอน (Silicon, Si)

- เป็นสาเหตุที่ทำให้เปราะเนื่องจากการแยกตัวที่ขอบเกรน

## 2.4 โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้หนักเกรดอินโคเนล 738 (Inconel 738, IN 738) [2, 9]

โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้หนักเกรดอินโคเนล 738 (Inconel 738, IN738) ถูกพัฒนาขึ้นที่ Paul D. Merica Research Laboratory โดยจุดมุ่งหมายในการพัฒนาเพื่อต้องการโลหะผสมพิเศษ

ชนิดใหม่ที่มีความแข็งแรงเหมือนโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลเกรดอินโคเนล 713 (Inconel 713, IN713) และมีคุณสมบัติความต้านทานการทำปฏิกิริยากับสารประกอบกำมะถัน (Sulfidation resistance) และความต้านทานการรวมตัวกับออกซิเจน (Oxidation Resistance) เหมือนโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลเกรดยูติเมท 500 ในปัจจุบันโลหะผสมเนื้อพื้่นิกเกิลเกรดอินโคเนล 738 ถูกใช้งานมากในการทำใบพัดกังหันแก๊ส (Gas turbine blades) ที่ใช้งานที่อุณหภูมิสูง โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลสามารถแบ่งได้ 2 แบบตาม %โดยน้ำหนักของธาตุคาร์บอนคือ ถ้ามีปริมาณคาร์บอนประมาณ 0.15 - 0.20 %โดยน้ำหนักจะเรียกว่าเกรด IN 738C ถ้าปริมาณคาร์บอนประมาณ 0.09 - 0.13 %โดยน้ำหนักจะเรียกว่าเกรด IN 738LC โดยส่วนผสมของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลแสดงในตาราง 2.2

ตารางที่ 2.2 ปริมาณธาตุผสมต่างๆที่อยู่ในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลเกรด IN 738 [9]

Element	IN 738C (wt.%)	IN 738LC (wt.%)
C	0.15 - 0.20	0.09 - 0.13
Co	8.00 - 9.00	3.00 - 9.00
Cr	15.70 - 16.30	15.70 - 16.30
Mo	1.50 - 2.00	1.50 - 2.00
W	2.40 - 2.80	2.40 - 2.80
Ta	1.50 - 2.00	1.50 - 2.00
Nb	0.60 - 1.10	0.60 - 1.10
Al	3.20 - 3.70	3.20 - 3.70
Ti	3.20 - 3.70	3.20 - 3.70
B	0.005 - 0.015	0.07 - 0.012
Zr	0.05 - 0.15	0.03 - 0.08
Fe	0.05 max	0.05 max
Mg	0.02 max	0.02 max
Si	0.30 max	0.30 max
S	0.015 max	0.015 max
Ni	Balance	Balance

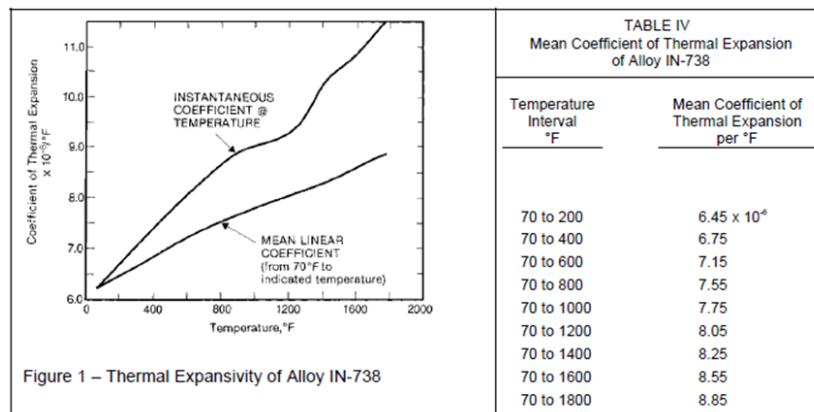
#### 2.4.1 สมบัติทางกายภาพของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรดอินโคเนล 738 [9]

- IN 738 มีความหนาแน่น 0.293 lb/cu in. (8.11 g/cu cm)
- IN 738 มีช่วงหลอมเหลวที่ 2,250 – 2,400°F (1,230 – 1,315°C)
- ค่าความร้อนจำเพาะ (Specific heat) และค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity) ที่อุณหภูมิต่างๆของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรดอินโคเนล 738 [9] แสดงในตาราง 2.3

**ตารางที่ 2.3** ค่าความร้อนจำเพาะ และค่าการนำความร้อนของ IN 738 [9]

Specific heat of Alloy IN-738		Thermal Conductivity of Alloy IN-738	
Temperature (°F)	Specific Heat (Btu/lb/°F)	Temperature (°F)	Thermal Conductivity (Btu/ft <sup>2</sup> /in/hr/°F)
70	0.100	400	82
200	0.110	600	95
400	0.120	800	108
600	0.125	1000	123
800	0.130	1200	137
1000	0.135	1400	149
1200	0.140	1600	162
1400	0.150	1800	176
1600	0.160	2000	189
1800	0.170		
2000	0.170		

- ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน ณ ที่อุณหภูมิต่างๆ และค่าเฉลี่ยจากอุณหภูมิ 70°F ถึงอุณหภูมิที่สนใจ [9] แสดงได้ในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน ณ อุณหภูมิต่างๆ และค่าเฉลี่ยจากอุณหภูมิ 70°F ถึงอุณหภูมิที่สนใจ [9]

- ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) และค่า Poisson's Ratio ของ IN 738 [9] แสดงได้ในตาราง 2.4

ตารางที่ 2.4 ค่า Modulus of elasticity และค่า Poisson's Ratio ของ IN 738 [9]

Temperature(°F)	Tension (E) psi	Tension (G) psi	Poission's Ratio $\nu$
75	29.1 x 10 <sup>6</sup>	11.3 x 10 <sup>6</sup>	0.28
200	28.3 x 10 <sup>6</sup>	11.1 x 10 <sup>6</sup>	0.27
400	27.6 x 10 <sup>6</sup>	10.8 x 10 <sup>6</sup>	0.27
600	26.8 x 10 <sup>6</sup>	10.5 x 10 <sup>6</sup>	0.28
800	26.0 x 10 <sup>6</sup>	10.1 x 10 <sup>6</sup>	0.28
1000	25.4 x 10 <sup>6</sup>	9.8 x 10 <sup>6</sup>	0.30
1200	24.3 x 10 <sup>6</sup>	9.4 x 10 <sup>6</sup>	0.30
1400	23.2 x 10 <sup>6</sup>	9.0 x 10 <sup>6</sup>	0.30
1600	21.9 x 10 <sup>6</sup>	8.5 x 10 <sup>6</sup>	0.29
1800	20.3 x 10 <sup>6</sup>	7.8 x 10 <sup>6</sup>	0.30



#### 2.4.2 สมบัติทางกลของโลหะผสมพิเศษเนื้อฟ้านิกเกิลเกรด IN 738

- สมบัติการทดสอบแรงดึง (Tensile Properties) ที่อุณหภูมิห้อง และสมบัติการทนแรงดึงที่อุณหภูมิต่างๆของโลหะผสมพิเศษเนื้อฟ้านิกเกิล [9] แสดงได้ในตาราง 2.5 และตาราง 2.6 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.5 สมบัติการทดลองดึงของ IN 738C และIN 738LC ที่อุณหภูมิห้อง [9]

	IN-738LC	IN-738C
0.2% Yield Strength, psi	130000	138000
Tensile Strength, psi	150000	159000
Elongation, %	7	5.5
Reduction of Area, %	9	5

ตารางที่ 2.6 สมบัติการทดลองดึงของ IN 738 ที่อุณหภูมิต่างๆ [9]

Temperature (°F)	Yield strength 0.2% offset (psi)	Tensile Strength (psi)	% Elogation (2 in.)	% Reduction area
70	138000	159000	5.5	5
1200	132000	153000	7	7
1400	115000	140000	6.5	9
1600	80000	112000	11	13
1800	60000	66000	13	15

- สมบัติความเค้นของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลเกรด IN 738 [9] แสดงในตาราง 2.7

ตารางที่ 2.7 ผลการทดสอบความเค้นของ IN 738 [9]

Temperature (°F)	Stress (psi)	Time, hr. for Creep Strain of				Rupture life (hr.)	Minimun Creep Rate (%/hr.)
		0.1%	0.2%	0.5%	1%		
1350	75000	10	20	75	235	1464	0.003
1350	75000	10	30	120	320	1550	0.002
1350	65000	60	250	810	1720	4666	0.0005
1350	65000	90	250	740	1900	5219	0.0004
1500	40000	12	24	110	315	1014	0.002
1500	35000	60	160	580	1140	4704	0.0004
1500	35000	130	290	680	1200	3348	0.0006
1700	17000	38	80	200	375	1263	0.003
1700	13000	400	760	2160	3100	5571	0.0002
1700	13000	140	360	1080	2080	4815	0.0004
1800	10000	30	100	200	500	1262	0.0012

#### 2.4.3 กรรมวิธีทางความร้อนในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลเกรด IN 738 [1, 3]

ในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลเกรด IN 738 จะมีกรรมวิธีทางความร้อนที่สำคัญเพื่อปรับปรุงสมบัติของโลหะผสมพิเศษหลังการหลอมจากการควบคุมการเกิดโครงสร้างจุลภาคต่างๆ ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน คือ

การทำละลาย (solution heat treatment) เป็นการอบชุบที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้เหลือโครงสร้างเนื้อพื้นเพียงเฟสเดียว แกมมาไพร์ม และคาร์ไบด์บางส่วนจะละลายกับสู่นเนื้อพื้น โดยสารละลายของแข็งที่ละลายกลับสู่นเนื้อพื้นจะค่อนข้างอิมตัวยิ่งยวด และมีสภาพกึ่งเสถียรที่อุณหภูมิห้อง

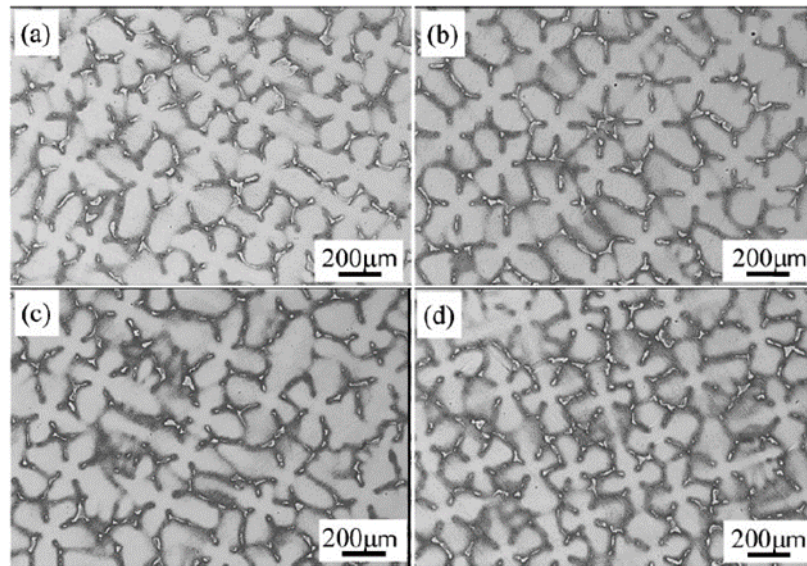
การบ่มแข็ง (Aging treatment) เป็นกรรมวิธีทางความร้อนที่ใช้ในการทำให้เกิดการตกตะกอนของอนุภาคแกมมาไพร์มขึ้นมาใหม่ให้มีขนาดและรูปร่างที่เหมาะสม จากสารละลายของแข็งอิมตัวยิ่งยวด

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.5.1 งานวิจัยเกี่ยวกับผลของโคบอลต์ในโลหะผสมเนื้อพื้นนิกเกิล

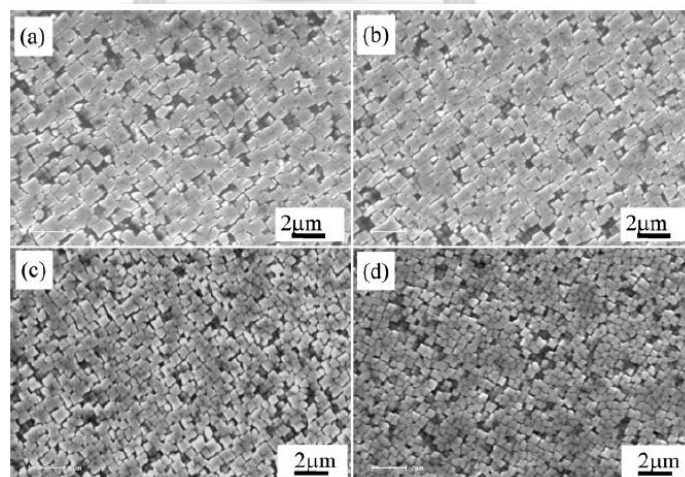
J.L. Liu และ คณะ [10] ได้ทำการเติมธาตุ Co ในปริมาณ 0, 5, 10, 15 % โดยน้ำหนัก ลงในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลที่มีส่วนผสมไดโนน้ำหนักคือ Cr 6 %, W 8 %, Mo 2 %, Al 5 %, Ti 2%, Ta 6 %, Ni bal. และได้ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคหลังเติมธาตุ Co ที่ % โดยน้ำหนักต่างๆ ทั้งก่อน และหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน โดยชิ้นงานที่เติมธาตุ Co 0, 5 และ 10 % โดยน้ำหนักจะผ่านกรรมวิธีทางความร้อนคือ  $1,305^{\circ}\text{C}/8\text{ h} + 1,080^{\circ}\text{C}/4\text{ h} + 870^{\circ}\text{C}/24\text{ h}$  และในชิ้นงานที่เติมธาตุ Co 15 % โดยน้ำหนัก จะผ่านกรรมวิธีทางความร้อนคือ  $1,295^{\circ}\text{C}/8\text{ h} + 1,080^{\circ}\text{C}/4\text{ h} + 870^{\circ}\text{C}/24\text{ h}$  หลังจากนั้นนำชิ้นงานทั้ง 4 ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนมาทดสอบการแตกหักภายใต้เงื่อนไข  $1010^{\circ}\text{C}/248\text{ MPa}$ .

จากการทดลองจะพบว่าปริมาณ Co ที่ต่างกันชิ้นงานทั้ง 4 จะไม่ส่งผลให้ระยะห่างระหว่างเดนไดรต์ปฐมภูมิ (Primary dendrite arm spacing, PDAS) มีค่าแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด โดยชิ้นงานที่เติมธาตุ Co ในปริมาณ 0, 5, 10 และ 15 % โดยน้ำหนัก จะมีค่า PDAS 284.4, 296.28, 283.64 และ 282.89  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ

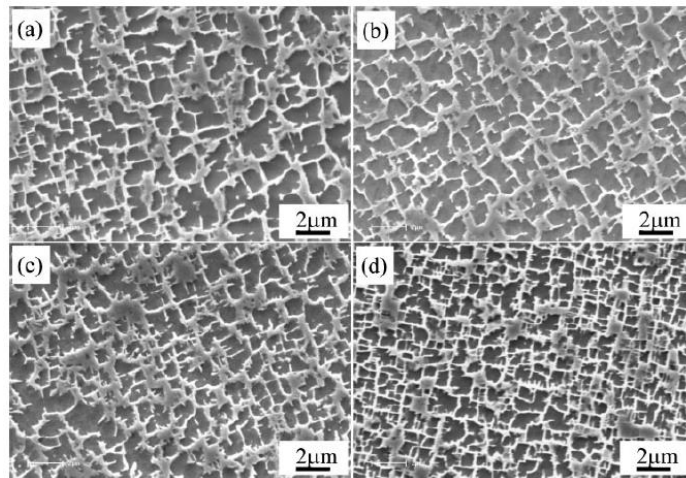


รูปที่ 2.6 เดนไดรต์ที่ได้หลังหลอมของชิ้นงานทั้ง 4 ชิ้นที่มีการเติมปริมาณธาตุ Co ต่างกัน (a) 0 wt.% (b) 5wt.% (c) 10wt.% และ(d) 15wt.% [10]

ขนาดของอนุภาค  $\gamma'$  ในชิ้นงานหลังหลอมจะมีขนาดเล็กลงเมื่อปริมาณ Co เพิ่มขึ้นทั้งในส่วน  
ของอนุภาค  $\gamma'$  บริเวณแกนเดนไดรต์ และบริเวณระหว่างเดนไดรต์ เนื่องจากการเติม Co ทำให้ค่า  
พลังงานอิสระเปลี่ยนแปลงและส่งผลให้ค่า รัศมีวิกฤต ในการเกิดอนุภาค  $\gamma'$  ลดลง โดยจะทำให้อัตราการ  
เกิดอนุภาค  $\gamma'$  เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้อนุภาค  $\gamma'$  มีขนาดเล็กลง

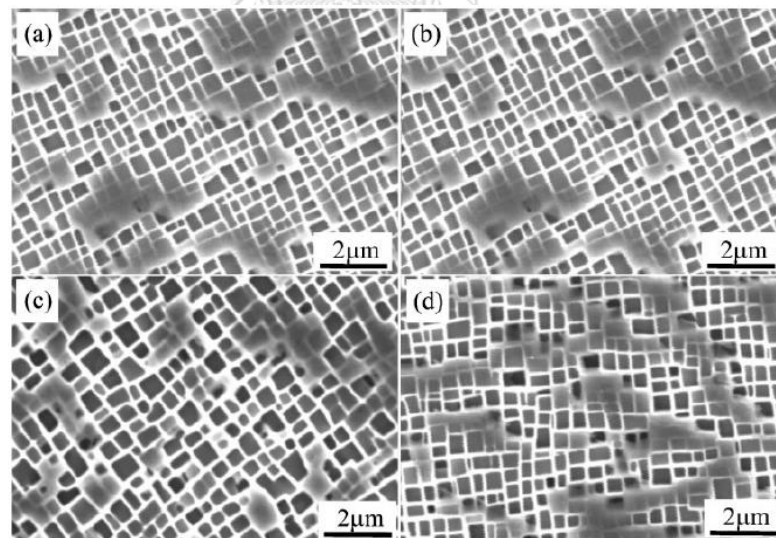


รูปที่ 2.7 ลักษณะของ  $\gamma'$  ที่แกนเดนไดรต์ของชิ้นงานทั้ง 4 ชิ้นที่มีการเติมปริมาณธาตุ Co ต่างกัน (a) 0 wt.% (b) 5 wt.% (c) 10 wt.% และ(d) 15 wt.% [10]



**รูปที่ 2.8** ลักษณะของ  $\gamma'$  ที่บริเวณใกล้ขอบเดนไดรต์ของชิ้นงานทั้ง 4 ชิ้นที่มีการเติมปริมาณธาตุ Co แตกต่างกัน (a) 0 wt.% (b) 5 wt.% (c) 10 wt.% และ(d) 15 wt.% [10]

หลังจากชิ้นงานทั้ง 4 ชิ้นผ่านกรรมวิธีทางความร้อนจะพบว่าอนุภาค  $\gamma'$  ของชิ้นงานทั้ง 4 จะมีลักษณะรูปร่างเป็นลูกบาศก์ และมีขนาดไม่ต่างกันมาก ดังนั้นปริมาณ Co ที่ต่างกันไม่มีผลต่ออนุภาค  $\gamma'$  ที่เกิดหลังชิ้นงานผ่านกรรมวิธีทางความร้อน



**รูปที่ 2.9** ลักษณะของ  $\gamma'$  ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนของชิ้นงานทั้ง 4 ชิ้นที่มีการเติมปริมาณธาตุ Co แตกต่างกัน (a) 0 wt.% (b) 5 wt.% (c) 10 wt.% และ(d) 15 wt.% [10]

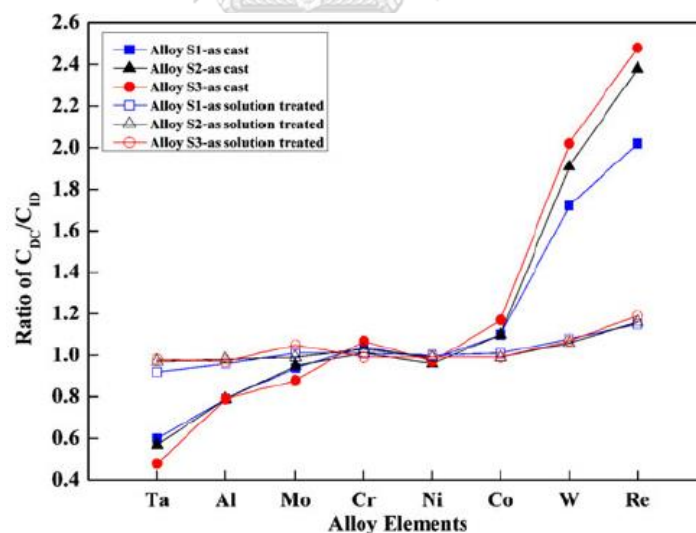
B. Wang และคณะ [11] ได้ทำการเติมธาตุ Co 4, 8.5 และ 11.5 % โดยน้ำหนัก ลงในโลหะผสมพิเศษเนื้อฟ้านิกเกิลโดยจะเรียกชื่อชิ้นงานที่มีปริมาณธาตุ Co ต่างๆกันว่า S1, S2 และ S3

ตามลำดับ ชั้นงานทั้ง 3 จะผ่านการทำละลายด้วยเงื่อนไขต่างกันตามตารางที่ 2.8 หลังจากนั้นจึงนำมาทำการบ่มแข็งตามเงื่อนไข 1170°C/ 4 h Air cooling (AC) → 870°C/4 h AC หลังจากนั้นทำการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 1,000°C เป็นระยะเวลา 100, 200, 500 และ 1,000 ชั่วโมง

ตารางที่ 2.8 เงื่อนไขการทำสารละลายเนื้อเดียวของชั้นงานทั้ง 3 ชั้น [11]

Alloy	Solution heat treatment
S1	1310 °C/1 h → 1315 °C/2 h → 1323 °C/2 h → 1328 °C/2 h → 1333 °C/3 h → 1338 °C/12 h → 1343 °C/24 h AC
S2	1304 °C/1 h → 1309 °C/2 h → 1317 °C/2 h → 1322 °C/2 h → 1327 °C/3 h → 1332 °C/12 h → 1337 °C/24 h AC
S3	1300 °C/1 h → 1305 °C/2 h → 1313 °C/2 h → 1318 °C/2 h → 1323 °C/3 h → 1328 °C/12 h → 1333 °C/24 h AC

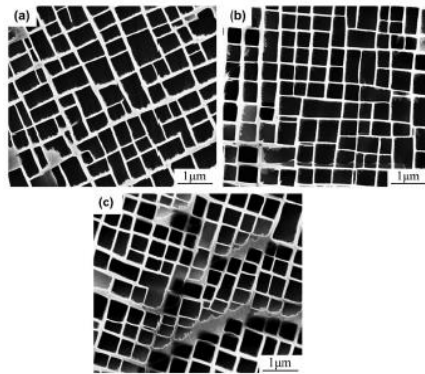
จากการทดลองพบว่าการเพิ่มปริมาณธาตุ Co จะทำให้เกิดจากแยกตัว (segregation) ของธาตุผสมเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณของธาตุผสมในแกนเดนไดรต์ และระหว่างเดนไดรต์ไม่เท่ากันโดยดูจากค่า segregation ratio (k) โดยค่า  $k = \text{ปริมาณธาตุผสมในแกนเดนไดรต์ (C}_{DC}) / \text{ปริมาณธาตุผสมระหว่างเดนไดรต์ (C}_{ID})$  การแยกตัวสามารถแก้ไขได้ด้วยการทำละลายเนื้อเดียว



รูปที่ 2.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง k และธาตุผสมต่างๆ ในชั้นงานทั้ง 3 ชั้น [11]

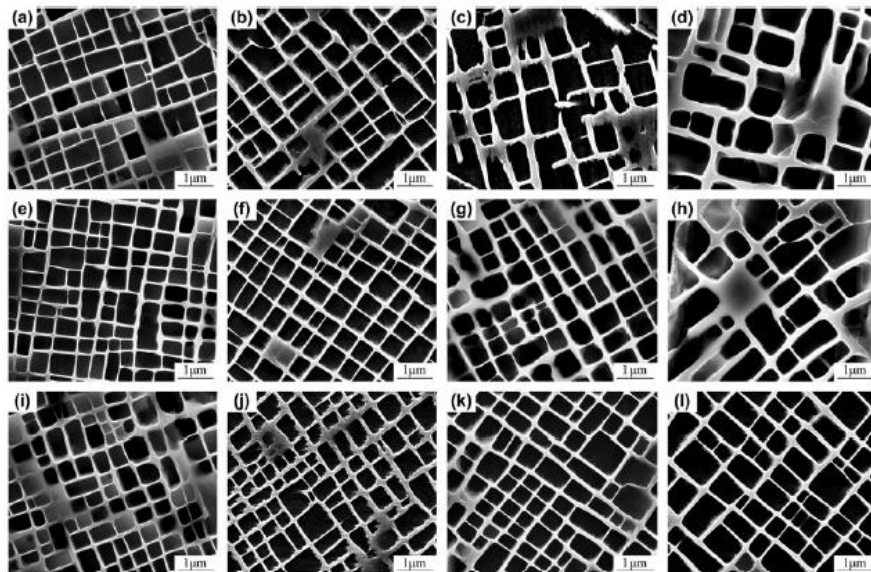
ชั้นงานทั้ง 3 ชั้นหลังการทำการบ่มแข็งจะพบว่าชั้น S1 จะมีลักษณะรูปร่างของอนุภาค  $\gamma'$  เป็นลูกบาศก์มากที่สุด แต่ทั้งสามชั้นมีส่วนโดยปริมาตร (Volume fraction) ของเฟส  $\gamma'$  ประมาณ

75 % ทั้ง 3 ชั้น ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงปริมาณ Co จะไม่ส่งผลต่อสัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาค  $\gamma'$  แต่จะพบว่าการเพิ่มปริมาณ Co จะลดขนาดของอนุภาค  $\gamma'$  ลง



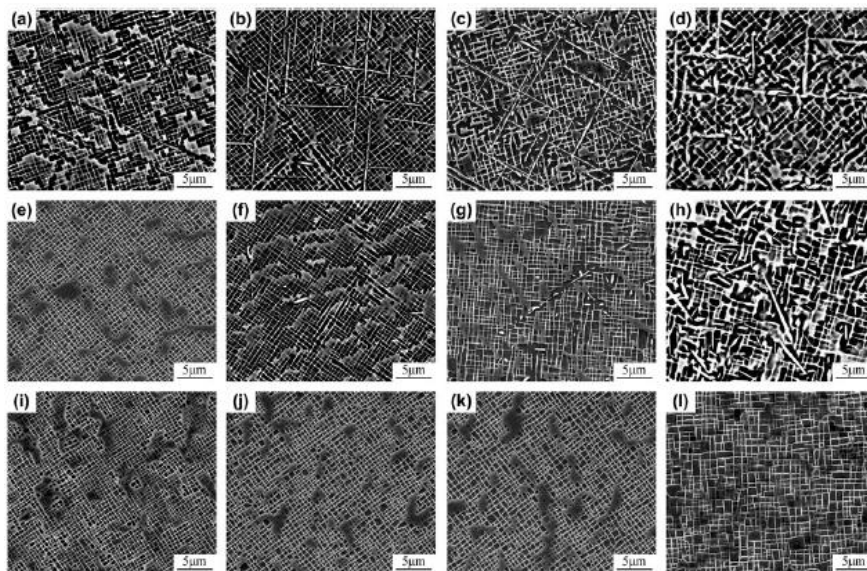
รูปที่ 2.11 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน (a) S1, (b) S2 และ (c) S3 หลังผ่านการบ่มแข็ง [11]

อัตราการโตของ (Coarsening rate) ของ  $\gamma'$  ระหว่างการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 1000°C จะลดลงเมื่อมีการเพิ่มปริมาณ Co หรือก็คือการเพิ่ม Co จะช่วยให้  $\gamma'$  เสถียรที่อุณหภูมิสูง



รูปที่ 2.12 ลักษณะของอนุภาค  $\gamma'$  ในชิ้นงานทั้ง 3 ชั้น หลังผ่านการจำลองการใช้งานที่ 1000°C โดย (a) – (d) คือชิ้นงาน S1, (e) – (h) คือชิ้นงาน S2, (i) – (l) คือชิ้นงาน S3 ที่ระยะเวลา 100, 200, 500 และ 1000 ชั่วโมง ตามลำดับ [11]

เฟส TCP ประเภท  $\sigma$  จะเกิดขึ้นมาระหว่างการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ  $1,000^{\circ}\text{C}$  ได้ในชิ้นงาน S1 และ S2 แต่ในชิ้นงาน S3 ที่มีการเติมธาตุ Co มากสุดจะไม่พบเฟส TCP ดังนั้นการเพิ่มปริมาณธาตุ Co จะเป็นการขัดขวางการเกิดเฟส TCP



รูปที่ 2.13 ลักษณะของ TCP ในชิ้นงานทั้ง 3 ชิ้น หลังผ่านการจำลองการใช้งานที่  $1000^{\circ}\text{C}$  โดย (a) – (d) คือชิ้นงาน S1, (e) – (h) คือชิ้นงาน S2, (i) – (l) คือชิ้นงาน S3 ที่ระยะเวลา 100, 200, 500 และ 1000 ชั่วโมง ตามลำดับ [11]

## 2.5.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับผลของอะลูมิเนียมในโลหะผสมเนื้อพื้นนิกเกิล

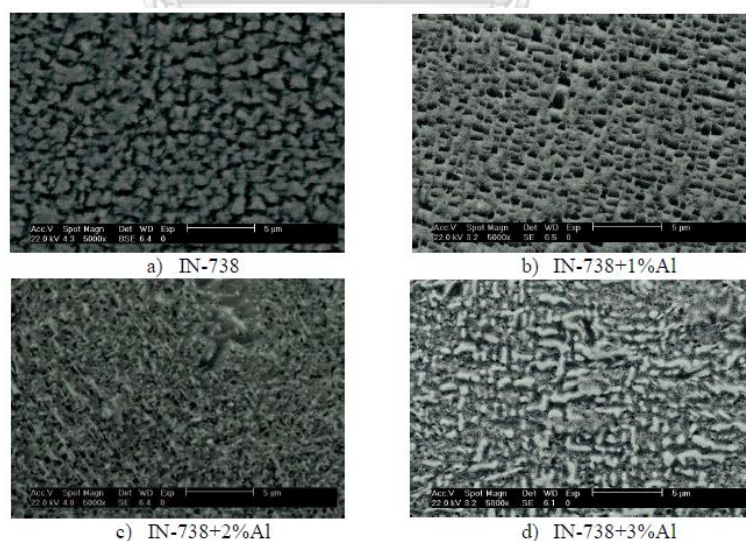
Panyawat Wangyao และคณะ [12] ได้ทำการเติมธาตุ Al 1, 2, 3 % โดยน้ำหนัก ลงในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด IN 738 ด้วยการหลอมแบบอาร์ค โดยชิ้นงานที่มีปริมาณธาตุ Al ที่ต่างกันจะถูกนำมาผ่านกรรมวิธีทางความร้อนตามเงื่อนไขในตารางที่ 2.9 หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนมาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) และตรวจสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส



ตารางที่ 2.9 เงื่อนไขกรรมวิธีทางความร้อนที่ใช้ในการทดลอง [12]

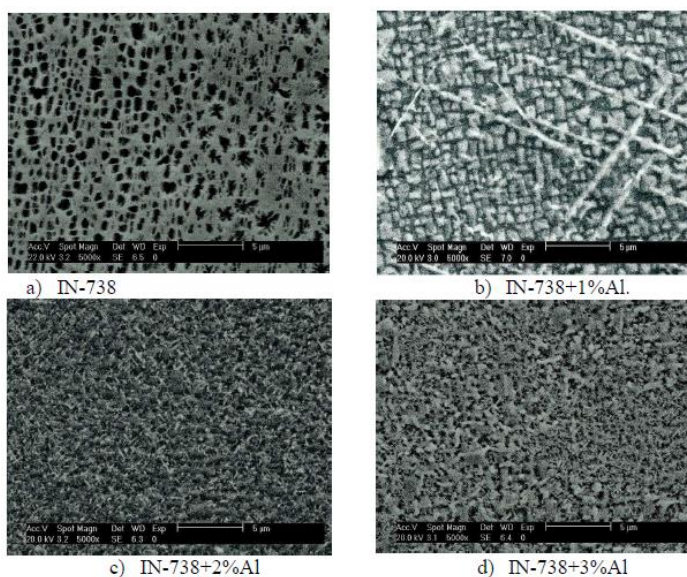
Specimens	Solutioning treatment	Aging
IN 738 + 1 wt% Al, IN 738 + 2 wt% Al, IN 738 + 3 wt% Al	1125°C/6 hrs. (AC)	845°C/24 hrs. (AC)
IN 738 + 1 wt% Al, IN 738 + 2 wt% Al, IN 738 + 3 wt% Al	1145°C/6 hrs. (AC)	
IN 738 + 1 wt% Al, IN 738 + 2 wt% Al, IN 738 + 3 wt% Al	1165°C/6 hrs. (AC)	
IN 738 + 1 wt% Al, IN 738 + 2 wt% Al, IN 738 + 3 wt% Al	1185°C/6 hrs. (AC)	
IN 738 + 1 wt% Al, IN 738 + 2 wt% Al, IN 738 + 3 wt% Al	1205°C/6 hrs. (AC)	

ที่อุณหภูมิการทำละลายเนื้อเดียว 1125, 1145 และ 1165°C หลังผ่านการบ่มแข็ง 845°C/24 hr. จะพบว่าโครงสร้างจุลภาคที่ได้จะมีลักษณะคล้ายกัน คือในชิ้นงานที่มีการเติมธาตุ Al 1% โดยน้ำหนักจะพบลักษณะของ  $\gamma'$  ที่เหมาะสมคือ  $\gamma'$  มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมและเรียงตัวหนาแน่น ในขณะที่ชิ้นงานที่เติม Al 2 และ 3% โดยน้ำหนัก และชิ้นงานที่ไม่เติม Al จะมีลักษณะ  $\gamma'$  ที่ไม่ปกติ



รูปที่ 2.14 โครงสร้างจุลภาคของ IN738 ที่มีปริมาณ Al แตกต่างกันหลังผ่านการทำละลายเนื้อเดียว 1125°C/6 h และบ่มแข็ง 845°C/24 h (AC) [12]

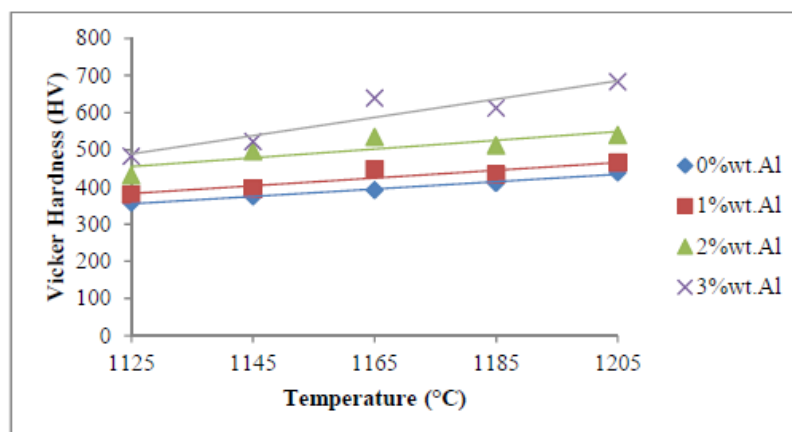
ที่อุณหภูมิการทำละลายเนื้อเดียว 1185 และ 1205°C หลังผ่านการบ่มแข็ง 845°C/24 h จะพบว่าโครงสร้างจุลภาคที่ได้จะมีลักษณะคล้ายกัน โดยในชิ้นงานที่ไม่มีการเติมธาตุ Al จะมีลักษณะของ  $\gamma'$  ที่เหมาะสมกว่าในชิ้นงานที่เติม Al 1, 2 และ 3% โดยน้ำหนัก และในชิ้นงานที่มีการเติมธาตุ Al 1% โดยน้ำหนักที่ทำละลายเนื้อเดียวอุณหภูมิ 1185°C หลังผ่านการบ่มแข็ง 845°C/24 h จะพบเฟสที่เป็นอันตราย คือ TCP



รูปที่ 2.15 โครงสร้างจุลภาคของ IN738 ที่มีปริมาณ Al ต่างกันหลังผ่านการทำละลายเนื้อเดียว 1185°C/6 hr. และบ่มแข็ง 845°C/24 hr. (AC) [12]

ในชิ้นงานที่มีการผสมธาตุ Al 2 และ 3 % โดยน้ำหนัก ลงในโลหะผสมพิเศษเนื้อพ่นนิกเกิลเกรด IN738 จะไม่พบอุณหภูมิการทำละลายที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดการตกตะกอนของอนุภาค  $\gamma'$  อย่างเหมาะสม

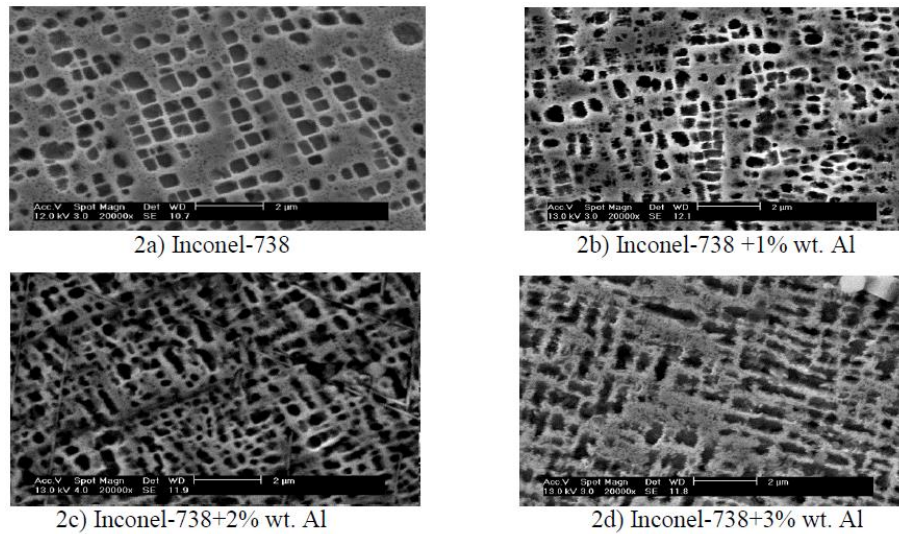
การเพิ่มปริมาณ Al ในโลหะผสมพิเศษเนื้อพ่นนิกเกิลจะเพิ่มความแข็งเพิ่มขึ้นเนื่องจาก Ni จะจับกับ Al เกิดเป็นอนุภาค  $\gamma'$  ( $\text{Ni}_3\text{Al}$ ) ได้มากขึ้น



รูปที่ 2.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความแข็ง และอุณหภูมิการทำละลายของ IN 738 ที่มีปริมาณ Al แตกต่างกัน [12]

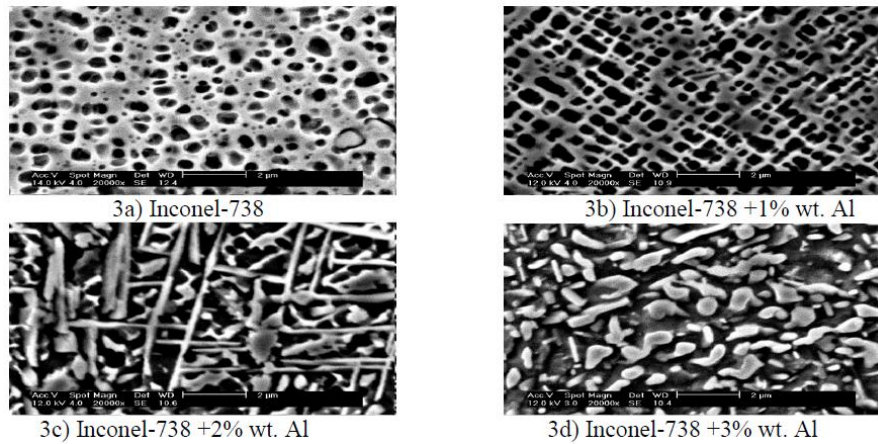
Panyawat Wangyao และคณะ [13] ได้ทำการเติม Al 1, 2 และ 3 % โดยน้ำหนัก ลงในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้กิลเกรด IN 738 ด้วยการหลอมแบบอาร์ค และทำสารละลายเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ 1125°C นาน 6 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 825°C นาน 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการศึกษาความเสถียรของโครงสร้างจุลภาคที่อุณหภูมิ 900 และ 1000°C นาน 110 ชั่วโมง และการเกิดออกซิเดชันที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 900 และ 1000°C นาน 110 ชั่วโมง

ชิ้นงานที่มีการเติมธาตุ Al 1, 2 และ 3 % โดยน้ำหนักใน IN 738 และชิ้นงาน IN 738 ที่ไม่มีการเติม Al เพิ่มหลังจากทำสารละลายเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ 1125°C นาน 6 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 825°C นาน 24 ชั่วโมงจะพบว่าอนุภาค  $\gamma'$  ที่ตกตะกอนใหม่นั้นมีการกระจายตัวสม่ำเสมอในชิ้นงาน และมีลักษณะสี่เหลี่ยมอยู่ในเนื้อพื้  $\gamma$  แต่การเพิ่ม % โดยน้ำหนักของธาตุ Al จะมีผลทำให้อนุภาค  $\gamma'$  มีลักษณะหยาบขึ้น และสัดส่วนพื้นที่ (Area fraction) ของเฟส  $\gamma'$  จะเพิ่มขึ้น



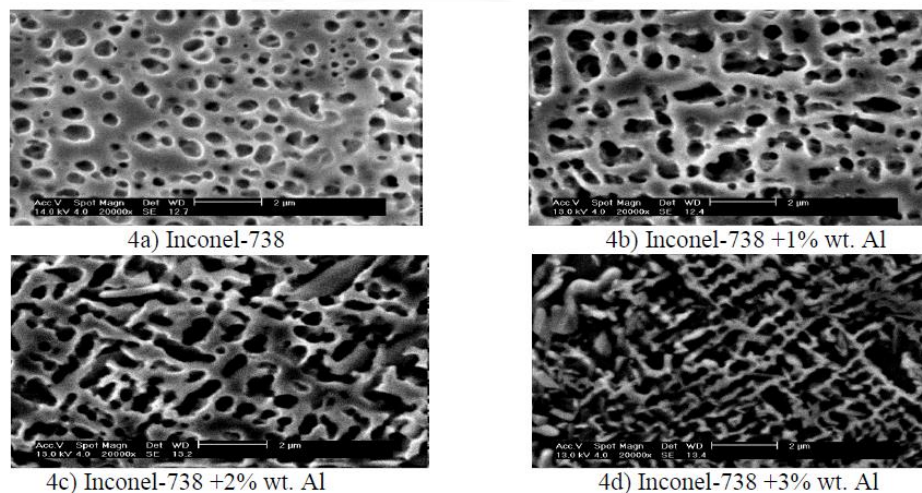
**รูปที่ 2.17** ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของ IN738 ที่มีปริมาณ Al ต่างกันหลังจากกรรมวิธีทางความร้อน [13]

ชิ้นงานที่มีการเติมธาตุ Al 1, 2 และ 3 % โดยน้ำหนักใน IN 738 และชิ้นงาน IN 738 ที่ไม่มีการเติมธาตุ Al เพิ่มหลังจากทำละลายเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ 1125°C นาน 6 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 825°C นาน 24 ชั่วโมง และทำการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 900°C นาน 110 ชั่วโมงจะพบว่า ในชิ้นงานที่เติมธาตุ Al 1% โดยน้ำหนักจะพบอนุภาค  $\gamma'$  มีลักษณะเหมือนสี่เหลี่ยมต่อกันหลายตำแหน่ง ในชิ้นงานที่เติมธาตุ Al 2 และ 3 % โดยน้ำหนัก จะพบว่าอนุภาค  $\gamma'$  จะมีลักษณะที่หยาบขึ้นมากเมื่อเทียบกับก่อนการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 900°C นาน 110 ชั่วโมง และในชิ้นงานที่เติมธาตุ Al 2 % โดยน้ำหนัก ยังพบเฟส TCP เฟสที่เป็นโครงสร้างที่อันตรายในโลหะผสมพิเศษเนื้อพ่นนิกเกิล



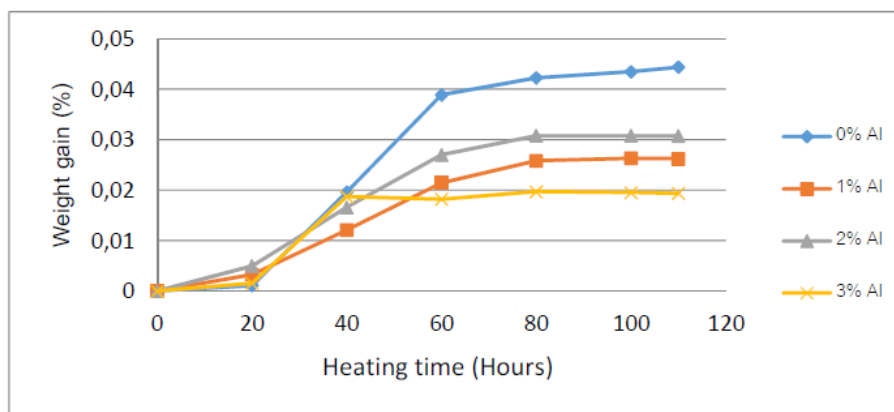
รูปที่ 2.18 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของIN738 ที่มีปริมาณ Al ต่างกันหลังผ่านการจำลอง การใช้งานที่อุณหภูมิ 900°C นาน 110 ชั่วโมง [13]

ชิ้นงานที่มีการเติมธาตุ Al 1, 2 และ 3 %โดยน้ำหนักใน IN 738 และชิ้นงาน IN 738 ที่ไม่มีการเติมธาตุ Al เพิ่มหลังจากทำละลายเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ 1125°C นาน 6 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 825°C นาน 24 ชั่วโมง และทำการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 1,000°C นาน 110 ชั่วโมงจะพบว่า ชิ้นงานที่มีการเติมธาตุ Al 1, 2 และ 3 %โดยน้ำหนัก อนุภาค  $\gamma'$  จะมีลักษณะหยาบขึ้นกว่าก่อนหน้าการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 1,000°C นาน 110 ชั่วโมงมาก ทำให้สรุปได้ว่าที่อุณหภูมิการใช้งานสูงเกิน 1,000°C ชิ้นงาน IN 738 ที่ไม่มีการเติมธาตุ Al จะมีโครงสร้างจุลภาคที่เสถียรที่สุด

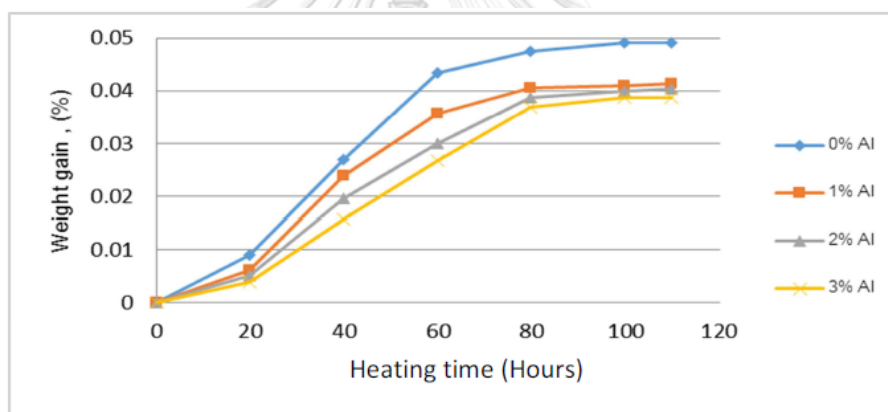


รูปที่ 2.19 ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของIN738 ที่มีปริมาณ Al ต่างกันหลังผ่านการจำลอง การใช้งานที่อุณหภูมิ 1000°C นาน 110 ชั่วโมง [13]

การเพิ่มปริมาณ Al จะมีผลเพิ่มความต้านทานการเกิดออกซิเดชันทั้งที่อุณหภูมิการใช้งานที่ 900°C และที่อุณหภูมิการใช้งานที่ 1000°C



รูปที่ 2.20 พฤติกรรมการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 900°C [13]



รูปที่ 2.21 พฤติกรรมการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1000°C [13]

### 2.5.3 งานวิจัยที่เกี่ยวกับผลของนิกเกิลในโลหะผสมเนื้อพื้นนิกเกิล [1-3]

การเพิ่มปริมาณ Ni ลงในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลจะเป็นการเพิ่มความเสถียรของโครงสร้างพื้น

สรุปโดยรวมจากงานวิจัยที่ผ่านมาจะพบว่า การเติม Co ช่วยให้อนุภาค  $\gamma'$  มีขนาดที่เล็กลง และจะช่วยให้เฟส  $\gamma'$  เสถียรขึ้นที่อุณหภูมิสูง และยับยั้งการเกิดเฟส TCP การเติม Al 1% โดยน้ำหนัก จะเป็นปริมาณการเติม Al ที่เหมาะสมใน IN 738 เพื่อให้มีอนุภาค  $\gamma'$  เพิ่มขึ้นและยังคงมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยม การเติม Ni จะเป็นการเพิ่มความเสถียรของโครงสร้างพื้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จะศึกษาผลของการเติมโคบอลต์และนิกเกิลที่ปริมาณต่างกันไปในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด IN 738 ที่เติมอะลูมิเนียมเพิ่ม 1% โดยน้ำหนัก โดยจากงานวิจัยก่อนหน้าสามารถตั้งสมมติฐานได้ว่า

น่าจะนำมาพัฒนาสมบัติของ IN 738 ขึ้นได้จากการที่มีอนุภาค  $\gamma'$  มีขนาดเล็กและกระจายตัวสม่ำเสมอ แต่มีสัดส่วนโดยพื้นที่มากและเฟส  $\gamma'$  มีความเสถียรมากขึ้นที่อุณหภูมิสูง



### บทที่ 3

#### ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

#### 3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

##### 3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงาน

- 3.1.1.1 ชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้มนิกเกิลเกรดอินโคเนล 738
- 3.1.1.2 เครื่องตัดชิ้นงานแบบ Discotom
- 3.1.1.3 ลวดอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ 99.999% จากบริษัท Alfa Aesar
- 3.1.1.4 ลวดโคบอลต์บริสุทธิ์ 99.95% จากบริษัท Alfa Aesar
- 3.1.1.5 ลวดนิกเกิลบริสุทธิ์ 99.98% จากบริษัท Alfa Aesar
- 3.1.1.6 เตาหลอมแบบอาร์ค (Arc melting Furnace) model No. SA-200 สำหรับหลอมชิ้นงาน
- 3.1.1.7 เครื่องชั่งดิจิตอลแบบ 4 ตำแหน่ง

##### 3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมผิวชิ้นงาน

- 3.1.2.1 อุปกรณ์ทำตัวเรือน
- 3.1.2.2 กระดาษทรายเบอร์ 80 150 240 320 400 600 800 1000 และ 2000
- 3.1.2.3 เครื่องขัด
- 3.1.2.4 ผ้าสักหลาด
- 3.1.2.5 พงอะลูมิเนียมขนาด 1 ไมครอน
- 3.1.2.6 น้ำกลั่น
- 3.1.2.7 กรดไฮโดรคลอริก (HCl)
- 3.1.2.8 คอปเปอร์ซัลเฟต ( $\text{CuSO}_4$ )
- 3.1.2.9 แอลกอฮอล์



3.1.2.10 เครื่องเป่าผม

3.1.2.11 สำลีก้าน (Cotton bud)

### 3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการจำลองการใช้งาน และการวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.1.3.1 เตาเผาความร้อนสูง (muffle furnace)

3.1.3.2 เครื่องวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมี หรือ สเปกโตรมิเตอร์อิมิซันสเปกโทรมิเตอร์ (Spark optical emission spectrometer, OES) จาก BRUKER รุ่น Q8 Magellan

3.1.3.3 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope, OM) พร้อมอุปกรณ์ถ่ายรูปรูปโครงสร้างจุลภาค dino-eye จาก Dino-lite

3.1.3.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) และ อุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy- dispersive X-ray Spectroscopy, EDS) จาก Hitachi รุ่น SU3500 และ JEOL รุ่น JSM IT-500HR

3.1.3.5 โปรแกรมวิเคราะห์ภาพ ImageJ™

## 3.2 ขั้นตอนการทำวิจัย

### 3.2.1 ขั้นตอนการเตรียม และการหลอมชิ้นงาน

3.2.1.1 นำโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิลเกรดอินโคเนล 738 ที่ได้รับมาขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 80 เพื่อเป็นการกำจัดชั้นฟิล์มที่เคลือบผิวชิ้นงานออกจนหมด

3.2.1.2 นำชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิลเกรดอินโคเนล 738 ที่ได้รับมาตรวจสอบส่วนประกอบทางเคมีด้วยเครื่องหรือสเปกโตรมิเตอร์อิมิซันสเปกโทรมิเตอร์ เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของชิ้นงานที่ได้รับว่าเป็นโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิลเกรดอินโคเนล 738 จริงหรือไม่

3.2.1.3 ใช้เครื่องตัด discotom ตัดชิ้นงานออกเป็นลักษณะคล้ายลูกบาศก์ขนาดประมาณ 1×1×1 ลูกบาศก์เซนติเมตร และใช้กระดาษทรายเบอร์หยาบขัดรอยไหม้บนชิ้นงานที่เกิดจากการตัดออก

3.2.1.4 ทำการซั่งเตรียมชิ้นงาน 6 ชิ้น จากการนำชิ้นงานโลหะผสมเนื้อพื้นนิเกิลเกรดอินโคเนล 738 ที่ตัดแล้ว มาซั่งด้วยเครื่องซั่งดิจิตอล 4 ตำแหน่ง ผสมกับ ลวดอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ ลวดโคบอลต์บริสุทธิ์ และลวดนิเกิลบริสุทธิ์ ให้ได้ส่วนผสมโดยน้ำหนักใกล้เคียงตารางที่ 3.1 โดยขณะเตรียม

ชิ้นงานอาจเกิดความผิดพลาดจากการตัดเตรียม ธาตุผสมต่างๆทำให้ไม่ได้ส่วนผสมตรงตามตารางที่ 3.1 โดยตารางที่ 3.2 แสดงน้ำหนักของโลหะผสมเนื้อพื้นนิกเกิลเกรดอินโคเนล 738 และน้ำหนักของธาตุผสมต่างๆที่ใช้จริงในชิ้นงานแต่ละชิ้นงาน และตารางที่ 3.3 แสดงส่วนผสมโดยน้ำหนักจริง ของชิ้นงานทั้ง 6 ชิ้น ซึ่งชิ้นงานทั้ง 6 ชิ้นจะมีปริมาณ ร้อยละโดยน้ำหนักของแต่ละธาตุจากการอ้างอิงผล OES ในชิ้นงาน 0 ตามตารางที่ 3.4 และจากการอ้างอิงผล EDS ในชิ้นงาน 0 ตามตารางที่ 3.5 โดยในตารางที่ 3.4 และ 3.5 ค่าธาตุผสมในชิ้นงาน 0 จะเป็นค่าจากการวัดจริงจากเทคนิค OES และ EDS ตามลำดับ และค่าธาตุผสมในชิ้นงาน 1 – 5 เป็นค่าที่เกิดจากการคำนวณจากค่าเริ่มต้นที่วัดได้จริงในชิ้นงาน 0

**ตารางที่ 3.1** ร้อยละโดยน้ำหนักของ IN 738, โคบอลต์, นิกเกิล และอะลูมิเนียม ที่ต้องการเตรียมในชิ้นงานแต่ละชิ้น

	IN 738 (wt.%)	Co (wt.%)	Ni (wt.%)	Al (wt.%)
ชิ้นงานที่ 0	100	-	-	-
ชิ้นงานที่ 1	93	0	6	1
ชิ้นงานที่ 2	93	1.5	4.5	1
ชิ้นงานที่ 3	93	3	3	1
ชิ้นงานที่ 4	93	4.5	1.5	1
ชิ้นงานที่ 5	93	6	0	1

**ตารางที่ 3.2** น้ำหนักของโลหะผสมเนื้อพื้นนิกเกิลเกรดอินโคเนล 738 และน้ำหนักของธาตุผสมต่างๆที่ใช้ในชิ้นงานแต่ละชิ้น

	IN 738 (g)	Co (g)	Ni (g)	Al (g)
ชิ้นงานที่ 0	5.6690	-	-	-
ชิ้นงานที่ 1	6.0570	0.0000	0.3909	0.0651
ชิ้นงานที่ 2	5.9974	0.0961	0.2950	0.0647
ชิ้นงานที่ 3	5.3756	0.1739	0.1741	0.0579
ชิ้นงานที่ 4	5.2966	0.2555	0.0857	0.0566
ชิ้นงานที่ 5	5.2364	0.3378	0.0000	0.0563

**ตารางที่ 3.3** ร้อยละโดยน้ำหนักจริงของ IN 738, โคบอลต์, นิกเกิล และอะลูมิเนียม ที่เตรียมใน  
ชั้นงานแต่ละชั้น

	IN 738 (%.wt)	Co (%.wt)	Ni (%.wt)	Al (%.wt)
ชั้นงานที่ 0	100	-	-	-
ชั้นงานที่ 1	93.00	0.00	6.00	1.00
ชั้นงานที่ 2	92.94	1.49	4.57	1.00
ชั้นงานที่ 3	92.98	3.01	3.01	1.00
ชั้นงานที่ 4	93.01	4.49	1.50	0.99
ชั้นงานที่ 5	93.00	6.00	0.00	1.00

**ตารางที่ 3.4** ร้อยละโดยน้ำหนักของแต่ละธาตุจากการอ้างอิงผล OES ในชั้นงาน 0 ของชั้นงาน 0 –  
ชั้นงาน 5

ธาตุผสม	(% โดยน้ำหนัก)					
	ชั้นงานที่ 0	ชั้นงานที่ 1	ชั้นงานที่ 2	ชั้นงานที่ 3	ชั้นงานที่ 4	ชั้นงานที่ 5
Cr	16.47	15.32	15.31	15.32	15.32	15.32
Co	8.68	8.07	9.55	11.08	12.56	14.07
Mo	1.50	1.39	1.39	1.39	1.39	1.39
W	2.29	2.13	2.13	2.13	2.13	2.13
Al	4.08	4.79	4.79	4.79	4.78	4.79
Ti	2.81	2.62	2.61	2.62	2.62	2.62
Ta	2.05	1.90	1.90	1.90	1.90	1.90
Nb	0.66	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62
C	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
B	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Zr	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
Ni	61.38	63.08	61.61	60.08	58.59	57.08

**ตารางที่ 3.5** ร้อยละโดยน้ำหนักของแต่ละธาตุจากการอ้างอิงผล EDS ในชิ้นงาน 0 ของชิ้นงาน 0 – ชิ้นงาน 5

ธาตุผสม	( % โดยน้ำหนัก )					
	ชิ้นงานที่ 0	ชิ้นงานที่ 1	ชิ้นงานที่ 2	ชิ้นงานที่ 3	ชิ้นงานที่ 4	ชิ้นงานที่ 5
Ni	61.32	63.03	61.56	60.03	58.53	57.03
Co	7.67	7.14	8.62	10.14	11.63	13.14
Al	3.38	4.15	4.14	4.15	4.14	4.15
W	2.98	2.77	2.77	2.77	2.77	2.77
Mo	1.97	1.83	1.83	1.83	1.83	1.83
Ti	3.58	3.33	3.33	3.33	3.33	3.33
Ta	2.13	1.98	1.98	1.98	1.98	1.98
Nb	1.13	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05
Zr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cr	15.83	14.72	14.71	14.72	14.72	14.72

3.2.1.5 ทำการหลอมชิ้นงานตามส่วนผสมในตารางที่ 3.1 โดยใช้เครื่องหลอมแบบอาร์ค model No. SA-200 โดยเริ่มจากการเปิดวาล์ว น้ำประปาสำหรับหล่อเย็น หลังจากนั้นเปิดสวิทซ์เครื่องเครื่องหลอมนำส่วนผสมตามที่ต้องการใส่ลงเข้าหลอมที่ทำจากทองแดง แล้วนำใส่ที่หลอมที่มีการหล่อเย็นรอบๆและมีครอบแก้วนิรภัยติดตั้งอยู่

3.2.1.6 ทำการเปิดเครื่องปั๊มเพื่อปั๊มอากาศภายในครอบแก้วออกให้เหลือน้อยที่สุด โดยเริ่มจากการปั๊มไล่อากาศในครอบแก้วรอบที่ 1 จนหน้าปัดแสดงความดันในครอบแก้วเป็น 0 หลังจากนั้นทำการปิดเครื่องปั๊มแล้วทำการปล่อยก๊าซอาร์กอน (Argon) ลงไปในครอบแก้วจนเต็ม และทำการปั๊มให้ความดันในครอบแก้วเป็น 0 สลับกับการปล่อยก๊าซอาร์กอนจนเต็มครอบแก้วเป็นจำนวน 5 ครั้งเพื่อเป็นการเจือจางอากาศภายในครอบแก้วให้เหลือน้อยที่สุด

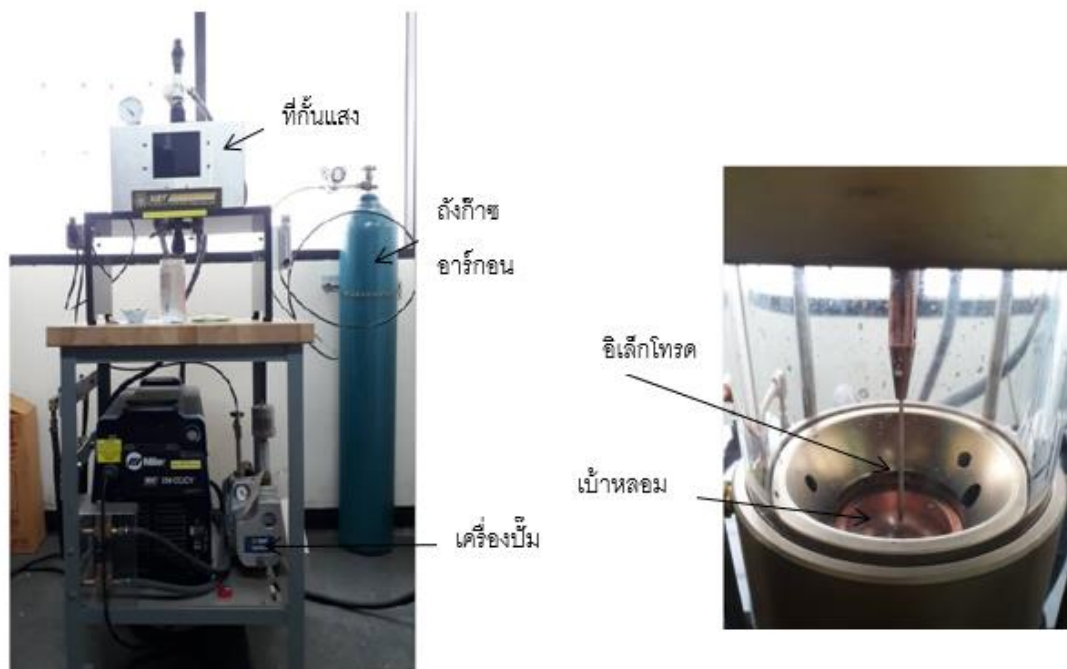
3.2.1.7 นำที่กันแสงมากันบริเวณรอบครอบแก้วเพื่อไม่ให้แสงจากการอาร์คเข้าตาโดยตรง

3.2.1.8 ทำการปล่อยก๊าซอาร์กอนให้เต็มครอบแก้วแล้วเริ่มทำการหลอมชิ้นงานโดยเริ่มจากตั้งค่ากระแสไฟที่ใช้ในการหลอมคือ 100 แอมแปร์ ทำการเหยียบปุ่มเครื่องหลอม และทำอิเล็กโทรดที่ทำจากทั้งสแตนมาจ่อใกล้ๆชิ้นโลหะที่จะทำการหลอม จนเกิดการอาร์คขึ้น

3.2.1.9 รอจนชิ้นงานที่หลอมในข้อ 3.2.1.8 เย็นตัวแล้วจึงนำออกมาจากเบ้าหลอมทองแดงหลังจากนั้นใช้กระดาษทรายขัดคราบเขม่าที่เกิดหลังการหลอมบนเบ้าหลอมทองแดงออกให้หมดแล้วใช้แอลกอฮอล์เช็ดทำความสะอาดเบ้าหลอม

3.2.1.10 นำชิ้นงานที่ได้ในข้อ 3.2.1.8 ใส่ในเบ้าหลอมทองแดงเพื่อทำการหลอมซ้ำเพิ่ม 2 ครั้งโดยทำการหลอมตามข้อที่ 3.2.1.5 ถึง 3.2.1.9 แต่ก่อนใส่ชิ้นงานลงในเบ้าหลอมทองแดงต้องทำการกลับด้านชิ้นงานจากล่างขึ้นบน และจากบนมาล่างเพื่อให้ส่วนผสมทางเคมีหลังหลอมมีความสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน

3.2.1.11 ทำการหลอมชิ้นงานตามส่วนผสมเคมีตามตารางที่ 3.1 จนได้ชิ้นงานครบทั้ง 6 ชิ้นโดยขั้นตอนการหลอมตามข้อ 3.1.2.5 ถึง 3.1.2.10



รูปที่ 3.1 ลักษณะเตาหลอมแบบอาร์ค (Arc melting Furnace) model No. SA-200

### 3.2.2 ขั้นตอนการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.2.2.1 นำชิ้นงานที่ได้หลังจากการลอมด้วยเตาอาร์คมาทำการเตรียมผิวชิ้นงานโดยเริ่มจากการนำชิ้นงานมาทำตัวเรือนหลังจากนั้นทำการขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์หยาบไปเบอร์ละเอียดคือจากเบอร์ 80 150 240 320 400 600 800 1000 และ 2000 ตามลำดับ หลังจากนั้นทำการขัดละเอียดด้วยผ้าสักหลาดและผงอะลูมินา

3.2.2.2 นำชิ้นงานที่ขัดแล้วมาทำการกัดผิวชิ้นงานด้วยสารละลายหินอ่อน (Marble solution) ที่ผสมขึ้นจาก คอปเปอร์ซัลเฟต ( $\text{CuSO}_4$ ) 10 กรัม กรดไฮโดรคลอริก (HCl) 50 มิลลิลิตร และน้ำกลั่น ( $\text{H}_2\text{O}$ ) 50 มิลลิลิตร โดยใช้สำลีก้านจุ่มลงในสารละลายหินอ่อนและปาดลงบนผิวชิ้นงานหลังจากนั้นทำการล้างชิ้นงานด้วยน้ำประปาและแอลกอฮอล์และใช้เครื่องเป่าลมเป่าลมร้อนที่ชิ้นงานจนชิ้นงานแห้ง

3.2.2.3 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่กัดผิวแล้วด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง และบันทึกรูปโครงสร้างจุลภาคที่ด้วยสอบได้

3.2.2.4 นำชิ้นงานออกจากตัวเรือนและใช้กระดาษทรายเบอร์ละเอียดขัดผิวชิ้นงานที่โดนกัดผิวจนไม่เหลือคราบที่เกิดจากสารละลายหินอ่อน

3.2.2.5 นำชิ้นงานทั้งหมดมาทำละลาย (solution heat treatment) ที่อุณหภูมิ  $1175^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ด้วยเตาเผาความร้อนสูง (muffle furnace) และปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในอากาศ

3.2.2.6 นำชิ้นงานที่ผ่านการทำละลายแล้วมากัดผิว และตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) Hitachi รุ่น SU3500 พร้อมทั้งวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิควิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy- dispersive X-ray Spectroscopy, EDS)

3.2.2.7 นำข้อมูลรูปโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงานหลังทำละลาย 5 รูป มาวิเคราะห์หาขนาดของอนุภาค  $\gamma'$  และ สัดส่วนเชิงพื้นที่ของอนุภาค  $\gamma'$  โดยเฉลี่ยด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ ImageJ™

3.2.2.8 ทำการตัดชิ้นงานแต่ละชิ้นออกเป็น 4 ส่วนเท่าๆกัน

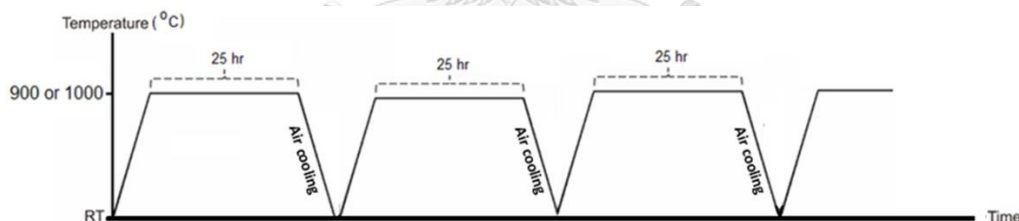
3.2.2.9 นำชิ้นงาน 2 จาก 4 ส่วน ของชิ้นงานแต่ละชิ้นที่มีส่วนผสมตามตารางที่ 3.1 มาทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง

3.2.2.10 นำชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งมากัดผิว และตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

3.2.2.11 นำชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งมาตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี และโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) JEOL รุ่น JSM IT-500HR

3.2.2.12 นำข้อมูลรูปโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของชิ้นงานหลังบ่มแข็ง 5 รูป มาวิเคราะห์หาขนาดของอนุภาค  $\gamma'$ , สัดส่วนเชิงพื้นที่ของอนุภาค  $\gamma'$  และความกลมของอนุภาค  $\gamma'$  โดยเฉลี่ยหลังบ่มแข็งด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ ImageJ™

3.2.2.13 นำชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งแล้วทั้งสองส่วนของแต่ละส่วนผสมในตารางที่ 3.1 ไปแยกทำการจำลองการใช้งาน 2 อุณหภูมิ โดยส่วนที่ 1 จะถูกนำไปจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ให้ได้ระยะเวลาในการจำลองการใช้งานรวม 400 ชั่วโมง ชิ้นงานส่วนที่ 2 จะถูกนำไปจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส ให้ได้ระยะเวลาในการจำลองการใช้งานรวม 400 ชั่วโมง เช่นเดียวกัน โดยการจำลองการใช้งานจะมีลักษณะการจำลองการใช้งานเป็นรอบ รอบละ 25 ชั่วโมง ทั้งหมด 16 รอบ เพื่อให้ได้ระยะการจำลองการใช้งานรวม 400 ชั่วโมงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แผนภาพลักษณะการจำลองการใช้งาน

3.2.2.14 นำชิ้นงานที่ผ่านการจำลองการใช้งานจนได้ระยะเวลาในการจำลองการใช้งานรวม 400 ชั่วโมง มากัดผิว และตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

3.2.2.15 นำชิ้นงานที่ผ่านการจำลองการใช้งานจนได้ระยะเวลาในการจำลองการใช้งานรวม 400 ชั่วโมงมาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด JEOL รุ่น JSM IT-500HR

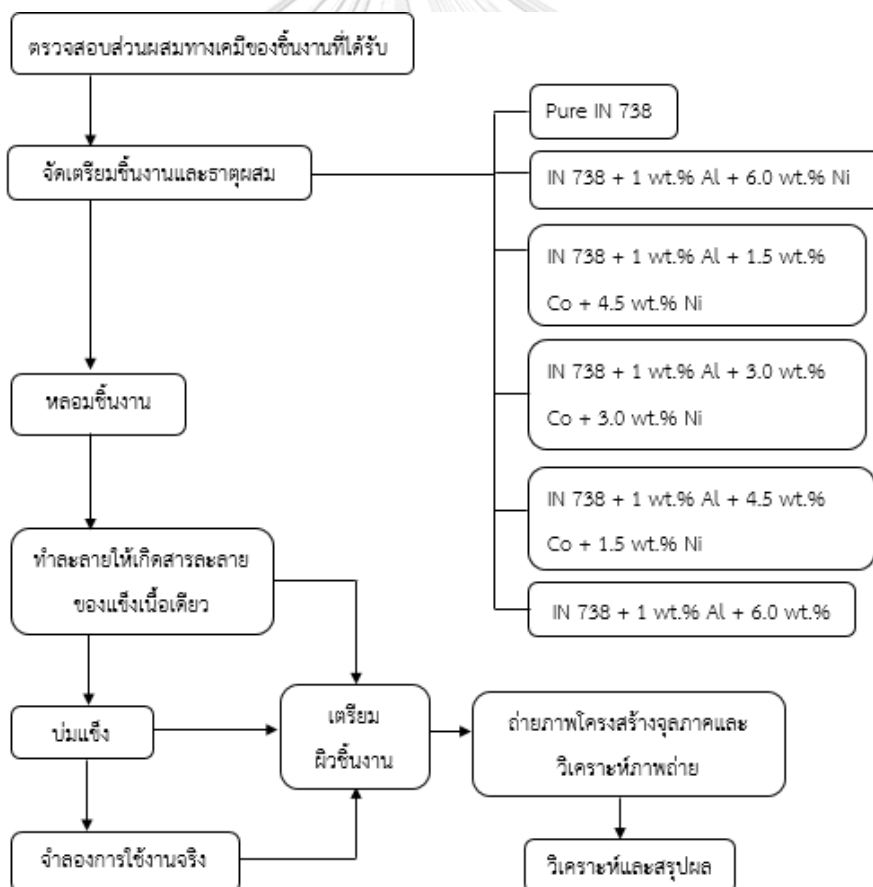
3.2.2.16 นำข้อมูลรูปโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชิ้นงานหลังจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง จำนวน 5 รูป มาวิเคราะห์หาขนาดของ

อนุภาค  $\gamma'$ , สัดส่วนเชิงพื้นที่ของอนุภาค  $\gamma'$  และความกลมของอนุภาค  $\gamma'$  โดยเฉลี่ยด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ ImageJ™

3.2.2.17 นำข้อมูลรูปโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชิ้นงานหลังจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง จำนวน 5 รูป มาวิเคราะห์หาขนาดของอนุภาค  $\gamma'$ , สัดส่วนเชิงพื้นที่ของอนุภาค  $\gamma'$  และความกลมของอนุภาค  $\gamma'$  โดยเฉลี่ยด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ ImageJ™

3.2.2.18 รวบรวมวิเคราะห์ผลที่ได้ และสรุปผลการทดลอง

### 3.3 แผนผังขั้นตอนทำการทดลอง



รูปที่ 3.3 แผนผังขั้นตอนทำการทดลอง



## 3.4 แผนดำเนินงานวิจัย และเวลา

กิจกรรม	เดือน									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ศึกษาค้นคว้าข้อมูล										
ตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี ของชิ้นงานที่ได้รับ	■									
เตรียมชิ้นงาน และหลอม ชิ้นงาน		■								
ทำละลายให้เกิดสารละลาย ของแข็งเนื้อเดียว และ ถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาค ชิ้นงานหลังการทำละลาย			■							
บ่มแข็ง และถ่ายภาพ โครงสร้างจุลภาคหลังบ่มแข็ง				■						
จำลองการใช้งานจริง และ ถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาค หลังจำลองการใช้งานจริง					■	■	■			
วิเคราะห์และสรุปผล และ เขียนเล่มวิทยานิพนธ์								■	■	■

## บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

### 4.1 ผลการทดลองและ วิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 และโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 ที่เติมอะลูมิเนียม นิกเกิล และโคบอลต์ ด้วยเทคนิค EDS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)

ชิ้นงานที่เตรียมตามตารางที่ 3.1 หลังการหลอมละลายแบบอาร์กสตูญญากาศ และทำละลายที่อุณหภูมิ 1175°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ถูกตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.1

**ตารางที่ 4.1** แสดงส่วนผสมทางเคมีโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 และโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 ที่เติมอะลูมิเนียม นิกเกิล และโคบอลต์

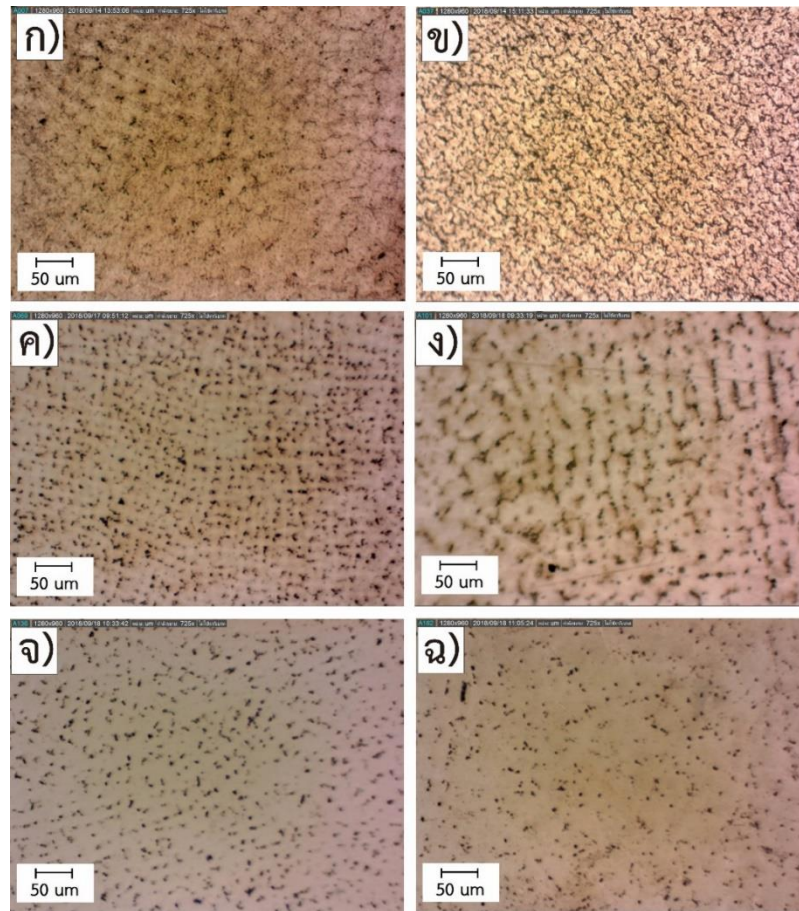
ธาตุผสม	( % โดยน้ำหนัก )					
	ชิ้นงานที่ 0	ชิ้นงานที่ 1	ชิ้นงานที่ 2	ชิ้นงานที่ 3	ชิ้นงานที่ 4	ชิ้นงานที่ 5
Ni	60.84	63.33	61.24	58.78	57.85	56.82
Co	8.35	7.43	8.87	11.44	12.58	13.89
Al	3.58	4.26	3.98	4.09	4.03	3.98
W	3.33	3.20	3.11	3.54	3.04	3.23
Mo	2.05	1.58	1.70	1.84	2.02	1.69
Ti	3.20	2.83	2.88	2.83	2.79	2.86
Ta	1.49	1.45	1.32	1.17	1.35	1.46
Nb	0.81	0.66	1.01	0.76	0.54	0.74
Zr	0.13	0.03	0.37	0.13	0.06	0.27
Cr	16.21	15.23	15.37	15.42	15.74	15.05

จากตารางที่ 4.1 ผลที่ได้จากการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) โดยผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีที่ได้มีการตัดธาตุที่คาดว่า

ไม่มีในโลหะผสมพิเศษ เกรด Inconel 738 โดยในแต่ละชิ้นงานจะมีพื้นที่การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีจำนวน 3 บริเวณ และหาค่าเฉลี่ยของส่วนผสม เมื่อนำผลที่ได้ในตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบกับตารางที่ 3.5 ที่แสดงส่วนผสมทางเคมีที่คาดว่าจะพบในแต่ละชิ้นงาน ซึ่งหาจากการคำนวณโดยอ้างอิงผลที่ได้จากการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS ในชิ้นงาน Inconel 738 (ชิ้นงาน 0) หลังหลอมละลายแบบอาร์กสลุญญากาศ พบว่าส่วนผสมทางเคมีที่ตรวจสอบได้จริง ต่างจากส่วนผสมทางเคมีจากการคำนวณเล็กน้อย คาดว่าเป็นผลเนื่องจากการกระจายตัวของธาตุผสมที่ยังไม่สม่ำเสมอในชิ้นงานหล่อ Inconel 738 หลังหลอมละลายแบบอาร์กสลุญญากาศ ทำให้การคำนวณส่วนผสมในแต่ละชิ้นงานอาจมีความคลาดเคลื่อนไปบ้าง และคาดว่าเป็นผลจากธาตุผสมบางตัวทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ระหว่างการหลอมละลายแบบอาร์กสลุญญากาศ และระหว่างทำละลาย ทำให้ส่วนผสมที่วัดได้จริงคลาดเคลื่อนจากการคำนวณ นอกจากนี้การวิเคราะห์ธาตุผสมด้วยเทคนิค EDS ยังไม่ใช่เทคนิคในการวัดส่วนผสมที่มีความแม่นยำสูง แต่เนื่องจากในงานวิจัยนี้ชิ้นงานที่ใช้วิจัยมีขนาดเล็ก (เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 เซนติเมตร) ทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ส่วนผสมด้วยเทคนิคที่มีความแม่นยำสูง เช่นเทคนิค Spark Optical Emission Spectrometer (Spark-OES) ได้เนื่องจากมีพื้นที่ของชิ้นงานในการวิเคราะห์ส่วนผสมด้วยเทคนิค OES ไม่เพียงพอ

#### **4.2 ผลการทดลองและ วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 และโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 ที่เติมอะลูมิเนียม นิกเกิล และโคบอลต์ ภายหลังกการหลอมละลายแบบอาร์กสลุญญากาศ**

ชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 และโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 ที่เติมอะลูมิเนียม นิกเกิล และโคบอลต์ หลังหลอมละลายแบบอาร์กสลุญญากาศ ถูกตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope, OM) ผลที่ได้แสดงดังรูป 4.1



**รูปที่ 4.1** โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 และโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 ที่เติมอะลูมิเนียม นิกเกิล และโคบอลต์ หลังหลอมละลายแบบอาร์คสฤณญากาศ รูปจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง กำลังขยาย 725 เท่า ก) ชิ้นงาน 0, ข) ชิ้นงาน 1, ค) ชิ้นงาน 2, ง) ชิ้นงาน 3, จ) ชิ้นงาน 4 และ ฉ) ชิ้นงาน 5

จากรูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคที่ได้หลังหลอมละลายแบบอาร์คสฤณญากาศ ในทุกชิ้นงานมีลักษณะโครงสร้างเดนไดรต์จากผลการแยกส่วนผสมออกเป็นชั้น (coring effect) ประกอบด้วยโครงสร้างเดนไดรต์สีอ่อน และมีอนุภาคสีเข้มกระจายตัวอยู่ในเดนไดรต์ และระหว่างแขนเดนไดรต์ โดยโครงสร้างสีอ่อนคาดว่าเป็นโครงสร้างเนื้อพื้นแกมมา (Gamma,  $\gamma$ ) ที่ได้หลังจากการหลอมละลายแบบอาร์คสฤณญากาศ และโครงสร้างสีเข้มคาดว่าเป็นโครงสร้างของคาร์ไบด์จำพวก MC คาร์ไบด์ และโครงสร้างของอนุภาคแกมมาไพรม์ (Gamma prime,  $\gamma'$ ) ที่เกิดขึ้นระหว่างชิ้นงานเย็นตัว หรืออาจเป็นสิ่งเจือปนภายในชิ้นงานอยู่ตามขอบเดนไดรต์



จากรูปที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคที่ได้หลังจากการหลอมละลายแบบอาร์กสฤฎญากาศ และทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ในทุกชิ้นงานพบว่าไม่สามารถเห็นโครงสร้างเดนไดรต์เหมือนโครงสร้างจุลภาคที่ได้หลังจากการหลอมละลายแบบอาร์กสฤฎญากาศดังรูป 4.1 คาดว่าเนื่องจากชิ้นงานทั้งหมดเมื่อผ่านกระบวนการทำละลาย จะส่งผลให้ธาตุผสมในชิ้นงานมีการแพร่และมีการกระจายตัวสม่ำเสมอมากขึ้น การแยกส่วนผสมออกเป็นชั้น (coring effect) จึงหายไป นอกจากนี้การทำละลายคาดว่าจะส่งผลให้คาร์ไบด์ และอนุภาค  $\gamma'$  ละลายกลับสู่อเนื้อพื้นได้ ซึ่งสามารถสังเกตได้จากอนุภาคสีเข้มในรูป 4.2 ในแต่ละชิ้นงาน มีจำนวนที่น้อยกว่าในรูป 4.1 ค่อนข้างมาก

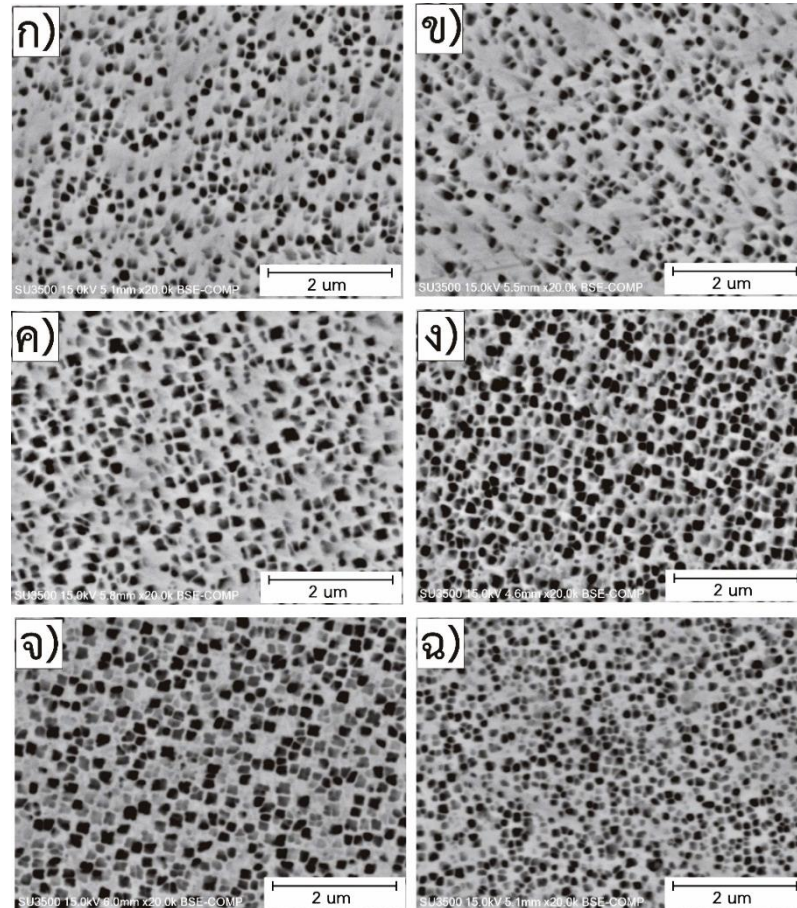
#### 4.3.2 ผลการทดลองและ วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ภายหลังจากการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 และโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 ที่เติมอะลูมิเนียม นิกเกิล และโคบอลต์ (ชิ้นงาน 0 - 5) ภายหลังจากการหลอมละลายแบบอาร์กสฤฎญากาศ และการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคที่ตรวจสอบได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 20000 เท่า แสดงดังรูปที่ 4.3

จากรูปที่ 4.3 พบว่าชิ้นงานทั้งหมดหลังจากการหลอมละลายแบบอาร์กสฤฎญากาศ และการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เมื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วย SEM พบว่ามีอนุภาค  $\gamma'$  ตกตะกอนกระจายตัวอย่างสม่ำเสมออยู่ในเนื้อพื้น โดยคาดว่าเกิดขึ้นเนื่องจากในขั้นตอนการทำละลาย อนุภาค  $\gamma'$  ไม่สามารถละลายกลับสู่อเนื้อพื้นได้อย่างสมบูรณ์ หรืออาจเกิดจากการเย็นตัวที่เร็วไม่พอของชิ้นงานเมื่อนำออกจากเตาหลังการทำละลาย ทำให้อนุภาค  $\gamma'$  สามารถตกตะกอนกลับมาได้ ซึ่งในกรณีนี้คาดว่าสามารถแก้ไขได้ด้วยการทำให้ชิ้นงานเมื่อนำออกจากเตาเย็นตัวเร็วขึ้นด้วยการเป่าแก๊สเฉื่อยผ่านชิ้นงานเพื่อให้ชิ้นงานสามารถเย็นตัวได้เร็วขึ้น

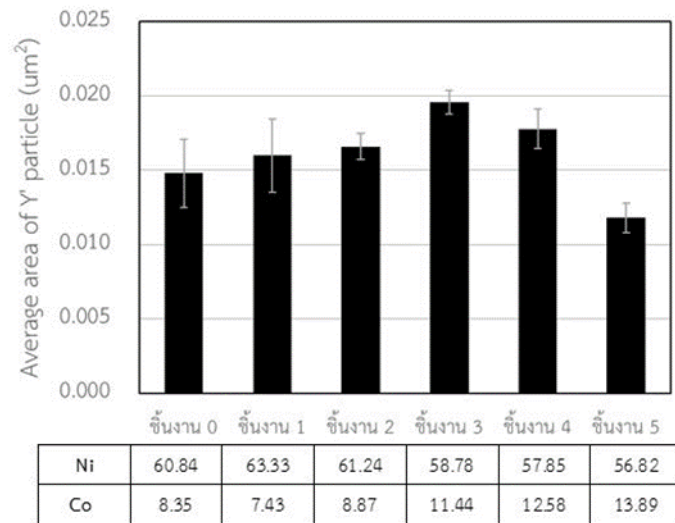
โดยอนุภาค  $\gamma'$  ในแต่ละชิ้นงานมีลักษณะรูปร่าง (morphology) ค่อนข้างไปในทางทรงเหลี่ยมแบบไม่สมมาตร มีขนาดเล็ก และมีขนาดเดียว (single size) ดังรูป 4.3 ดังนั้นอนุภาค  $\gamma'$  ที่

พบหลังทำละลายคาดว่า เป็นอนุภาค  $\gamma'$  ที่เกิดจากการเย็นตัวที่เร็วไม่พอของชิ้นงานเมื่อนำออกจากเตาหลังทำละลาย



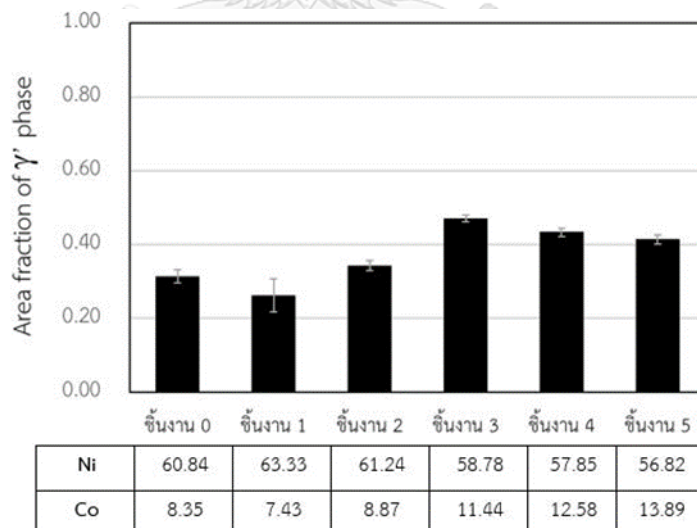
รูปที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 และโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 ที่เติมอะลูมิเนียม นิกเกิล และโคบอลต์ หลังจากการหลอมละลายแบบอาร์กสลุญญากาศ และทำละลายที่อุณหภูมิ  $1175^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 4 ชั่วโมง รูปจากกล้องจุลทรรศน์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 20000 เท่า ก) ชิ้นงาน 0, ข) ชิ้นงาน 1, ค) ชิ้นงาน 2, ง) ชิ้นงาน 3, จ) ชิ้นงาน 4 และ ฉ) ชิ้นงาน 5

จากรูปที่ 4.3 เมื่อคำนวณขนาดโดยเฉลี่ยของอนุภาค  $\gamma'$  หลังการละลายในแต่ละชิ้นงานพบว่าขนาดของอนุภาค  $\gamma'$  ในชิ้นงานที่ 0 – 5 มีขนาด 0.014, 0.015, 0.016, 0.018, 0.017 และ  $0.011 \mu\text{m}^2$  ตามลำดับ โดยขนาดของอนุภาค  $\gamma'$  สามารถแสดงเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงพื้นที่โดยเฉลี่ยของอนุภาค  $\gamma'$  หลังการทำละลายในแต่ละชั้นงาน

จากรูปที่ 4.3 เมื่อคำนวณสัดส่วนเชิงพื้นที่โดยเฉลี่ยของเฟส  $\gamma'$  หลังการละลายในแต่ละชั้นงาน พบว่าสัดส่วนเชิงพื้นที่ของเฟส  $\gamma'$  ในชั้นงานที่ 0 – 5 มีสัดส่วนเชิงพื้นที่ที่ 0.31, 0.26, 0.34, 0.47, 0.43 และ 0.41 ตามลำดับ โดยสัดส่วนเชิงพื้นที่ของเฟส  $\gamma'$  สามารถแสดงเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงสัดส่วนเชิงพื้นที่โดยเฉลี่ยของเฟส  $\gamma'$  หลังการทำละลายในแต่ละชั้นงาน

จากรูปที่ 4.4 และ 4.5 พบว่าชั้นงานที่มีการเติมอะลูมิเนียมเพิ่ม 1 % โดยน้ำหนัก (ชั้นงาน 1-5) จะมีแนวโน้มของ ขนาดหรือพื้นที่โดยเฉลี่ยของอนุภาค  $\gamma'$  และสัดส่วนเชิงพื้นที่ของเฟส  $\gamma'$  มีค่ามากกว่า ชั้นงานที่ไม่เติมอะลูมิเนียมเพิ่ม 1 % โดยน้ำหนัก (ชั้นงาน 0) คาดว่าเนื่องจากธาตุ



อะลูมิเนียม เป็นธาตุ forming elements หลักของอนุภาค  $\gamma'$  [1, 3, 7, 14] ดังนั้นการเติมธาตุผสมอะลูมิเนียมเพิ่มจึงเป็นการเพิ่มความเสถียรของอนุภาค  $\gamma'$  ด้วยเหตุนี้ชิ้นงานที่เติมธาตุผสมอะลูมิเนียม 1 %โดยน้ำหนัก เมื่อผ่านกระบวนการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จึงมีแนวโน้มที่พบขนาด และสัดส่วนเชิงพื้นที่ของอนุภาค  $\gamma'$  ที่ตกตะกอนออกมาก่อนมากกว่า ชิ้นงานที่ไม่มีการเติมธาตุผสมอะลูมิเนียมเพิ่ม

**ตารางที่ 4.2** ตารางแสดงอัตราส่วน Ni : Co ในชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 และโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 ที่เติมอะลูมิเนียม นิกเกิล และโคบอลต์

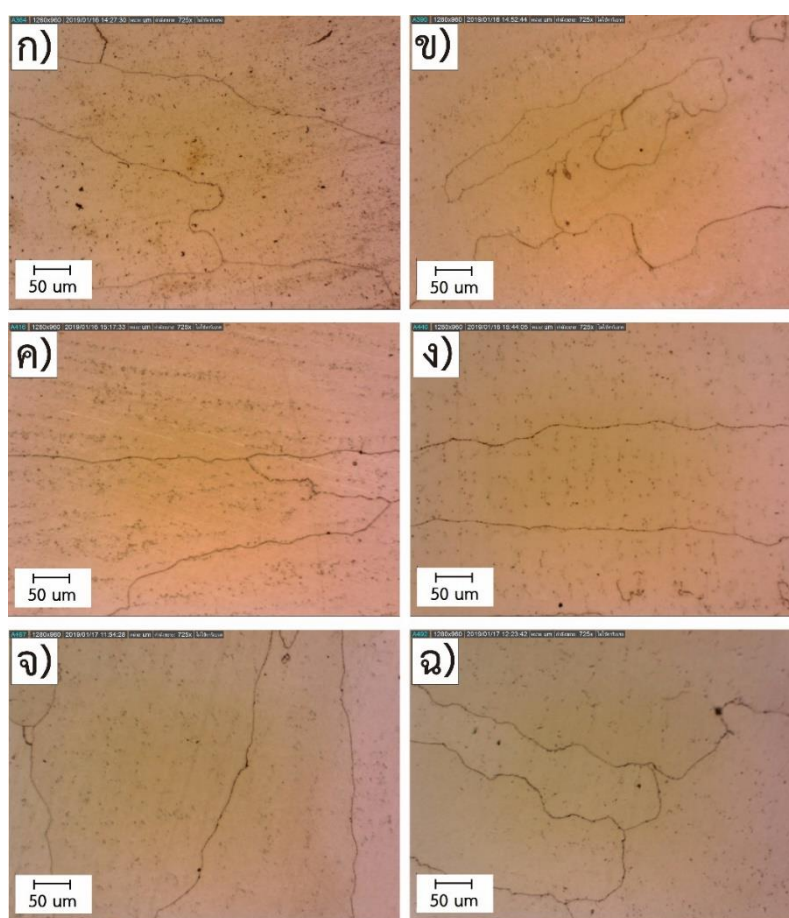
	ชิ้นงาน 0	ชิ้นงาน 1	ชิ้นงาน 2	ชิ้นงาน 3	ชิ้นงาน 4	ชิ้นงาน 5
Ni : Co	7.29	8.52	6.90	5.14	4.60	4.09

จากรูปที่ 4.4, 4.5 และตารางที่ 4.2 พบว่าในชิ้นงาน 1 - 3 เมื่ออัตราส่วนธาตุผสม Ni : Co ลดลง ขนาดของอนุภาค  $\gamma'$  และสัดส่วนเชิงพื้นที่ของเฟส  $\gamma'$  มีค่าเพิ่มขึ้น คาดว่าเป็นผลจากธาตุผสมโคบอลต์ เนื่องจากงานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่า การเติมโคบอลต์ในโลหะผสมพิเศษเนื้อพินนิกเกิลมีผลให้ solvus temperature ของอนุภาค  $\gamma'$  มีค่ามากขึ้น [2, 3, 14] การเพิ่มปริมาณธาตุผสมโคบอลต์จึงเป็นการเพิ่มความเสถียรของอนุภาค  $\gamma'$  การทำละลายอนุภาค  $\gamma'$  จึงทำได้ยากขึ้น ดังนั้นในชิ้นงาน 1-3 จึงพบว่าขนาด และสัดส่วนเชิงพื้นที่ของอนุภาค  $\gamma'$  มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณโคบอลต์ที่เพิ่ม

อย่างไรก็ตามจากรูปที่ 4.4, 4.5 และตารางที่ 2 พบว่าชิ้นงาน 4 - 5 เมื่ออัตราส่วนธาตุผสม Ni : Co ลดลง ขนาดและสัดส่วนเชิงพื้นที่ของอนุภาค  $\gamma'$  กลับมีค่าลดลง คาดว่าน่าจะเป็นผลจากธาตุผสมนิกเกิลที่ลดลงไปมาก เนื่องจากนิกเกิลเป็น forming elements หลักของอนุภาค  $\gamma'$  [1, 3, 7, 14] ดังนั้นการลดปริมาณธาตุผสมนิกเกิลจึงเป็นการลดความเสถียร และปริมาณการฟอร์มตัวของอนุภาค  $\gamma'$  เมื่อปริมาณธาตุผสมนิกเกิลลดลง การทำละลายอนุภาค  $\gamma'$  จึงทำได้ง่ายขึ้น ดังนั้นในชิ้นงาน 4 - 5 จึงพบว่าขนาดของอนุภาค  $\gamma'$  และสัดส่วนเชิงพื้นที่ของเฟส  $\gamma'$  มีค่าลดลง เมื่อปริมาณธาตุผสมนิกเกิลลดลง แม้ปริมาณธาตุโคบอลต์จะมีมากขึ้นก็ตาม

4.4 ผลการทดลองและ วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 และโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 ที่เติมอะลูมิเนียม นิกเกิล และโคบอลต์ ภายหลังจากการหลอมละลายแบบอาร์กสตูญอากาศ และการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 845°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

4.4.1 ผลการทดลองและ วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope, OM) ภายหลังจากบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 845°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



**รูปที่ 4.6** โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 และโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 ที่เติมอะลูมิเนียม นิกเกิล และโคบอลต์ หลังหลอมละลายแบบอาร์กสตูญอากาศ และทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 845 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง รูปจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง กำลังขยาย 725 เท่า ก) ชิ้นงาน 0, ข) ชิ้นงาน 1, ค) ชิ้นงาน 2, ง) ชิ้นงาน 3, จ) ชิ้นงาน 4 และ ฉ) ชิ้นงาน 5

ชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 และโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 ที่เติม อะลูมิเนียม นิกเกิล และโคบอลต์ (ชิ้นงาน 0 - 5) ภายหลังจากการหลอมละลายแบบอาร์กสเฟอญากาศ และทำละลายที่อุณหภูมิ 1175°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 845°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคที่ตรวจสอบได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงแสดงดังรูปที่ 4.6

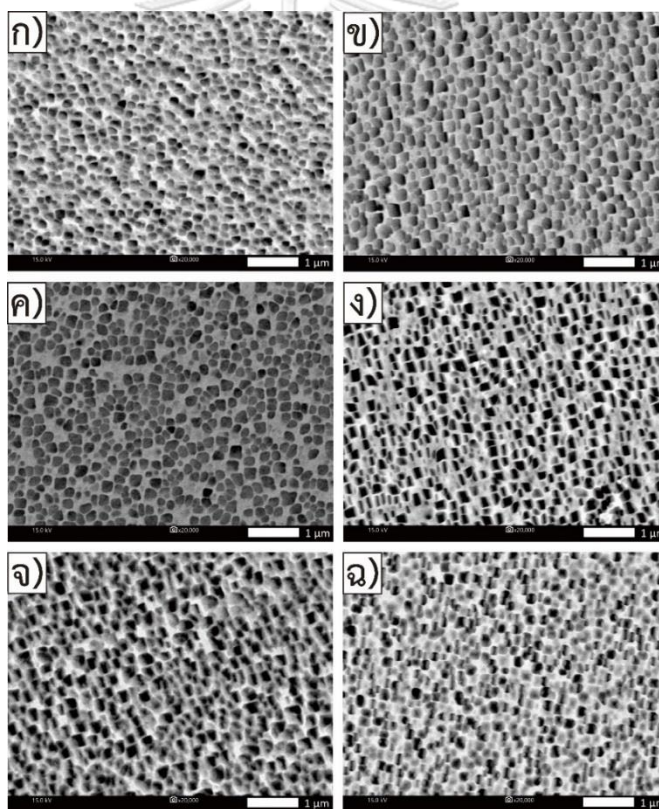
จากรูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคที่ได้หลังจากการหลอมละลายแบบอาร์กสเฟอญากาศ และการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 845°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าในทุกชิ้นงาน จะพบอนุภาคสี่เหลี่ยมกระจายตัวอยู่ภายในเนื้อพื้นมากขึ้น เมื่อเทียบกับ โครงสร้างจุลภาคหลังการทำละลายในรูป 4.2 นอกจากนี้จากรูป 4.6 ยังพบว่าอนุภาคสี่เหลี่ยมตกตะกอน ตามขอบเกรนอย่างชัดเจน โดยอนุภาคสี่เหลี่ยมที่กระจายตามเนื้อพื้น และตกตะกอนบริเวณขอบเกรน คาดว่าเป็นโครงสร้างคาร์ไบด์ โดยโครงสร้างคาร์ไบด์ที่กระจายในเนื้อพื้นคาดว่าเป็นคาร์ไบด์ชนิด MC และคาร์ไบด์ที่ตกตะกอนตามขอบเกรนคาดว่าเป็นคาร์ไบด์ชนิด MC หรืออาจเป็น คาร์ไบด์ชนิด  $M_{23}C_6$  ที่เกิดจากการสลายตัวของคาร์ไบด์ชนิด MC [1, 3, 7, 14, 15]

#### 4.4.2 ผลการทดลองและ วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ภายหลังจากบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 845°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

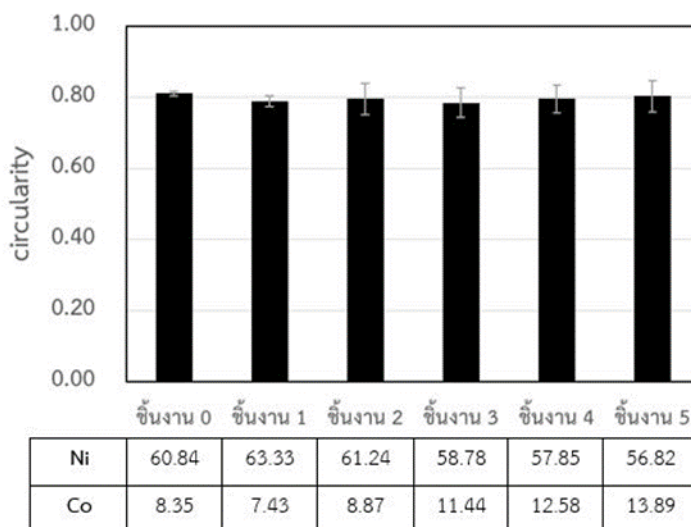
ชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 และโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 ที่เติม อะลูมิเนียม นิกเกิล และโคบอลต์ (ชิ้นงาน 0 - 5) ภายหลังจากการหลอมละลายแบบอาร์กสเฟอญากาศ และทำละลายที่อุณหภูมิ 1175°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 845°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคที่ตรวจสอบได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 20000 เท่าแสดงดังรูปที่ 4.7 และหาค่าความกลม (circularity) โดยเฉลี่ยได้ดังรูป 4.8

จากรูปที่ 4.7 และ 4.8 พบว่าในชิ้นงานที่มีการเติมอะลูมิเนียมเพิ่ม 1% โดยน้ำหนัก (ชิ้นงาน 1 - 5) อนุภาค  $\gamma'$  ยังคงมีลักษณะรูปร่าง (morphology) ค่อนข้างเหลี่ยม (cubic) โดยลักษณะรูปร่างของอนุภาค  $\gamma'$  นั้นจะถูกกำหนดโดยค่า absolute value of lattice misfit ระหว่างเนื้อพื้น  $\gamma$  และอนุภาค  $\gamma'$  โดยค่า absolute value of lattice misfit จะสัมพันธ์กับค่าผลต่างระหว่าง Lattice parameter ของเนื้อพื้น  $\gamma$  และอนุภาค  $\gamma'$  โดยหากค่า absolute value of lattice misfit มีค่าเข้าใกล้ 0 อนุภาค  $\gamma'$  จะมีลักษณะกลม หากค่า absolute value of lattice misfit มีค่าเพิ่มขึ้น

ลักษณะของอนุภาค  $\gamma'$  จะมีลักษณะเป็นเหลี่ยม (Cubic) มากขึ้น หากค่า absolute value of lattice misfit มีค่ามากเกินไปอนุภาค  $\gamma'$  จะมีลักษณะเป็น plate [3, 7] การเติมธาตุผสมจะส่งผลทำให้ค่า Lattice parameter ของเนื้อพื้น  $\gamma$  หรืออนุภาค  $\gamma'$  มีค่าเปลี่ยนแปลงไป โดยการเติมธาตุผสมอะลูมิเนียม จะมีผลต่อค่า Lattice parameter ของอนุภาค  $\gamma'$  เนื่องจากอะลูมิเนียมเป็นธาตุที่ชอบอยู่ในอนุภาค  $\gamma'$  โดยผลที่ได้ในรูปที่ 4.7 นั้นสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่พบว่า การเติมธาตุผสมอะลูมิเนียมเพิ่ม 1% โดยน้ำหนัก เป็นปริมาณการเติมธาตุผสมอะลูมิเนียมที่เหมาะสมในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล เกรด Inconel 738 ที่อนุภาค  $\gamma'$  ยังคงมีลักษณะรูปร่างเป็น cubic ซึ่งหากเติมธาตุผสมอะลูมิเนียม มากกว่า 1% โดยน้ำหนัก จะพบอนุภาค  $\gamma'$  รวมตัวกันเป็นแพ (Rafting) [12]



**รูปที่ 4.7** โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 และโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 ที่เติมอะลูมิเนียม นิกเกิล และโคบอลต์ หลังหลอมละลายแบบอาร์คสตูญญากาศ และทำละลายที่อุณหภูมิ  $1175^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นบ่มแข็งที่อุณหภูมิ  $845^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมง รูปจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 20000 เท่า ก) ชิ้นงาน 0, ข) ชิ้นงาน 1, ค) ชิ้นงาน 2, ง) ชิ้นงาน 3, จ) ชิ้นงาน 4 และ ฉ) ชิ้นงาน 5



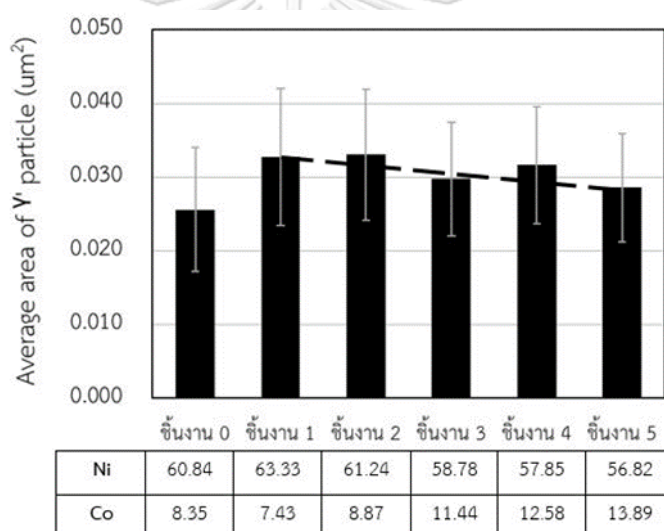
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่าความกลมโดยเฉลี่ยของอนุภาค  $\gamma'$  หลังการบ่มแข็งในแต่ละชั้นงาน

ในทางตรงกันข้ามการเติมธาตุผสมนิกเกิล และโคบอลต์ ไม่ส่งผลต่อลักษณะรูปร่างของอนุภาค  $\gamma'$  ดังแสดงในรูปที่ 4.7ข -4.7ฉ เนื่องจากธาตุผสมนิกเกิล ซอบอยู่ทั้งในเนื้อพื้น  $\gamma$  และอนุภาค  $\gamma'$  ทำให้ไม่ส่งผลต่อค่า absolute value of lattice misfit ในส่วนของธาตุผสมโคบอลต์ แม้ว่าซอบที่จะอยู่ในเนื้อพื้น  $\gamma$  ในรูป solid solution แต่เนื่องจากขนาดอะตอมของโคบอลต์ใกล้เคียงกับนิกเกิล จึงไม่ส่งผลให้ Lattice parameter ของเนื้อพื้น  $\gamma$  เปลี่ยนแปลงมากนัก ส่งผลให้ค่า absolute value of lattice misfit ระหว่างเนื้อพื้น  $\gamma$  และอนุภาค  $\gamma'$  ไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ

จากรูปที่ 4.7 เมื่อคำนวณขนาดหรือพื้นที่โดยเฉลี่ยของอนุภาค  $\gamma'$  หลังการบ่มแข็งในแต่ละชั้นงาน พบว่าขนาดของอนุภาค  $\gamma'$  ในชั้นงานที่ 0 – 5 มีขนาด 0.026, 0.033, 0.033, 0.030, 0.032 และ 0.029  $\mu\text{m}^2$  ตามลำดับ โดยขนาดของอนุภาค  $\gamma'$  สามารถแสดงเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 4.9

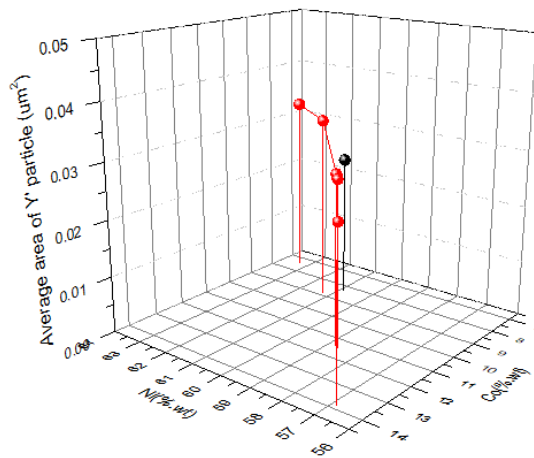
จากรูปที่ 4.9 พบว่าในชั้นงานที่มีการเติมธาตุผสมอะลูมิเนียม 1% โดยน้ำหนัก (ชั้นงาน 1-5) มีขนาดของอนุภาค  $\gamma'$  ที่ใหญ่กว่า ชั้นงานที่ไม่มีการเติมธาตุผสมอะลูมิเนียม (ชั้นงาน 0) เนื่องจากอะลูมิเนียม เป็นธาตุ forming elements หลักของอนุภาค  $\gamma'$  [1, 3, 7, 14] ดังนั้นการเพิ่มปริมาณธาตุผสมอะลูมิเนียม จะช่วยให้อนุภาค  $\gamma'$  โตได้ง่ายระหว่างการบ่มแข็ง

นอกจากนี้จากรูปที่ 4.9 และตารางที่ 4.2 พิจารณาชิ้นงาน 1- 5 พบว่าชิ้นงานที่มีปริมาณอัตราส่วนปริมาณธาตุผสม Ni : Co มากกว่า จะมีขนาดของอนุภาค  $\gamma'$  ที่ใหญ่กว่า แสดงให้เห็นว่าธาตุผสมนิกเกิล และโคบอลต์จะมีอิทธิพลต่อขนาดอนุภาค  $\gamma'$  ในโลหะผสมพิเศษเนื้อพ่นนิกเกิล ที่ตรงข้ามกัน โดยการเพิ่มปริมาณธาตุผสมนิกเกิล แม้ว่าจะเป็นการเพิ่มความเสถียรของเนื้อพ่น  $\gamma$  แต่ก็ยังเป็นการเพิ่มความเสถียรของอนุภาค  $\gamma'$  เนื่องจาก นิกเกิลเป็นธาตุ forming elements หลักของอนุภาค  $\gamma'$  [1, 3, 7, 14] ดังนั้นการเพิ่มปริมาณธาตุผสม นิกเกิลจะช่วยให้อนุภาค  $\gamma'$  โตได้ง่ายระหว่างการบ่มแข็ง ในทางตรงข้ามการเพิ่มปริมาณธาตุผสมโคบอลต์จะส่งผลให้อนุภาค  $\gamma'$  มีขนาดที่เล็กลง เนื่องจากเมื่อธาตุผสมโคบอลต์ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลในการลด critical radius ในการเกิดอนุภาค  $\gamma'$  ทำให้อนุภาค  $\gamma'$  มีขนาดที่เล็กลง [10, 16]



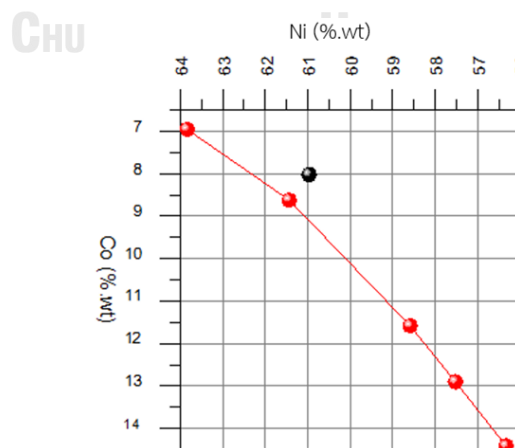
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงพื้นที่โดยเฉลี่ยของอนุภาค  $\gamma'$  หลังการบ่มแข็งในแต่ละชิ้นงาน

ดังนั้นจากรูปที่ 4.9 การที่ขนาดหรือพื้นที่โดยเฉลี่ยของอนุภาค  $\gamma'$  มีแนวโน้มลดลงจากชิ้นงาน 1 - 5 ตามลำดับ คาดว่าเป็นผลร่วมกันของการลดปริมาณธาตุผสมนิกเกิล และการเพิ่มธาตุโคบอลต์ จากชิ้นงาน 1 - 5 โดยเมื่อพิจารณา กราฟสามมิติของการเปลี่ยนแปลงธาตุผสมนิกเกิล และโคบอลต์ ต่อขนาดอนุภาค  $\gamma'$  หลังบ่มแข็งที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละชิ้นงานดังรูปที่ 4.10 โดยจุดสีดำแทนกลุ่มชิ้นงานที่ไม่มีการเติมธาตุผสมเพิ่ม (ชิ้นงาน 0) และจุดสีแดงแทนกลุ่มชิ้นงานที่มีการเติมธาตุผสมเพิ่ม (ชิ้นงาน 1 - 5) จากรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าในกลุ่มชิ้นงานที่มีการเติมธาตุผสม อัตราการลดลงของธาตุนิกเกิล จะไม่เท่ากับอัตราการเพิ่มของธาตุโคบอลต์ ดังสังเกตได้จากเส้นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงธาตุผสมนิกเกิล และโคบอลต์เป็นเส้นโค้ง ไม่ใช่เส้นตรง



**รูปที่ 4.10** กราฟสามมิติของการเปลี่ยนแปลงธาตุผสมนิกเกิล และโคบอลต์ ต่อขนาดอนุภาค  $\gamma'$  หลังบ่มแข็งที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละชั้นงาน

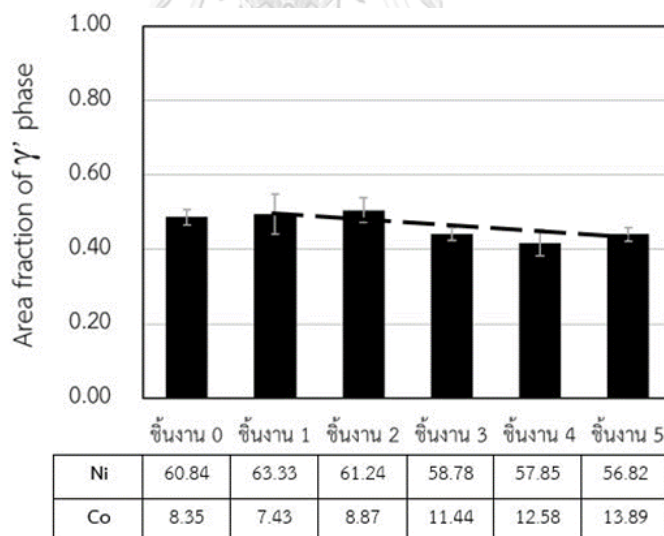
จากรูปที่ 4.10 หากมองรูปกราฟสามมิติของการเปลี่ยนแปลงธาตุผสมนิกเกิล และโคบอลต์ ต่อขนาดอนุภาค  $\gamma'$  ที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละชั้นงาน จากด้านบนเพียงด้านเดียว จะเห็นลักษณะเส้นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงธาตุผสมนิกเกิล และโคบอลต์เป็นเส้นโค้งดังรูปที่ 4.11 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มของธาตุผสมโคบอลต์จากชั้นงาน 1-5 น้อยกว่า การลดลงของธาตุนิกเกิลจากชั้นงานที่ 1-5 แต่ขนาดอนุภาค  $\gamma'$  ที่ได้ จากผลการเพิ่มธาตุโคบอลต์ และการลดธาตุผสมนิกเกิลมีค่าเท่ากัน ดังเห็นได้จากอนุภาค  $\gamma'$  มีแนวโน้มลดลงเป็นเส้นตรงจากชั้นงาน 1-5 ดังนั้นจึงคาดว่าธาตุผสมโคบอลต์มีผลต่อขนาดอนุภาค  $\gamma'$  หลังบ่มแข็งมากกว่าธาตุผสมนิกเกิล



**รูปที่ 4.11** กราฟสามมิติของการเปลี่ยนแปลงธาตุผสมนิกเกิล และโคบอลต์ ต่อขนาดอนุภาค  $\gamma'$  หลังบ่มแข็งที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละชั้นงาน (มองกราฟด้านบน)

จากรูปที่ 4.7 เมื่อคำนวณสัดส่วนเชิงพื้นที่ของเฟส  $\gamma'$  หลังการบ่มแข็งในแต่ละชั้นงาน พบว่า สัดส่วนเชิงพื้นที่ของเฟส  $\gamma'$  ในชั้นงานที่ 0 – 5 มีสัดส่วนเชิงพื้นที่ 0.49, 0.49, 0.51, 0.44, 0.42 และ 0.44 ตามลำดับ โดยสัดส่วนเชิงพื้นที่ของเฟส  $\gamma'$  สามารถแสดงเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 4.12

จากรูปที่ 4.12 พบว่าผลของธาตุผสมนิกเกิล มีผลกระทบต่อ สัดส่วนเชิงพื้นที่ของเฟส  $\gamma'$  มากกว่าธาตุผสมโคบอลต์ และอะลูมิเนียม โดยจะเห็นได้จาก ชั้นงาน 1 และชั้นงาน 2 ที่มีการเติมธาตุผสมอะลูมิเนียม 1% โดยน้ำหนัก มีสัดส่วนเชิงพื้นที่ของเฟส  $\gamma'$  ใกล้เคียงกับ ชั้นงาน 0 ที่ไม่มีการเติมธาตุผสมอะลูมิเนียม 1% โดยน้ำหนัก และจากงานวิจัยก่อนหน้าพบว่าการเพิ่มธาตุผสมโคบอลต์ จะส่งผลให้ สัดส่วนเชิงพื้นที่ของอนุภาค  $\gamma'$  เพิ่มขึ้นหลังการบ่มแข็ง [17] ซึ่งตรงกันข้ามกับผลที่พบในงานวิจัยนี้ ซึ่งพบว่า สัดส่วนเชิงพื้นที่ของอนุภาค  $\gamma'$  มีค่าลดลงเมื่อธาตุผสมโคบอลต์ มากขึ้น คาดว่าเนื่องจากในงานวิจัยนี้นอกจากมีการเพิ่มธาตุผสมโคบอลต์แล้ว ยังมีการลดลงของธาตุผสมนิกเกิลด้วย ซึ่งนิกเกิลเป็นธาตุ forming elements หลักของเฟส  $\gamma'$  [1, 3, 7, 14] ดังนั้นการลดธาตุผสมนิกเกิล จึงมีผลทำให้สัดส่วนเชิงพื้นที่ของอนุภาค  $\gamma'$  ลดลงซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้ในรูปที่ 4.12

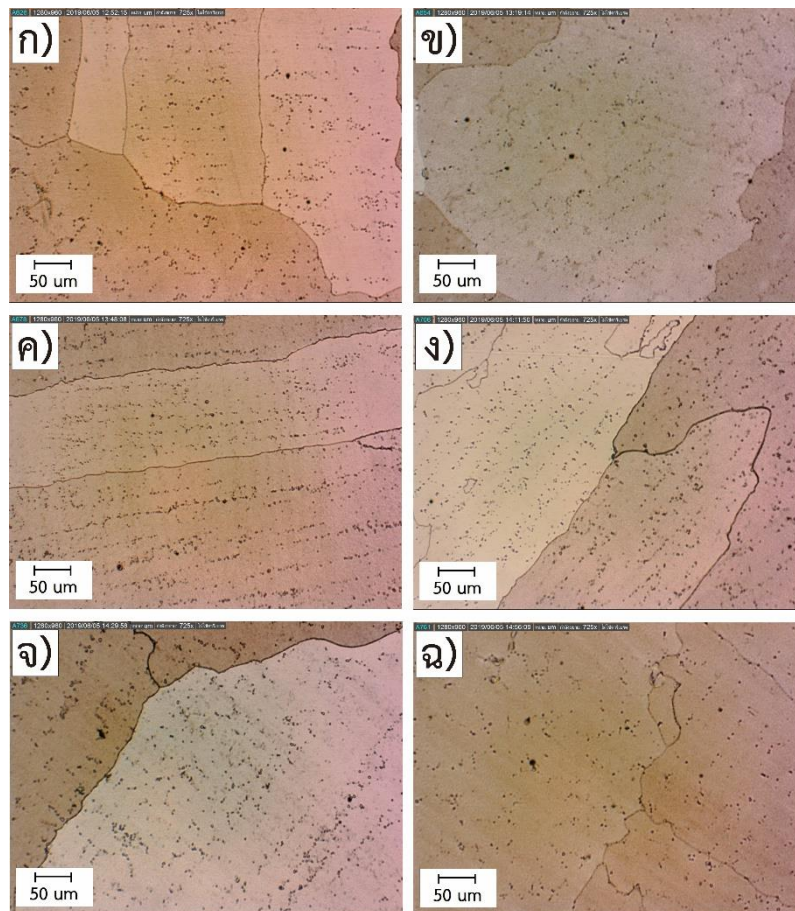


รูปที่ 4.12 กราฟแสดงสัดส่วนเชิงพื้นที่โดยเฉลี่ยของอนุภาค  $\gamma'$  หลังการบ่มแข็งในแต่ละชั้นงาน

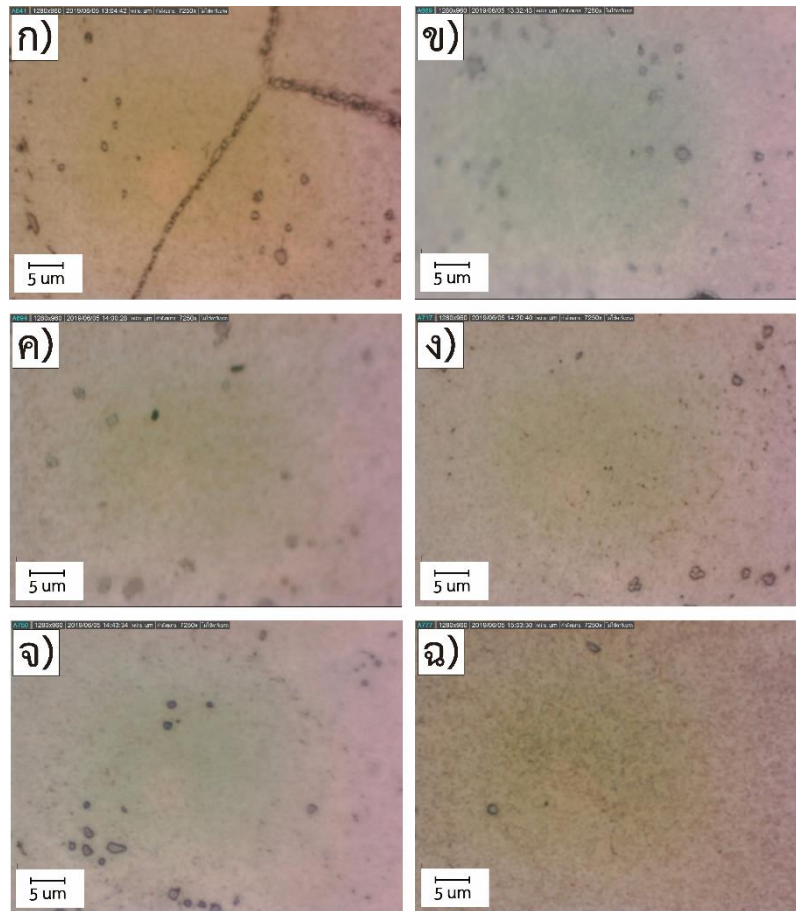


4.5 ผลการทดลองและ วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 และโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 ที่เติมอะลูมิเนียม นิกเกิล และโคบอลต์ ภายหลังจากการใช้งานอุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง

4.5.1 ผลการทดลองและ วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope, OM) ภายหลังจากการใช้งานอุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง



**รูปที่ 4.13** โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 และโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 ที่เติมอะลูมิเนียม นิกเกิล และโคบอลต์ หลังหลอมละลายแบบอาร์กสตูญญากาศ และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนมาตรฐาน จากนั้นจำลองการใช้งานอุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง กำลังขยาย 725 เท่า ก) ชิ้นงาน 0, ข) ชิ้นงาน 1, ค) ชิ้นงาน 2, ง) ชิ้นงาน 3, จ) ชิ้นงาน 4 และ ฉ) ชิ้นงาน 5

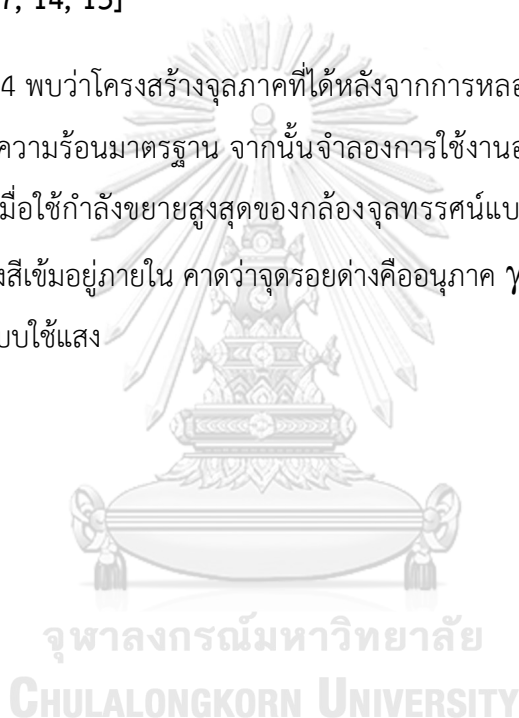


**รูปที่ 4.14** โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 และโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 ที่เติมอะลูมิเนียม นิกเกิล และโคบอลต์ หลังหลอมละลายแบบอาร์กสลุญญากาศ และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนมาตรฐาน จากนั้นจำลองการใช้งานอุณหภูมิ  $900^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 400 ชั่วโมง ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง กำลังขยาย 7250 เท่า ก) ชิ้นงาน 0, ข) ชิ้นงาน 1, ค) ชิ้นงาน 2, ง) ชิ้นงาน 3, จ) ชิ้นงาน 4 และ ฉ) ชิ้นงาน 5

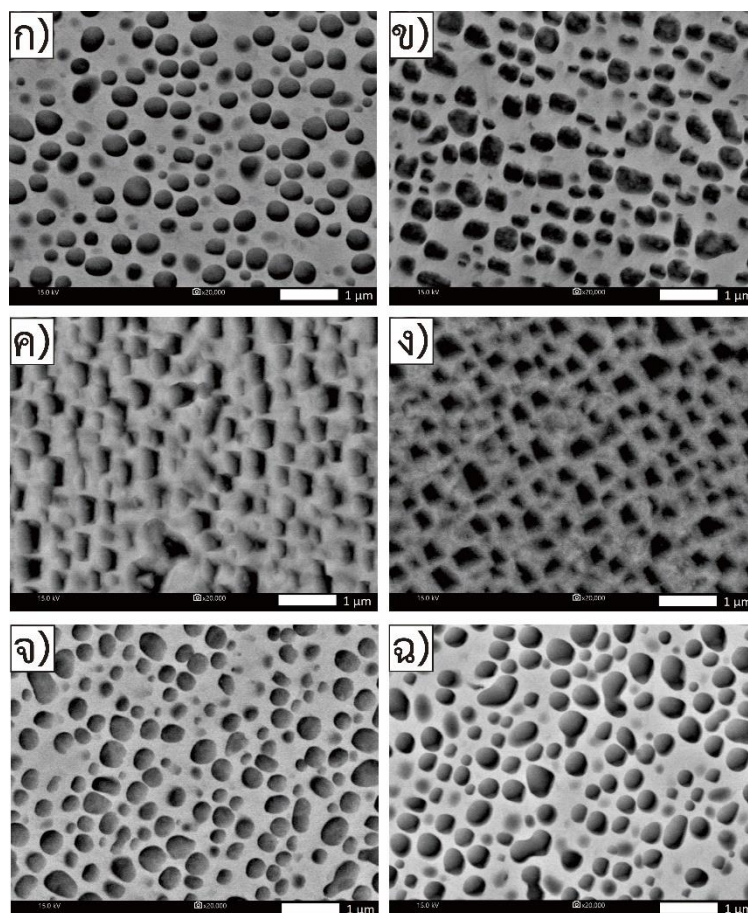
ชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 และโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 ที่เติม อะลูมิเนียม นิกเกิล และโคบอลต์ (ชิ้นงาน 0 - 5) ภายหลังจากหลอมละลายแบบอาร์กสลุญญากาศ และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนมาตรฐาน (การทำละลายที่อุณหภูมิ  $1175^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นมีการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ  $845^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมง) จากนั้นจำลองการใช้งานอุณหภูมิ  $900^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 400 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคที่ตรวจสอบได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง แสดง ดังรูปที่ 4.13 และ 4.14

จากรูปที่ 4.13 พบว่าโครงสร้างจุลภาคที่ได้หลังจากการหลอมละลายแบบอาร์กสลุญญากาศ และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนมาตรฐาน จากนั้นจำลองการใช้งานอุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง ในทุกชิ้นงาน จะพบอนุภาคสีเข้มกระจายตัวอยู่ในเนื้อพื้น และตามขอบเกรนอย่างเห็นได้ชัด ลักษณะเดียวกับภาพโครงสร้างจุลภาคในกระบวนการบ่มแข็ง แต่มีจำนวนที่มากกว่า โดยอนุภาคสีเข้มที่กระจายตามเนื้อพื้น และตกตะกอนบริเวณขอบเกรน คาดว่าเป็นโครงสร้างคาร์ไบด์ โดยโครงสร้างคาร์ไบด์ที่กระจายในเนื้อพื้นคาดว่าเป็นคาร์ไบด์ชนิด MC และคาร์ไบด์ที่ตกตะกอนตามขอบเกรนคาดว่าเป็นคาร์ไบด์ชนิด MC หรืออาจเป็น คาร์ไบด์ชนิด  $M_{23}C_6$  ที่เกิดจากการสลายตัวของคาร์ไบด์ชนิด MC [1, 3, 7, 14, 15]

จากรูปที่ 4.14 พบว่าโครงสร้างจุลภาคที่ได้หลังจากการหลอมละลายแบบอาร์กสลุญญากาศ และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนมาตรฐาน จากนั้นจำลองการใช้งานอุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง ในทุกชิ้นงานเมื่อใช้กำลังขยายสูงสุดของกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (7250 เท่า) จะพบว่าภายในเนื้อพื้นมีจุดต่างสีเข้มอยู่ภายใน คาดว่าจุดรอยต่างคืออนุภาค  $\gamma'$  ที่มีขนาดใหญ่จนเริ่มสังเกตเห็นจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง



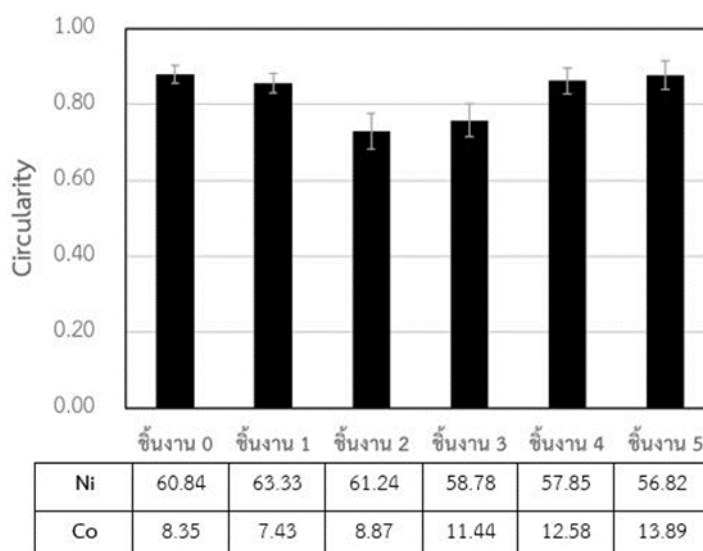
4.5.2 ผลการทดลองและ วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ภายหลังจากการใช้งานอุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง



รูปที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 และโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 ที่เติมอะลูมิเนียม นิกเกิล และโคบอลต์ หลังหลอมละลายแบบอาร์กสลุญญากาศ และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนมาตรฐาน จากนั้นจำลองการใช้งานอุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง รูปจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 20000 เท่า ก) ชิ้นงาน 0, ข) ชิ้นงาน 1, ค) ชิ้นงาน 2, ง) ชิ้นงาน 3, จ) ชิ้นงาน 4 และ ฉ) ชิ้นงาน 5

ชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 และโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 ที่เติม อะลูมิเนียม นิกเกิล และโคบอลต์ (ชิ้นงาน 0 - 5) ภายหลังจากหลอมละลายแบบอาร์กสลุญญากาศ และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนมาตรฐาน (การทำละลายที่อุณหภูมิ 1175°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 845°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง) จากนั้นจำลองการใช้งานอุณหภูมิ

900°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคที่ตรวจสอบได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 20000 แสดงดังรูปที่ 4.15 และหาค่าความกลม (circularity) โดยเฉลี่ยได้ดังรูป 4.16



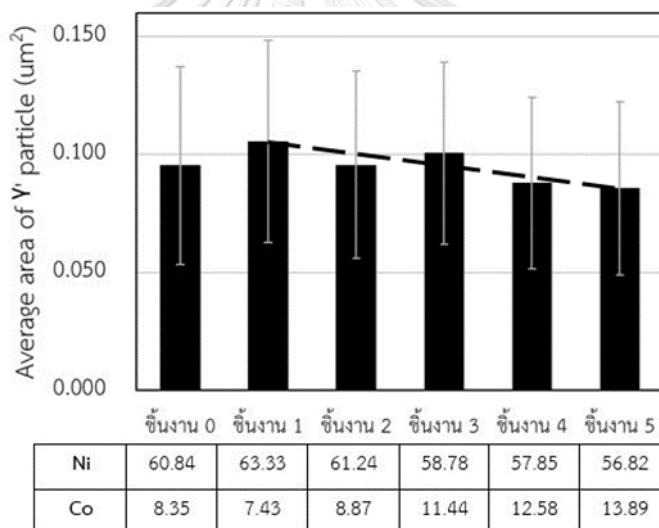
**รูปที่ 4.16** กราฟแสดงค่าความกลมโดยเฉลี่ยของอนุภาค  $\gamma'$  ภายหลังจากการใช้งานอุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง ในแต่ละชั้นงาน

จากรูปที่ 4.15 และ 4.16 พบว่าในชั้นงานที่อัตราส่วน Ni : Co สูง (ชั้นงาน 0 และชั้นงาน 1) จะมีรูปร่าง (morphology) ของอนุภาค  $\gamma'$  เป็นทรงกลมมน คาดว่าเป็นผลจากการอิทธิพลของนิเกิล ในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิล เนื่องจากนิเกิลเป็นธาตุที่เพิ่มความเสถียรของโครงสร้างพื้น และเป็นธาตุ forming elements หลักของอนุภาค  $\gamma'$  อีกด้วย [1, 3, 7, 14] ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่ชั้นงานที่มีปริมาณนิเกิลมาก จะมีค่า lattice parameters ของเนื้อพื้น  $\gamma$  และอนุภาค  $\gamma'$  แตกต่างกันน้อย ส่งผลให้ค่า absolute value of lattice misfit ระหว่างเนื้อพื้น  $\gamma$  และอนุภาค  $\gamma'$  มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ รูปร่างของอนุภาค  $\gamma'$  จึงมีลักษณะกลมมน

ในทางตรงข้าม ชั้นงาน 2 และชั้นงาน 3 มีรูปร่างของอนุภาค  $\gamma'$  ลักษณะค่อนข้างไปในทรงเหลี่ยม คาดว่าน่าจะเกิดขึ้นเนื่องจากชั้นงานทั้งสองมีอัตราส่วน Ni : Co อยู่ระหว่างกลุ่มชั้นงานที่อัตราส่วน Ni : Co สูง และ กลุ่มชั้นงานที่อัตราส่วน Ni : Co ต่ำ ทำให้ผลของธาตุผสมอะลูมิเนียมเด่นชัดขึ้น โดยธาตุผสมอะลูมิเนียมนั้นจะมีผลต่อค่า Lattice parameter ของอนุภาค  $\gamma'$  เนื่องจากอะลูมิเนียมเป็นธาตุที่ขอบอยู่ในอนุภาค  $\gamma'$  [1, 3, 7, 14] ส่งผลให้ค่า absolute value of lattice misfit ระหว่างเนื้อพื้น  $\gamma$  และอนุภาค  $\gamma'$  มีค่าเพิ่มขึ้น อนุภาค  $\gamma'$  จึงมีลักษณะค่อนข้างเหลี่ยม

ในชิ้นงานที่มีปริมาณอัตราส่วนธาตุผสม Ni : Co ต่ำ (ชิ้นงาน 4 และ ชิ้นงาน 5) มีลักษณะกลม หลังจากจำลองการใช้งานที่ 900°C นาน 400 ชั่วโมง คาดว่าเนื่องจากผลของธาตุผสมโคบอลต์ ทำให้อะตอมธาตุ W, Mo, Cr ละลายกลับในเนื้อพื้น  $\gamma$  ได้มากขึ้นนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงค่า absolute value of lattice misfit ระหว่างเนื้อพื้น  $\gamma$  matrix และอนุภาค  $\gamma'$  ลดลงเข้าใกล้ศูนย์ รูปร่างของอนุภาค  $\gamma'$  จึงมีลักษณะกลับไปเป็นทรงกลมมนขึ้นอีกครั้งหนึ่งหลังจำลองการใช้งาน [10, 18]

จากรูปที่ 4.15 เมื่อคำนวณพื้นที่โดยเฉลี่ยของอนุภาค  $\gamma'$  ภายหลังจากจำลองการใช้งานอุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง พบว่าพื้นที่โดยเฉลี่ยของอนุภาค  $\gamma'$  ในชิ้นงานที่ 0 – 5 มีค่า 0.095, 0.105, 0.096, 0.101, 0.088 และ 0.086  $\mu\text{m}^2$  ตามลำดับ โดยพื้นที่โดยเฉลี่ยของอนุภาค  $\gamma'$  สามารถแสดงเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 4.17



**รูปที่ 4.17** กราฟแสดงพื้นที่โดยเฉลี่ยของอนุภาค  $\gamma'$  ภายหลังจากจำลองการใช้งานอุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง ในแต่ละชิ้นงาน

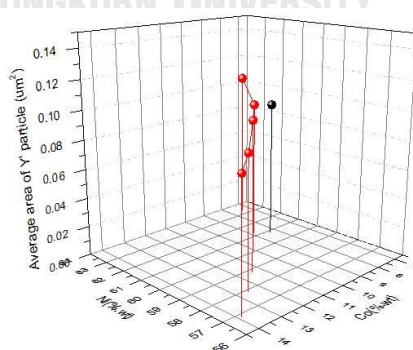
จากรูปที่ 4.17 พบว่าในชิ้นงานที่มีปริมาณอัตราส่วนธาตุผสม Ni : Co ต่ำ จะมีขนาดหรือพื้นที่โดยเฉลี่ยของอนุภาค  $\gamma'$  ที่เล็กกว่า คาดว่าเนื่องจากอิทธิพลของโคบอลต์ที่ส่งผลให้ต่อค่า D (diffusion coefficient) ของ solutes atom in matrix มีค่าลดลง โดยค่า D ของแต่ละธาตุจะหาได้ตามสมการที่ 5 [11]

$$D = AK/C_e \quad (5)$$

เมื่อ  $A$  คือ ค่าคงที่,  $K$  คือ ค่า coarsening rate,  $C_e$  คือ ค่า concentration of solute.

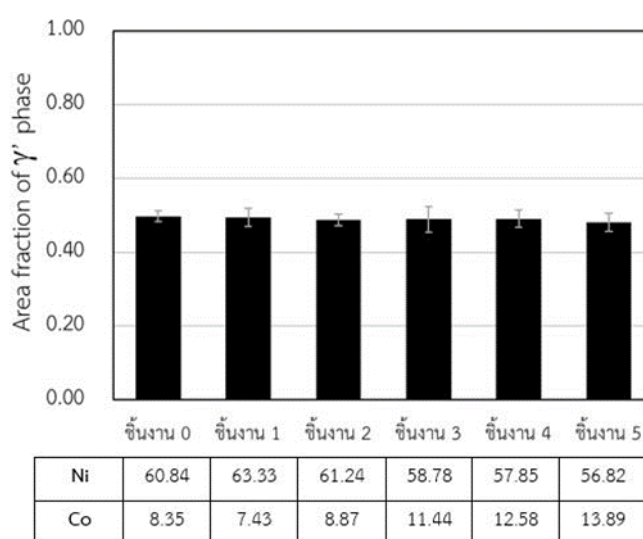
จากสมการที่ 5 เมื่อค่า  $D$  ลดลง จะทำให้ solutes atom ที่ใช้ในการสร้างอนุภาค  $\gamma'$  ละลายอยู่ในเนื้อพื้น  $\gamma$  ได้มากขึ้น จึงทำให้ค่าอัตราการโต (coarsening rate) มีค่าลดลง ดังนั้นเมื่อ ปริมาณธาตุผสมโคบอลต์ เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อนุภาค  $\gamma'$  มีการโตช้าลงหลังจำลองการใช้งาน เนื่องจาก อัตราการโต (coarsening rate) ของอนุภาค  $\gamma'$  มีค่าลดลง [16, 17, 19]

นอกจากนี้แนวโน้มขนาดอนุภาค  $\gamma'$  หลังจำลองการใช้งานอุณหภูมิ  $900^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 400 ชั่วโมง ที่ลดลงจากชิ้นงาน 1-5 คาดว่ายังเป็นผลจากการลดลงของธาตุникเกิดจากชิ้นงาน 1-5 ร่วมด้วย เนื่องจากนิกเกิดเป็นธาตุ forming elements หลักของอนุภาค  $\gamma'$  [1, 3, 7, 14] โดยเมื่อพิจารณา กราฟสามมิติของการเปลี่ยนแปลงธาตุผสมนิกเกิด และโคบอลต์ ต่อขนาดอนุภาค  $\gamma'$  หลังจำลองการใช้งานอุณหภูมิ  $900^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 400 ชั่วโมง ที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละชิ้นงานดังรูปที่ 4.18 โดยจุดสีดำแทนกลุ่มชิ้นงานที่ไม่มีการเติมธาตุผสมเพิ่ม (ชิ้นงาน 0) และจุดสีแดงแทนกลุ่มชิ้นงานที่มีการเติมธาตุผสมเพิ่ม (ชิ้นงาน 1 - 5) จากรูปที่ 4.18 จะเห็นได้ว่าในกลุ่มชิ้นงานที่มีการเติมธาตุผสม อัตราการลดลงของธาตุนิกเกิด จะไม่เท่ากับอัตราการเพิ่มของธาตุโคบอลต์ ดังสังเกตได้จากเส้นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงธาตุผสมนิกเกิด และโคบอลต์เป็นเส้นโค้ง ไม่ใช่เส้นตรง ดังนั้นจึงคาดว่าธาตุผสมโคบอลต์ มีผลต่อขนาดอนุภาค  $\gamma'$  หลังจำลองการใช้งานอุณหภูมิ  $900^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 400 ชั่วโมง มากกว่าธาตุผสมนิกเกิด ซึ่งสามารถอธิบายผลของธาตุโคบอลต์ ต่อขนาดอนุภาค  $\gamma'$  ที่มากกว่าผลของธาตุนิกเกิด ได้เช่นเดียวกับในกรณีขนาดอนุภาค  $\gamma'$  หลังการบ่มแข็ง



รูปที่ 4.18 กราฟสามมิติของการเปลี่ยนแปลงธาตุผสมนิกเกิด และโคบอลต์ ต่อขนาดอนุภาค  $\gamma'$  หลังจำลองการใช้งานอุณหภูมิ  $900^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 400 ชั่วโมงที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละชิ้นงาน

แต่อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้พบว่าในชั้นงาน 0 แม้จะมีปริมาณธาตุผสมโคบอลต์ มากกว่าชั้นงาน 1 และมีปริมาณธาตุผสมโคบอลต์ที่ค่อนข้างสูง แต่ขนาดอนุภาค  $\gamma'$  กลับเล็กกว่า คาดว่าอาจมาจากอิทธิพลของธาตุผสมอะลูมิเนียม โดยในชั้นงาน 0 นั้นมีปริมาณธาตุผสมอะลูมิเนียม ที่น้อยกว่าในชั้นงาน 1 โดยจากงานวิจัยก่อนหน้าพบว่า การเติมอะลูมิเนียม ส่งผลต่อการเพิ่มอัตราการโต (coarsening rate) ของอนุภาค  $\gamma'$  [12, 13, 20] ดังนั้นผลจากธาตุผสมอะลูมิเนียม จึงทำให้ขนาดของอนุภาค  $\gamma'$  ของชั้นงาน 0 โตช้ากว่า ชั้นงาน 1 ดังแสดงในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงสัดส่วนเชิงพื้นที่โดยเฉลี่ยของเฟส  $\gamma'$  ภายหลังจากการใช้งานที่อุณหภูมิ  $900^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 400 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.15 เมื่อคำนวณสัดส่วนเชิงพื้นที่ของเฟส  $\gamma'$  ภายหลังจากการใช้งานที่อุณหภูมิ  $900^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 400 ชั่วโมง พบว่าสัดส่วนเชิงพื้นที่ของเฟส  $\gamma'$  ในชั้นงานที่ 0 – 5 มีสัดส่วนเชิงพื้นที่ 0.50, 0.49, 0.49, 0.49, 0.49 และ 0.48 ตามลำดับ โดยสัดส่วนเชิงพื้นที่ของเฟส  $\gamma'$  สามารถแสดงเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 4.19

จากรูปที่ 4.19 พบว่าหลังจากการใช้งานที่  $900^{\circ}\text{C}$  นาน 400 ชั่วโมง สัดส่วนเชิงพื้นที่โดยเฉลี่ยของเฟส  $\gamma'$  ในแต่ละชั้นงานมีค่าใกล้เคียงกันมาก แสดงให้เห็นว่าการเติมธาตุผสมอะลูมิเนียม นิกเกิล และโคบอลต์ ในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด Inconel 738 ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อ สัดส่วนเชิงพื้นที่โดยเฉลี่ยของเฟส  $\gamma'$  หลังการใช้งานที่  $900^{\circ}\text{C}$  นาน 400 ชั่วโมง

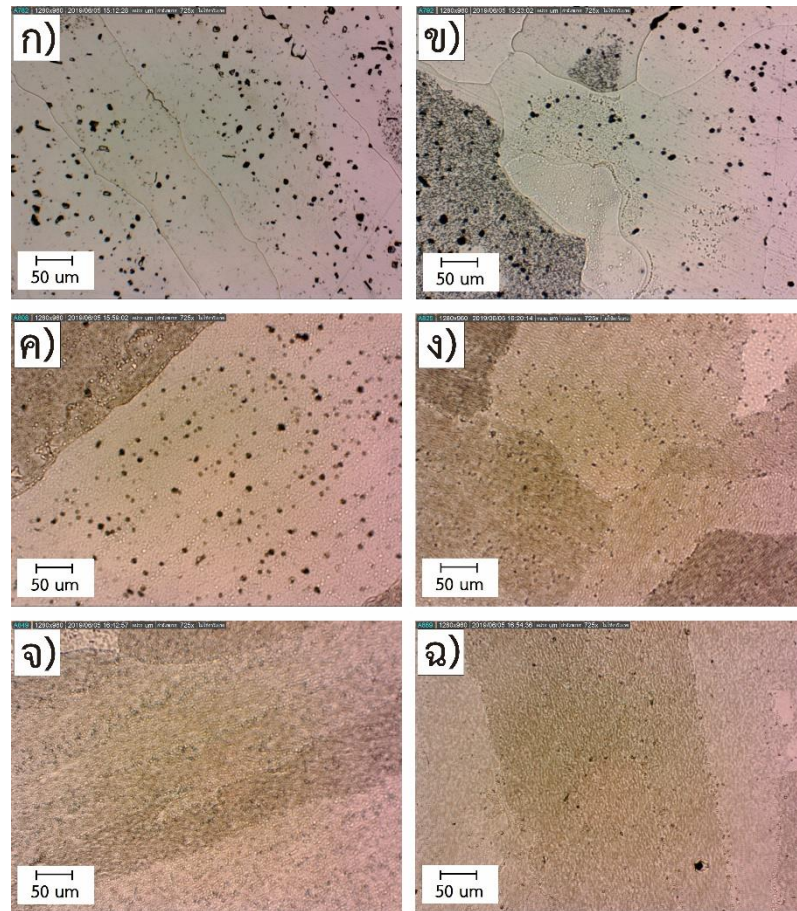


4.6 ผลการทดลองและ วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 และโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 ที่เติมอะลูมิเนียม นิกเกิล และโคบอลต์ ภายหลังจากการใช้งานอุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง

4.6.1 ผลการทดลองและ วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope, OM) ภายหลังจากการใช้งานอุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง

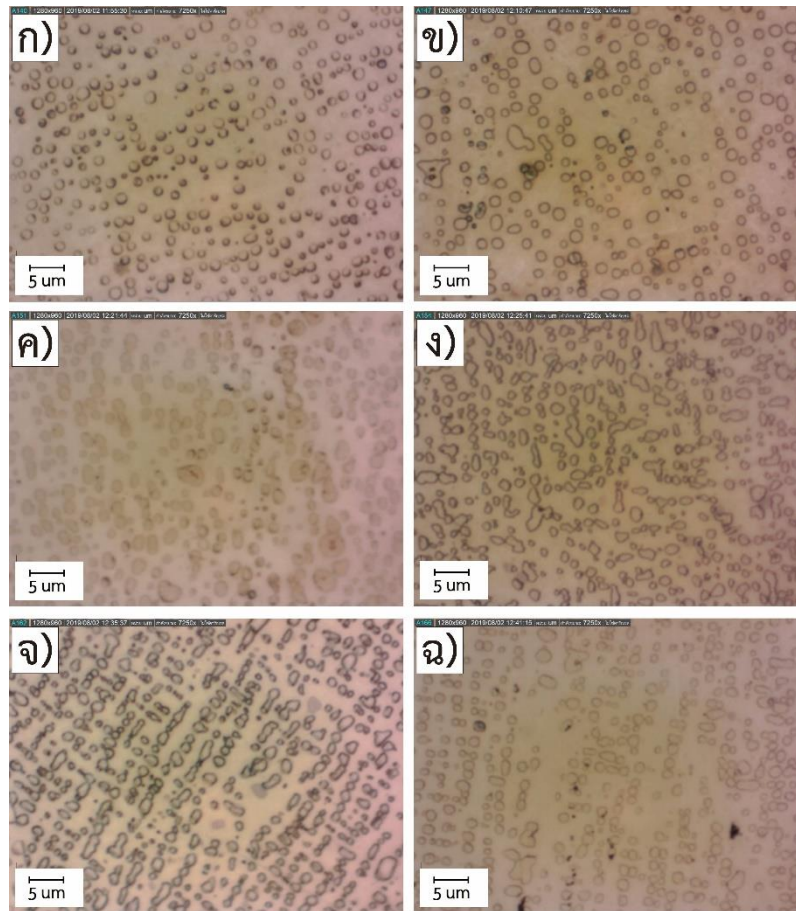
ชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 และโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 ที่เติมอะลูมิเนียม นิกเกิล และโคบอลต์ (ชิ้นงาน 0 - 5) ภายหลังจากการหลอมละลายแบบอาร์กสลุญญากาศ และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนมาตรฐาน (การทำละลายที่อุณหภูมิ 1175°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 845°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง) จากนั้นจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคที่ตรวจสอบได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง แสดงดังรูปที่ 4.20 และ 4.21

จากรูปที่ 4.20 พบว่าโครงสร้างจุลภาคที่ได้หลังการหลอมละลายแบบอาร์กสลุญญากาศ และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนมาตรฐาน จากนั้นจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง ในทุกชิ้นงาน จะพบอนุภาคสีเข้มกระจายตัวอยู่ในเนื้อพื้น และตามขอบเกรนอย่างเห็นได้ชัด และตกตะกอนบริเวณขอบเกรน คาดว่าเป็นโครงสร้างคาร์ไบด์ โดยโครงสร้างคาร์ไบด์ที่กระจายในเนื้อพื้นคาดว่าเป็นคาร์ไบด์ชนิด MC และคาร์ไบด์ที่ตกตะกอนตามขอบเกรนคาดว่าเป็นคาร์ไบด์ชนิด MC หรืออาจเป็น คาร์ไบด์ชนิด  $M_{23}C_6$  ที่เกิดจากการสลายตัวของคาร์ไบด์ชนิด MC [1, 3, 7, 15] นอกจากนี้ภายในเนื้อพื้นมีจุดดำสีเข้มอยู่ภายในอย่างชัดเจน ซึ่งคาดว่าจุดรอยต่างเหล่านี้คืออนุภาค  $\gamma'$  ที่มีขนาดใหญ่จนเริ่มสังเกตเห็นได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงกำลังขยาย 725 เท่า



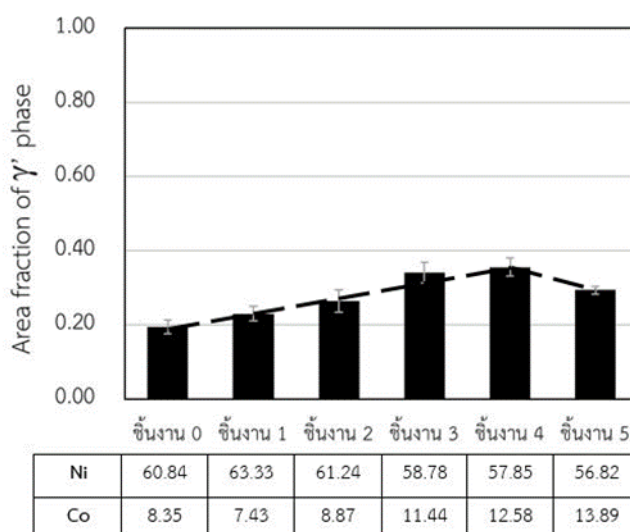
**รูปที่ 4.20** โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 และโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 ที่เติมอะลูมิเนียม นิกเกิล และโคบอลต์ หลังการหลอมละลายแบบอาร์กสลุญญากาศ และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนมาตรฐาน จากนั้นจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง กำลังขยาย 725 เท่า ก) ชิ้นงาน 0, ข) ชิ้นงาน 1, ค) ชิ้นงาน 2, ง) ชิ้นงาน 3, จ) ชิ้นงาน 4 และ ฉ) ชิ้นงาน 5

จากรูปที่ 4.21 พบว่าโครงสร้างจุลภาคที่ได้หลังจากการหลอมละลายแบบอาร์กสลุญญากาศ และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนมาตรฐาน จากนั้นจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง ในทุกชิ้นงาน จะพบอนุภาคใส กระจายตัวอยู่ภายในเนื้อพื้น ซึ่งคาดว่าอนุภาคใสเหล่านี้คือ อนุภาค  $\gamma'$  ที่โตขึ้นระหว่างการจำลองการใช้งาน ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง จนขนาด ใหญ่ขึ้นมาก จนสามารถเห็นได้อย่างชัดเจนจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงกำลังขยาย 7250 เท่า



**รูปที่ 4.21** โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 และโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 ที่เติมอะลูมิเนียม นิกเกิล และโคบอลต์ หลังหลอมละลายแบบอาร์กสตูญญากาศ และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนมาตรฐาน จากนั้นจำลองการใช้งานอุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง กำลังขยาย 7250 เท่า ก) ชิ้นงาน 0, ข) ชิ้นงาน 1, ค) ชิ้นงาน 2, ง) ชิ้นงาน 3, จ) ชิ้นงาน 4 และ ฉ) ชิ้นงาน 5

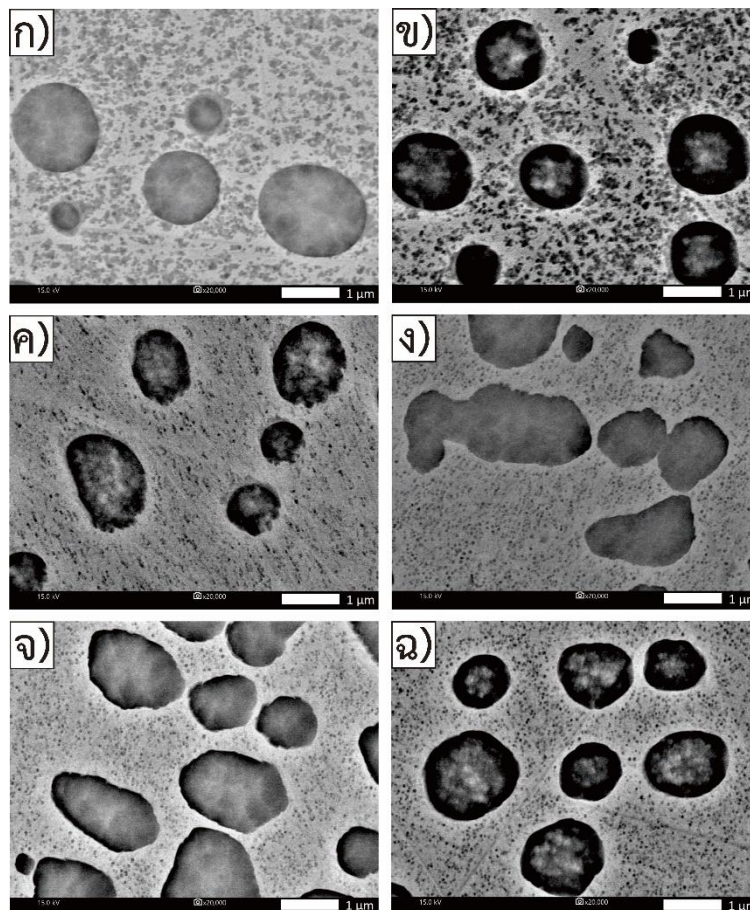
จากรูปที่ 4.21 เมื่อคำนวณสัดส่วนเชิงพื้นที่ของเฟส  $\gamma'$  ภายหลังจากจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง พบว่าสัดส่วนเชิงพื้นที่ของเฟส  $\gamma'$  ในชิ้นงานที่ 0 – 5 มีสัดส่วนเชิงพื้นที่ 0.19, 0.23, 0.26, 0.34, 0.36 และ 0.29 ตามลำดับ โดยสัดส่วนเชิงพื้นที่ของเฟส  $\gamma'$  สามารถแสดงเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงสัดส่วนเชิงพื้นที่โดยเฉลี่ยของเฟส  $\gamma'$  ภายหลังจากจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.22 พบว่าหลังจากจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 1000°C นาน 400 ชั่วโมง ชั่วโมง 0 มีสัดส่วนเชิงพื้นที่โดยเฉลี่ยของเฟส  $\gamma'$  น้อยที่สุดคือ 0.19 และ ชั่วโมง 4 สัดส่วนเชิงพื้นที่โดยเฉลี่ยของเฟส  $\gamma'$  มากที่สุดคือ 0.36 เมื่อพิจารณาชั่วโมง 0-4 พบว่าเมื่อชั่วโมงมีปริมาณธาตุผสมโคบอลต์มากขึ้น จะมีสัดส่วนเชิงพื้นที่โดยเฉลี่ยของเฟส  $\gamma'$  เพิ่มมากขึ้น ซึ่งผลที่ได้มีแนวโน้มสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้าซึ่งพบว่าในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้เหล็ก ที่มีส่วนผสมของโคบอลต์ ต่ำกว่า 19 % โดยอะตอม หลังผ่านการใช้งานที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน พบว่าอัตราส่วนเชิงพื้นที่ของเฟส  $\gamma'$  จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตาม % โดยอะตอม ของโคบอลต์ ที่เพิ่มขึ้นจนถึง 19 % โดยอะตอม แต่หากมีส่วนผสมของ โคบอลต์มากกว่า 19 % โดยอะตอม เมื่อเพิ่มปริมาณโคบอลต์ สัดส่วนเชิงพื้นที่โดยเฉลี่ยของเฟส  $\gamma'$  จะมีค่าลดลง [21] แต่อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้พบว่าชั่วโมง 5 ที่มีการเติมธาตุผสมโคบอลต์ มากที่สุด แต่พบว่าสัดส่วนเชิงพื้นที่โดยเฉลี่ยของเฟส  $\gamma'$  ไม่ได้มากที่สุด คาดว่าเนื่องจากผลของธาตุเหล็ก ที่มีปริมาณน้อยกว่าชั่วโมงอื่น ทำให้โครงสร้างพื้นผิวมีความเสถียรมากขึ้น [1, 3, 7, 14] และมีธาตุเหล็กที่จับตัวกับธาตุอะลูมิเนียมเพื่อฟอร์มอนุภาค  $\gamma'$  ในปริมาณที่น้อยลง

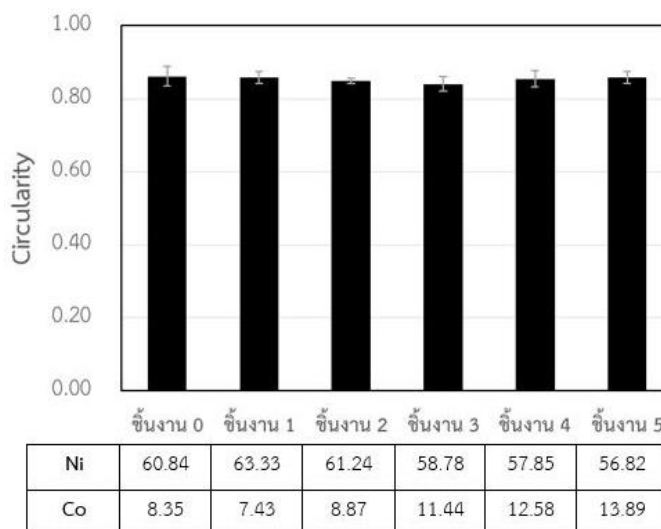
4.6.2 ผลการทดลองและ วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ภายหลังจากการใช้งานอุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง



รูปที่ 4.23 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 และโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 ที่เติมอะลูมิเนียม นิกเกิล และโคบอลต์ หลังการหลอมละลายแบบอาร์กสตูญอากาศ และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนมาตรฐาน จากนั้นจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง รูปจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 20000 เท่า ก) ชิ้นงาน 0, ข) ชิ้นงาน 1, ค) ชิ้นงาน 2, ง) ชิ้นงาน 3, จ) ชิ้นงาน 4 และ ฉ) ชิ้นงาน 5

ชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 และโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 ที่เติม อะลูมิเนียม นิกเกิล และโคบอลต์ (ชิ้นงาน 0 - 5) ภายหลังจากหลอมละลายแบบอาร์กสตูญอากาศ และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนมาตรฐาน (การทำละลายที่อุณหภูมิ 1175°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 845°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง) จากนั้นจำลองการใช้งานอุณหภูมิ

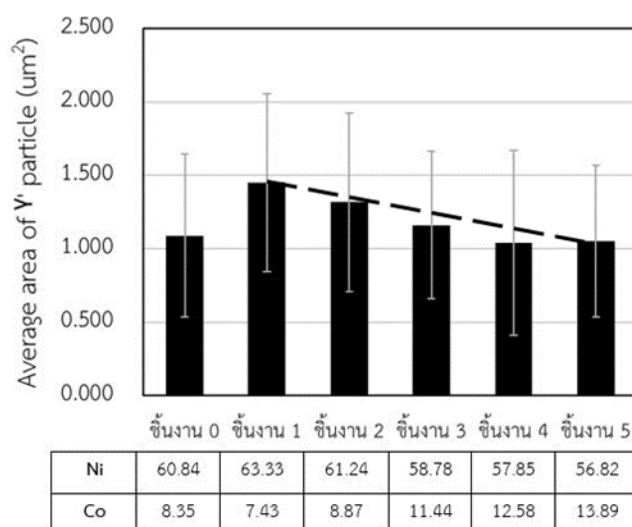
1000°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคที่ตรวจสอบได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 20000 เท่า แสดงดังรูปที่ 4.23 และหาค่าความกลม (circularity) โดยเฉลี่ยได้ดังรูป 4.24



**รูปที่ 4.24** กราฟแสดงค่าความกลมโดยเฉลี่ยของอนุภาค  $\gamma'$  ขนาดใหญ่ ภายหลังจากการใช้งานอุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง ในแต่ละชั้นงาน

จากรูปที่ 4.23 ผลที่ได้จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคหลังจากการใช้งานที่ 1000°C นาน 400 ชั่วโมง ด้วย SEM ที่กำลังขยาย 20000 เท่า พบว่าชั้นงานทั้งหมดมีอนุภาค  $\gamma'$  สองขนาด คือ อนุภาค  $\gamma'$  ที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งคาดว่าเป็นอนุภาค  $\gamma'$  ที่เกิดหลังกรรมวิธีทางความร้อนมาตรฐาน และโตต่อระหว่างการจำลองการใช้งาน และอนุภาค  $\gamma'$  ที่มีขนาดเล็ก ซึ่งคาดว่าเป็นอนุภาค  $\gamma'$  ที่เกิดการตกตะกอนขึ้นมาใหม่ระหว่างการจำลองการใช้งาน โดยลักษณะรูปร่าง (morphology) ของอนุภาค  $\gamma'$  ที่มีขนาดใหญ่ จะมีลักษณะกลมในทุกชั้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 4.23 และ 4.24 ดังนั้นการเติมธาตุผสมอะลูมิเนียม นิกเกิล และโคบอลต์ ในโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 จะไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อรูปร่างของอนุภาค  $\gamma'$  ที่มีขนาดใหญ่ หลังจากการใช้งานที่อุณหภูมิ 1000°C นาน 400 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.23 เมื่อดำเนินการพื้นที่โดยเฉลี่ยของอนุภาค  $\gamma'$  ขนาดใหญ่ ภายหลังจากการใช้งานอุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง พบว่าพื้นที่โดยเฉลี่ยของอนุภาค  $\gamma'$  ขนาดใหญ่ ในชั้นงานที่ 0 – 5 มีขนาด 1.090, 1.451, 1.318, 1.161, 1.041 และ 1.055  $\mu\text{m}^2$  ตามลำดับ โดยพื้นที่โดยเฉลี่ยของอนุภาค  $\gamma'$  ขนาดใหญ่ สามารถแสดงเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 4.25

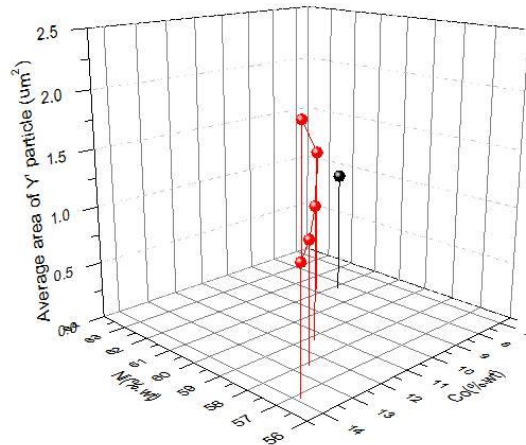


**รูปที่ 4.25** กราฟแสดงพื้นที่โดยเฉลี่ยของอนุภาค  $\gamma'$  ขนาดใหญ่ ภายหลังจากการใช้งานอุณหภูมิ  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 400 ชั่วโมง ในแต่ละชั้นงาน

จากรูปที่ 4.22 เมื่อพิจารณาเพียงขนาดหรือพื้นที่โดยเฉลี่ยของอนุภาค  $\gamma'$  ขนาดใหญ่ หลังการใช้งานที่ อุณหภูมิ  $1000^{\circ}\text{C}$  นาน 400 ชั่วโมง พบว่า ชั้นงาน 4 จะมีขนาดอนุภาค  $\gamma'$  เล็กที่สุดมีขนาด  $1.041 \text{ } \mu\text{m}^2$  และชั้นงาน 1 มีขนาดอนุภาค  $\gamma'$  ใหญ่ที่สุดมีขนาด  $1.451 \text{ } \mu\text{m}^2$  เมื่อพิจารณาแนวโน้มขนาด อนุภาค  $\gamma'$  ในชั้นงาน 1-5 พบว่าชั้นงานที่มีปริมาณอัตราส่วน Ni : Co มาก จะมีขนาดอนุภาค  $\gamma'$  ใหญ่กว่า ชั้นงานที่มีปริมาณ Ni : Co น้อย โดยขนาดของอนุภาค  $\gamma'$  ที่พบหลังการใช้งานที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 400 ชั่วโมง จะมีแนวโน้มคล้ายกับขนาดของอนุภาค  $\gamma'$  หลังการใช้งานที่  $900^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 400 ชั่วโมง คาดว่าเนื่องจากผลของธาตุผสมอะลูมิเนียมที่เติมในชั้นงาน 1-5 และผลร่วมกันของการลดธาตุผสมนิกเกิล และเพิ่มธาตุผสมโคบอลต์จากชั้นงาน 1-5 เหมือนกับกรณีการใช้งานที่  $900^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 400 ชั่วโมง

นอกจากนี้เมื่อพิจารณา กราฟสามมิติของการเปลี่ยนแปลงธาตุผสมนิกเกิล และโคบอลต์ ต่อขนาดอนุภาค  $\gamma'$  หลังการใช้งานอุณหภูมิ  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 400 ชั่วโมง ที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละชั้นงานดังรูปที่ 4.26 โดยจุดสีดำแทนกลุ่มชั้นงานที่ไม่มีการเติมธาตุผสมเพิ่ม (ชั้นงาน 0) และจุดสีแดงแทนกลุ่มชั้นงานที่มีการเติมธาตุผสมเพิ่ม (ชั้นงาน 1 - 5) จากรูปที่ 4.26 จะเห็นได้ว่าในกลุ่มชั้นงานที่มีการเติมธาตุผสม อัตราการลดลงของธาตุนิกเกิล จะไม่เท่ากับอัตราการเพิ่มของธาตุโคบอลต์ ดังสังเกตได้จากเส้นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงธาตุผสมนิกเกิล และโคบอลต์เป็นเส้นโค้ง ไม่ใช่เส้นตรง ดังนั้นจึงคาดว่าธาตุผสมโคบอลต์ มีผลต่อขนาดอนุภาค  $\gamma'$  หลังการใช้งาน

อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง มากกว่าธาตุผสมนิกเกิล ซึ่งสามารถอธิบายผลของธาตุโคบอลต์ ต่อขนาดอนุภาค  $\gamma'$  ที่มากกว่าผลของธาตุนิกเกิล ได้เช่นเดียวกับในกรณีขนาดอนุภาค  $\gamma'$  หลังบ่มแข็ง และหลังลองการใช้งานอุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง



**รูปที่ 4.26** กราฟสามมิติของการเปลี่ยนแปลงธาตุผสมนิกเกิล และโคบอลต์ ต่อขนาดอนุภาค  $\gamma'$  หลังจำลองการใช้งานอุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมงที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละชิ้นงาน

เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิต่อขนาดของอนุภาค  $\gamma'$  โดยจากงานวิจัยก่อนหน้าพบว่าขนาดของอนุภาค  $\gamma'$  หลังจำลองการทำงานจะขึ้นกับค่าอัตราการโต (coarsening rate) ของอนุภาค  $\gamma'$  ซึ่งค่าอัตราการโตจะขึ้นกับอุณหภูมิ [22] ดังสมการ 6

$$K = \frac{A \times D \times V_M \times C_e \times \sigma}{R \times T} \quad (6)$$

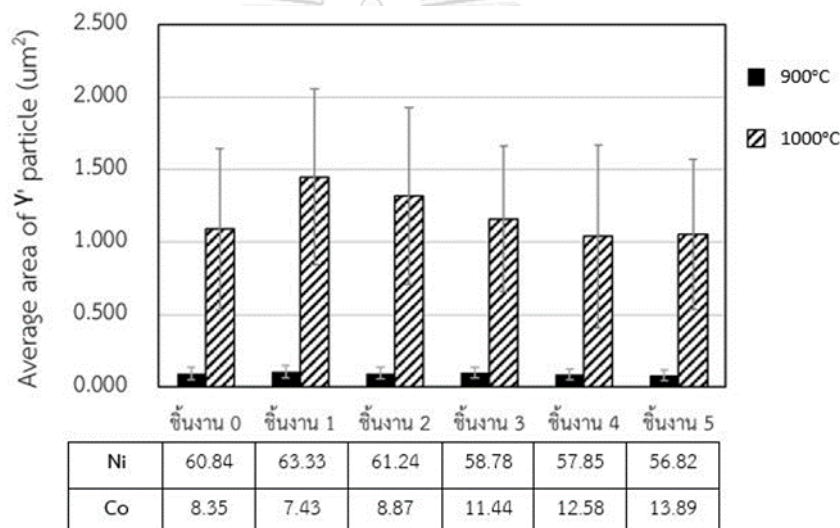
เมื่อ K คือ ค่าอัตราการโต (coarsening rate) ของอนุภาค  $\gamma'$ , A คือ ค่าคงที่มีค่าประมาณ 0.89 ตามโมเดล LSW,  $V_M$  คือ molar volume of precipitate =  $2.716 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ mol}^{-1}$ ,  $C_e$  คือ สัดส่วนโดยอะตอมของ Al ที่สมดุล,  $\sigma$  คือ precipitate/matrix interface energy =  $30 \times 10^{-3} \text{ J/m}^2$ , R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส =  $8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}^{-1}$ , T คือ อุณหภูมิหน่วยเคลวิน, D คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของ Al ในเนื้อพื้น โดยมีค่าตาม Arrhenius equation ดังสมการ 7

$$D = D_0 \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (7)$$



เมื่อ  $D$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของ Al ในเนื้อพื้น,  $D_0$  คือ ค่าคงที่การแพร่ของ Al,  $Q$  คือ Activation energy,  $R$  คือ ค่าคงที่ของแก๊ส =  $8.314 \text{ Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$ ,  $T$  คือ อุณหภูมิหน่วยเคลวิน

จากสมการที่ 6 และ 7 สามารถคำนวณหาค่าประมาณอัตราการโตของอนุภาค  $\gamma'$  ที่อุณหภูมิ  $900^\circ\text{C}$  ได้เท่ากับ  $1.65 \times 10^{-27} \text{ m}^3/\text{s}$  และอัตราการโตของอนุภาค  $\gamma'$  ที่อุณหภูมิ  $1000^\circ\text{C}$  ได้เท่ากับ  $12.3 \times 10^{-27} \text{ m}^3/\text{s}$  ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับรูปที่ 4.27 ที่พบอนุภาค  $\gamma'$  โตขึ้นอย่างเด่นชัดในการจำลองการใช้งานที่  $1000^\circ\text{C}$  นาน 400 ชั่วโมง มากกว่า การจำลองการใช้งานที่  $900^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 400 ชั่วโมง ดังนั้นจึงคาดว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะส่งผลให้อัตราการโตของอนุภาค  $\gamma'$  มีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ขนาดของอนุภาค  $\gamma'$  มีขนาดใหญ่ขึ้น



รูปที่ 4.27 กราฟเปรียบเทียบขนาดอนุภาค  $\gamma'$  ภายหลังจากการจำลองการใช้งานที่  $900^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 400 ชั่วโมง และภายหลังจากการจำลองการใช้งานที่  $1000^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 400 ชั่วโมง

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาการผลของการเพิ่มธาตุผสม อะลูมิเนียม นิกเกิล และโคบอลต์ ในโลหะผสมพิเศษเกรด Inconel 738 ต่อการเปลี่ยนแปลงของอนุภาค  $\gamma'$  ในชิ้นงานที่เตรียมจากการหลอมละลายแบบอาร์ค หลังจากนั้นทำการละลายด้วยอุณหภูมิ 1175°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยที่การเปลี่ยนแปลงของอนุภาค  $\gamma'$  หลังการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 845°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ความเสถียรของอนุภาค  $\gamma'$  ภายหลังจากจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 900°C และ 1000°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. ปริมาณธาตุผสมโคบอลต์ ที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อ รูปร่างของอนุภาค  $\gamma'$  หลังการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง โดยเมื่อปริมาณโคบอลต์ เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้มีแนวโน้มที่อนุภาค  $\gamma'$  มีลักษณะเป็นทรงกลมมากยิ่งขึ้น
2. ปริมาณธาตุผสมโคบอลต์ เพิ่มขึ้นน่าจะส่งผลให้ Solvus temperature ของอนุภาค  $\gamma'$  เพิ่มขึ้นตามทฤษฎี ดังนั้นอนุภาค  $\gamma'$  จึงมีเสถียรที่อุณหภูมิสูงมากขึ้นด้วย ทำให้อนุภาค  $\gamma'$  ถูกทำลายได้ยากขึ้น นอกจากนี้ธาตุผสมโคบอลต์ยังส่งผลในการลดอัตราการโต (coarsening rate) ของอนุภาค  $\gamma'$  หลังจำลองการใช้งานหลังการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 900°C และ 1000°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง
3. เมื่อโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด Inconel 738 มีปริมาณโคบอลต์ ในปริมาณที่ต่ำ จะมีแนวโน้มที่ อัตราส่วนเชิงพื้นที่ของเฟส  $\gamma'$  เพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามปริมาณโคบอลต์ ที่เพิ่ม ภายหลังจากจำลองการใช้งานที่ 1000°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง
4. ภายหลังกรรมวิธีความร้อนมาตรฐาน พบว่าการเพิ่มธาตุผสมนิกเกิลลงในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด Inconel 738 จะเป็นการเพิ่มความเสถียรของโครงสร้างพื้น  $\gamma'$  นอกจากนี้ นิกเกิล ยังเป็น forming elements หลักของอนุภาค  $\gamma'$

5. การเติมธาตุผสมอะลูมิเนียม 1 % โดยน้ำหนัก เป็นการเพิ่มปริมาณอะลูมิเนียม ที่เหมาะสม ในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลเกรด Inconel 738 เพื่อให้อนุภาค  $\gamma'$  มีสัดส่วนเชิงพื้นที่ เพิ่มขึ้นและยังมีลักษณะรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยม หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนมาตรฐาน
6. เมื่อปริมาณอะลูมิเนียม เพิ่มขึ้นจะส่งผลในการเพิ่มอัตราการโต (coarsening rate) ของอนุภาค  $\gamma'$  หลังจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 900°C และ 1000°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง
7. หลังการบ่มแข็ง ชิ้นงาน IN 738 ที่มีการเติมอะลูมิเนียม 1%โดยน้ำหนัก และ นิกเกิล 6 % โดยน้ำหนัก คาดว่าเป็นชิ้นงานที่น่าจะเหมาะสมที่สุดเนื่องจากมีขนาดอนุภาค  $\gamma'$  ที่เหมาะสม และสัดส่วนเชิงพื้นที่ของเฟส  $\gamma'$  ที่สูง นอกจากนี้รูปร่างอนุภาค  $\gamma'$  ยังคงมีลักษณะเป็น cubic
8. หลังจำลองการใช้งานที่ 900°C ชิ้นงาน IN 738 ที่มีการเติม อะลูมิเนียม 1%โดยน้ำหนัก ,นิกเกิล 4.5 %โดยน้ำหนัก และโคบอลต์ 1.5 %โดยน้ำหนัก คาดว่าเป็นชิ้นงานที่น่าจะเหมาะสมที่สุดในสภาวะการใช้งานนี้ เนื่องจากอนุภาค  $\gamma'$  ยังคงมีรูปร่างใกล้เคียง cubic มากที่สุด และมีอัตราการโตของอนุภาค  $\gamma'$  ต่ำ
9. หลังจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 1000°C ชิ้นงาน IN 738 ที่มีการเติม อะลูมิเนียม 1%โดย น้ำหนัก, นิกเกิล 1.5 %โดยน้ำหนัก และโคบอลต์ 4.5 %โดยน้ำหนัก คาดว่าเป็นชิ้นงานที่ น่าจะเหมาะสมที่สุดในสภาวะการใช้งานนี้ที่สุด เนื่องจากมีอัตราการโตของอนุภาค  $\gamma'$  ต่ำ ที่สุด

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาเพิ่มเติมผลของการเติมธาตุผสมอะลูมิเนียม นิกเกิล และโคบอลต์ ต่อขนาด และ สัดส่วนเชิงพื้นที่ของเฟส  $\gamma'$  ที่ระยะเวลาการจำลองการใช้งานที่ต่างกันออกไป เช่น ที่ 50, 100, 150, 200, 250, 300 และ 350 ชั่วโมง
2. ควรศึกษาเพิ่มเติมผลของธาตุผสมอะลูมิเนียม นิกเกิล และโคบอลต์ ต่อสมบัติเชิงกลที่ เปลี่ยนแปลงไป เช่นการเปลี่ยนแปลงของความแข็ง, เปลี่ยนแปลงของความต้านทานความล้า และความคืบ ที่อุณหภูมิสูง เป็นต้นต่อไป

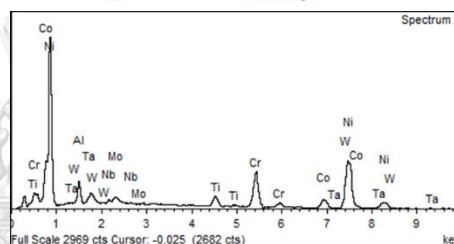
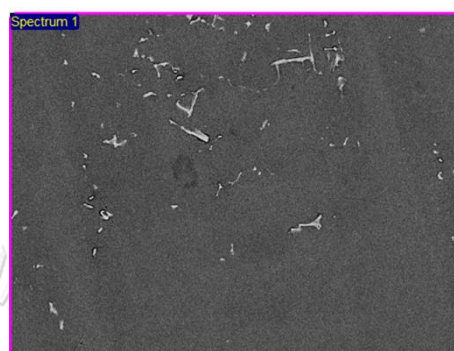
3. ควรศึกษาเพิ่มเติมผลของกระบวนการ Reheat Treatment ชิ้นงานหลังผ่านการจำลองการใช้งานทั้งที่อุณหภูมิ 900°C และ 1000°C ภายหลังจากจำลองการใช้งานมาแล้ว 400 ชั่วโมง



ภาคผนวก ก ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานในแต่ละบริเวณ ที่ตรวจสอบด้วย EDS

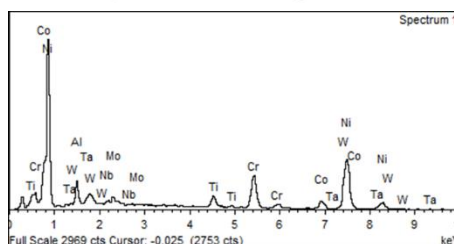
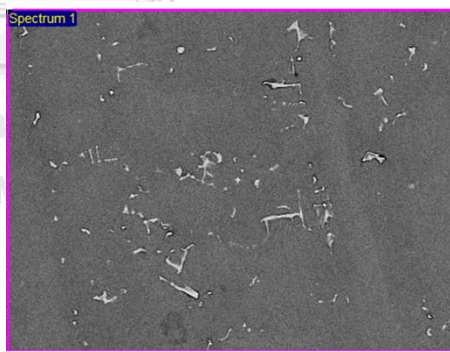
ก1: ชิ้นงาน 0 (หลังหลอม)

Element	Weight%	Atomic%
Al K	3.30	7.03
Ti K	3.41	4.09
Cr K	16.36	18.10
Co K	8.04	7.85
Ni K	60.65	59.40
Nb L	1.30	0.80
Mo L	1.93	1.16
Ta M	2.31	0.73
W M	2.70	0.84
Totals	100.00	



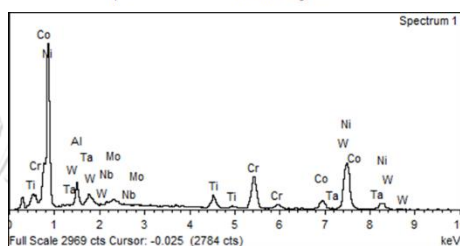
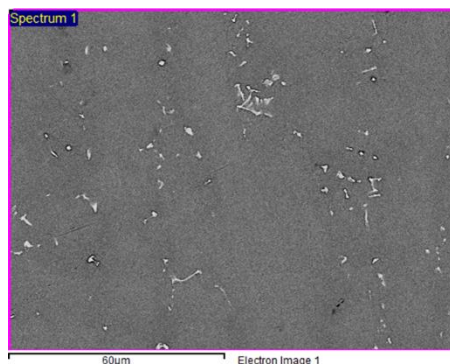
รูปที่ ก1 ส่วนผสม ทางเคมีชิ้นงาน 0 หลังการหลอม (บริเวณที่ 1)

Element	Weight%	Atomic%
Al K	3.38	7.23
Ti K	3.60	4.33
Cr K	15.34	17.01
Co K	7.05	6.89
Ni K	61.62	60.51
Nb L	1.39	0.86
Mo L	2.65	1.59
Ta M	1.88	0.60
W M	3.08	0.97
Totals	100.00	



รูปที่ ก2 ส่วนผสม ทางเคมีชิ้นงาน 0 หลังการหลอม (บริเวณที่ 2)

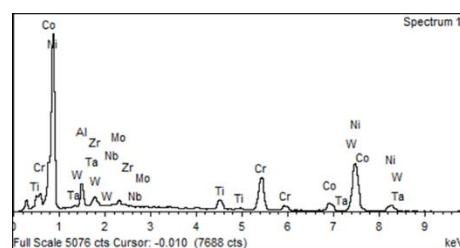
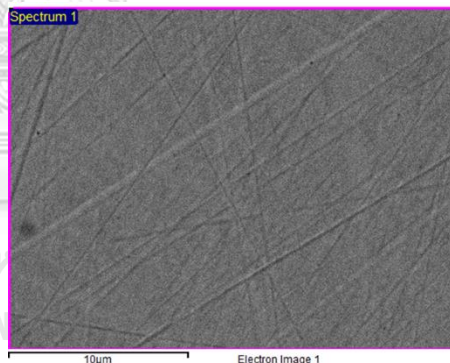
Element	Weight%	Atomic%
Al K	3.47	7.37
Ti K	3.73	4.46
Cr K	15.78	17.38
Co K	7.93	7.71
Ni K	61.69	60.17
Nb L	0.70	0.43
Mo L	1.33	0.79
Ta M	2.20	0.70
W M	3.17	0.99
Totals	100.00	



รูปที่ ก3 ส่วนผสม ทางเคมีชิ้นงาน 0 หลังการหลอม (บริเวณที่ 3)

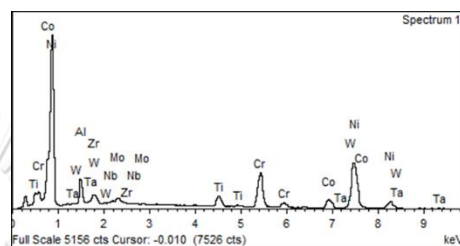
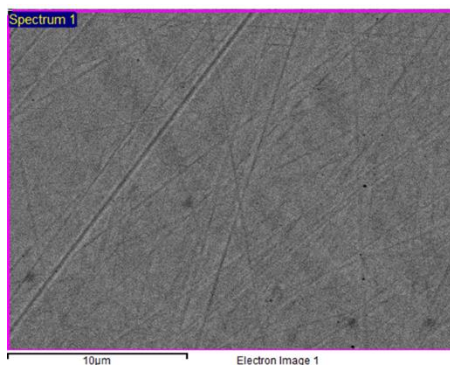
#### ก2: ชิ้นงาน 0

Element	Weight%	Atomic%
Al K	3.53	7.52
Ti K	3.13	3.76
Cr K	15.80	17.47
Co K	7.96	7.77
Ni K	60.98	59.71
Zr L	0.26	0.17
Nb L	0.98	0.61
Mo L	2.41	1.44
Ta M	1.73	0.55
W M	3.21	1.00
Totals	100.00	



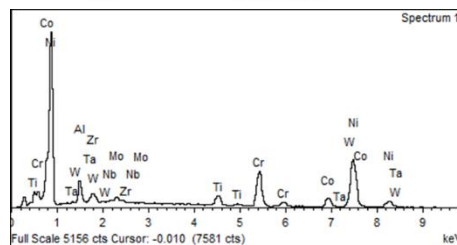
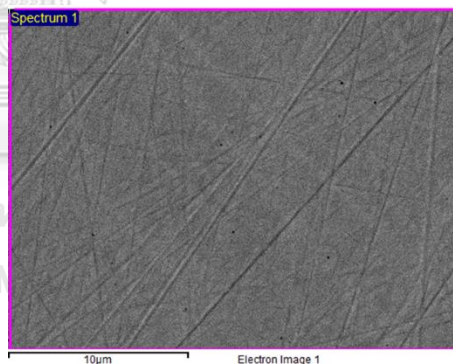
รูปที่ ก4 ส่วนผสม ทางเคมีชิ้นงาน 0 (บริเวณที่ 1)

Element	Weight%	Atomic%
Al K	3.85	8.12
Ti K	3.32	3.94
Cr K	16.38	17.92
Co K	8.47	8.17
Ni K	60.73	58.82
Zr L	0.06	0.04
Nb L	0.78	0.48
Mo L	1.84	1.09
Ta M	1.09	0.34
W M	3.47	1.07
Totals	100.00	



รูปที่ ก5 ส่วนผสม ทางเคมีชิ้นงาน 0 (บริเวณที่ 2)

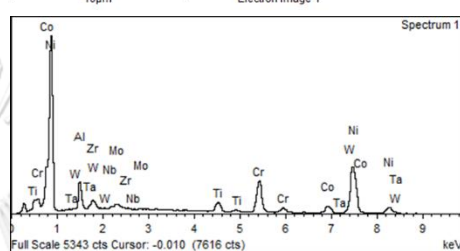
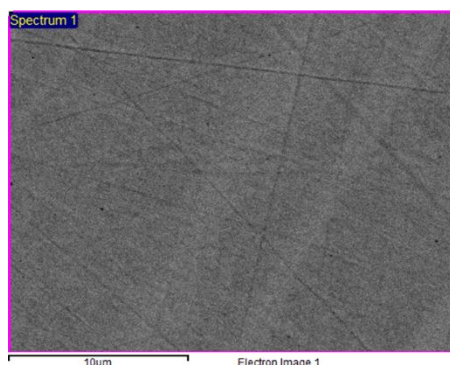
Element	Weight%	Atomic%
Al K	3.36	7.15
Ti K	3.14	3.76
Cr K	16.45	18.14
Co K	8.63	8.40
Ni K	60.82	59.41
Zr L	0.06	0.03
Nb L	0.66	0.41
Mo L	1.91	1.14
Ta M	1.65	0.52
W M	3.32	1.04
Totals	100.00	



รูปที่ ก6 ส่วนผสม ทางเคมีชิ้นงาน 0 (บริเวณที่ 3)

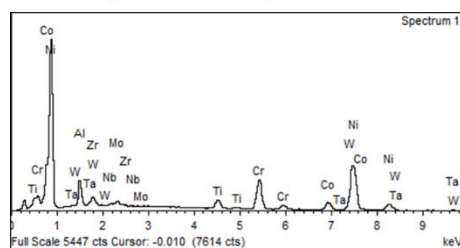
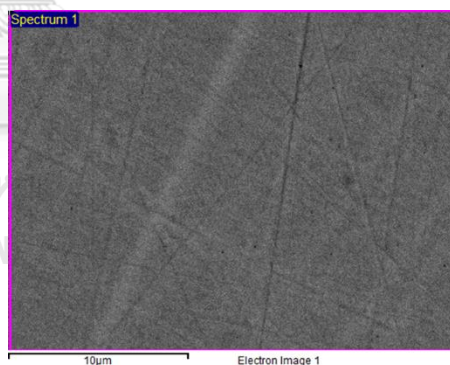
## ก3: ชิ้นงาน 1

Element	Weight%	Atomic%
Al K	4.30	9.05
Ti K	3.10	3.67
Cr K	15.28	16.67
Co K	7.05	6.79
Ni K	63.06	60.93
Zr L	0.09	0.05
Nb L	0.83	0.50
Mo L	1.35	0.80
Ta M	1.66	0.52
W M	3.29	1.02
Totals	100.00	



รูปที่ ก7 ส่วนผสม ทางเคมีชิ้นงาน 1 (บริเวณที่ 1)

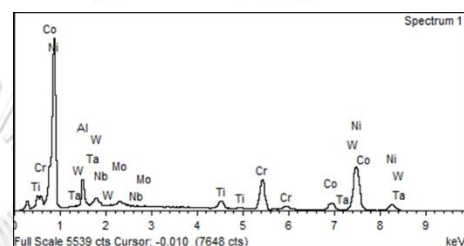
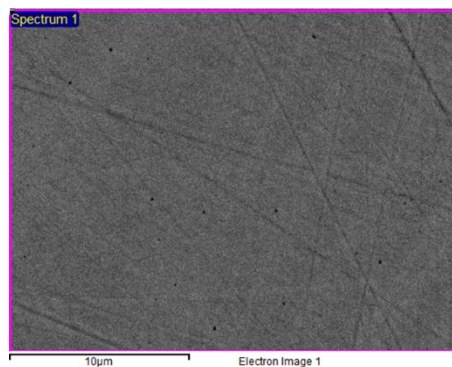
Element	Weight%	Atomic%
Al K	4.13	8.71
Ti K	2.81	3.34
Cr K	14.99	16.42
Co K	7.48	7.23
Ni K	63.09	61.23
Zr L	0.01	0.01
Nb L	0.88	0.54
Mo L	1.62	0.96
Ta M	1.63	0.51
W M	3.36	1.04
Totals	100.00	



รูปที่ ก8 ส่วนผสม ทางเคมีชิ้นงาน 1 (บริเวณที่ 2)



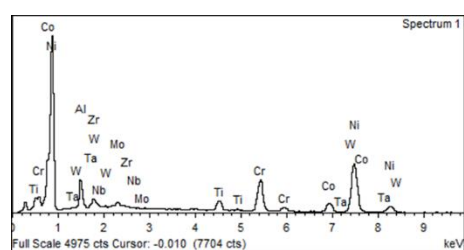
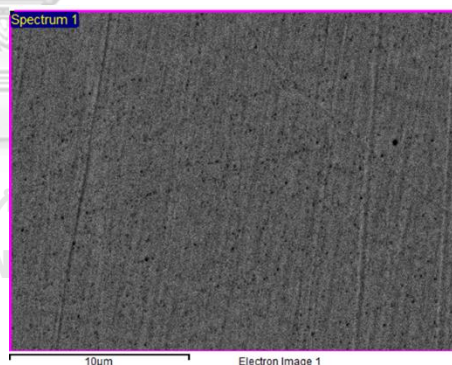
Element	Weight%	Atomic%
Al K	4.36	9.11
Ti K	2.59	3.04
Cr K	15.42	16.71
Co K	7.75	7.41
Ni K	63.83	61.28
Nb L	0.27	0.16
Mo L	1.77	1.04
Ta M	1.06	0.33
W M	2.95	0.91
Totals	100.00	



รูปที่ ก9 ส่วนผสม ทางเคมีชิ้นงาน 1 (บริเวณที่ 3)

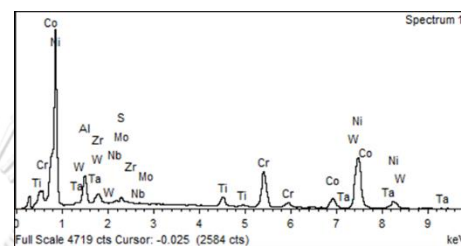
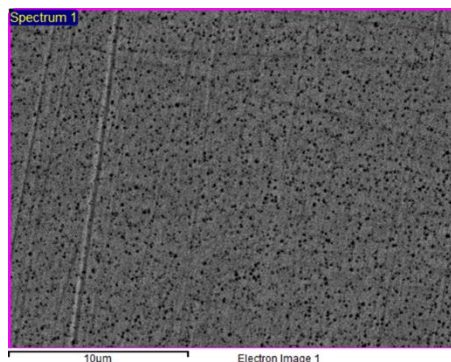
#### ก4: ชิ้นงาน 2

Element	Weight%	Atomic%
Al K	4.08	8.62
Ti K	3.06	3.64
Cr K	14.82	16.24
Co K	9.09	8.79
Ni K	61.18	59.36
Zr L	0.58	0.36
Nb L	0.81	0.50
Mo L	1.79	1.06
Ta M	1.57	0.49
W M	3.02	0.94
Totals	100.00	



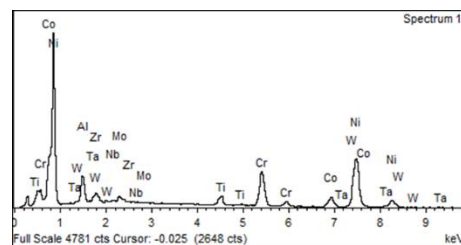
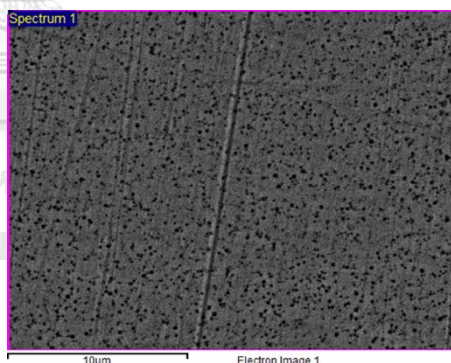
รูปที่ ก10 ส่วนผสม ทางเคมีชิ้นงาน 2 (บริเวณที่ 1)

Element	Weight%	Atomic%
Al K	3.93	8.26
S K	0.39	0.68
Ti K	2.79	3.30
Cr K	15.39	16.79
Co K	8.78	8.45
Ni K	61.88	59.77
Zr L	0.03	0.02
Nb L	1.02	0.62
Mo L	1.10	0.65
Ta M	1.29	0.41
W M	3.41	1.05
Totals	100.00	



รูปที่ ก11 ส่วนผสม ทางเคมีชิ้นงาน 2 (บริเวณที่ 2)

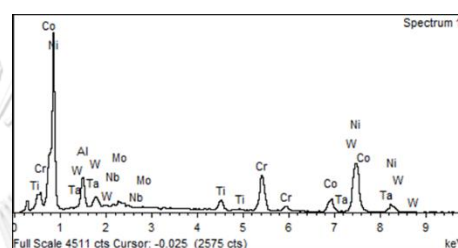
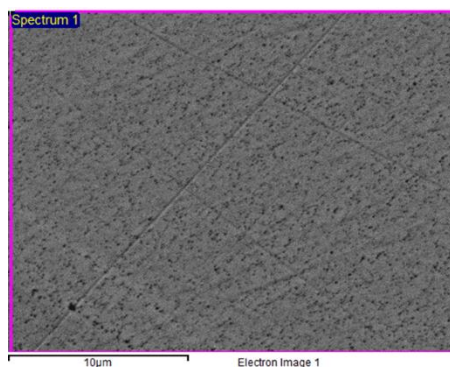
Element	Weight%	Atomic%
Al K	3.94	8.31
Ti K	2.80	3.32
Cr K	15.93	17.44
Co K	8.75	8.46
Ni K	60.66	58.85
Zr L	0.51	0.32
Nb L	1.21	0.74
Mo L	2.21	1.31
Ta M	1.10	0.34
W M	2.91	0.90
Totals	100.00	



รูปที่ ก12 ส่วนผสม ทางเคมีชิ้นงาน 2 (บริเวณที่ 3)

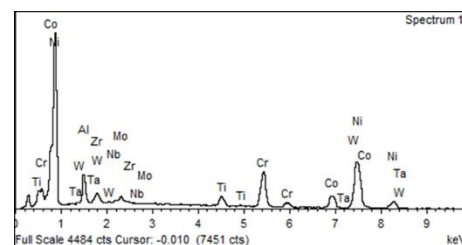
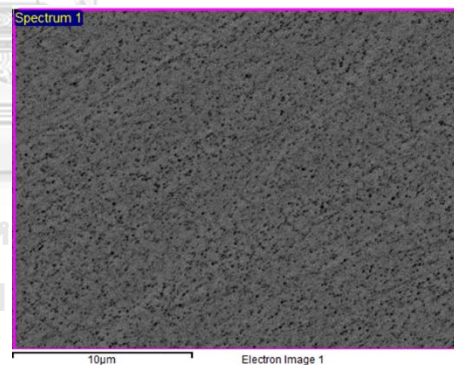
## ก5: ชิ้นงาน 3

Element	Weight%	Atomic%
Al K	4.12	8.67
Ti K	3.04	3.61
Cr K	15.34	16.76
Co K	11.33	10.92
Ni K	59.05	57.13
Nb L	0.74	0.45
Mo L	1.67	0.99
Ta M	1.23	0.39
W M	3.48	1.07
Totals	100.00	



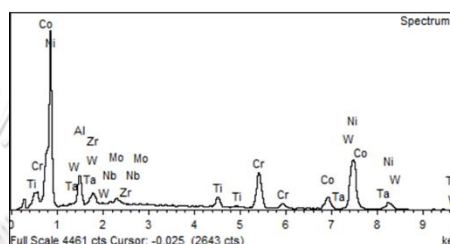
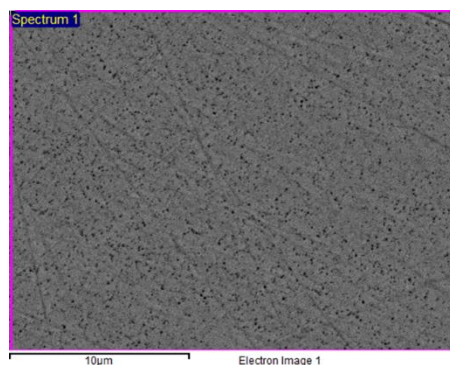
รูปที่ ก13 ส่วนผสม ทางเคมีชิ้นงาน 3 (บริเวณที่ 1)

Element	Weight%	Atomic%
Al K	4.10	8.65
Ti K	2.70	3.21
Cr K	15.77	17.25
Co K	11.95	11.53
Ni K	58.13	56.33
Zr L	0.21	0.13
Nb L	0.43	0.27
Mo L	1.93	1.15
Ta M	1.23	0.39
W M	3.54	1.10
Totals	100.00	



รูปที่ ก14 ส่วนผสม ทางเคมีชิ้นงาน 3 (บริเวณที่ 2)

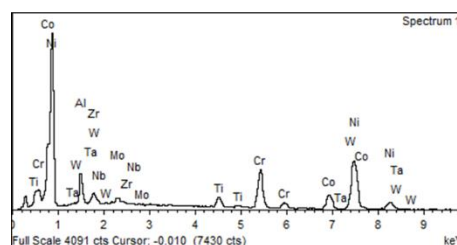
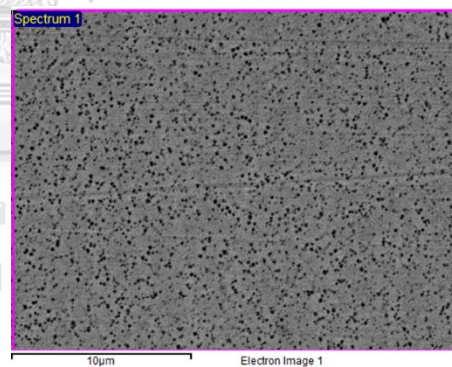
Element	Weight%	Atomic%
Al K	4.04	8.55
Ti K	2.76	3.29
Cr K	15.15	16.62
Co K	11.04	10.68
Ni K	59.15	57.48
Zr L	0.17	0.11
Nb L	1.12	0.69
Mo L	1.93	1.15
Ta M	1.04	0.33
W M	3.60	1.12
Totals	100.00	



รูปที่ ก15 ส่วนผสม ทางเคมีชิ้นงาน 3 (บริเวณที่ 3)

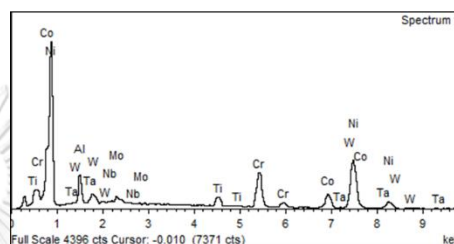
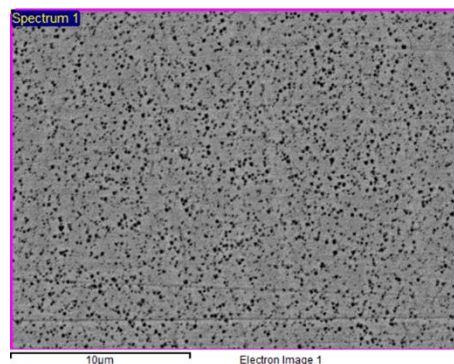
#### ก6: ชิ้นงาน 4

Element	Weight%	Atomic%
Al K	4.07	8.59
Ti K	2.71	3.23
Cr K	15.70	17.20
Co K	12.99	12.56
Ni K	56.81	55.13
Zr L	0.19	0.12
Nb L	0.66	0.41
Mo L	2.20	1.31
Ta M	1.63	0.51
W M	3.03	0.94
Totals	100.00	



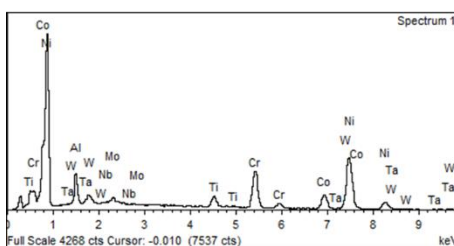
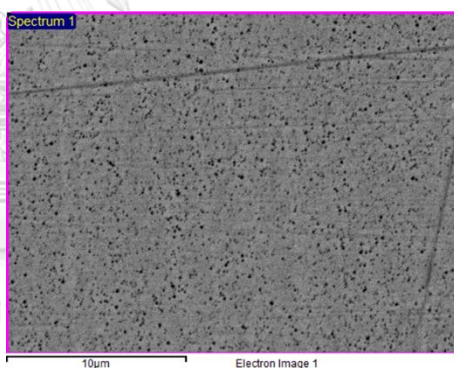
รูปที่ ก16 ส่วนผสม ทางเคมีชิ้นงาน 4 (บริเวณที่ 1)

Element	Weight%	Atomic%
Al K	4.09	8.61
Ti K	2.81	3.33
Cr K	15.80	17.26
Co K	12.44	11.99
Ni K	57.79	55.91
Nb L	0.50	0.31
Mo L	1.98	1.17
Ta M	1.29	0.41
W M	3.30	1.02
Totals	100.00	



รูปที่ ก17 ส่วนผสม ทางเคมีชิ้นงาน 4 (บริเวณที่ 2)

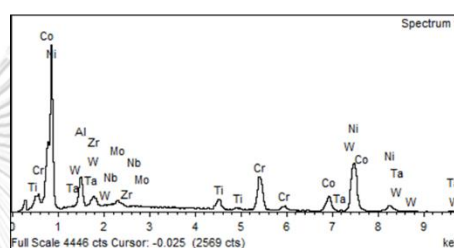
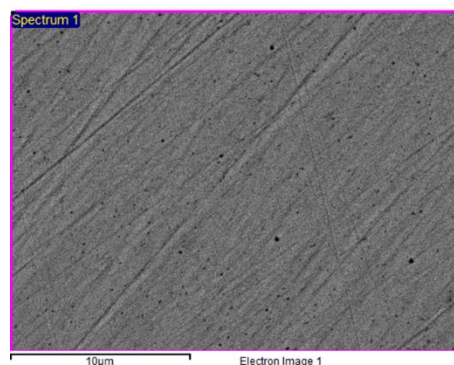
Element	Weight%	Atomic%
Al K	3.94	8.26
Ti K	2.86	3.38
Cr K	15.73	17.12
Co K	12.30	11.82
Ni K	58.94	56.83
Nb L	0.45	0.27
Mo L	1.87	1.10
Ta M	1.13	0.35
W M	2.79	0.86
Totals	100.00	



รูปที่ ก18 ส่วนผสม ทางเคมีชิ้นงาน 4 (บริเวณที่ 3)

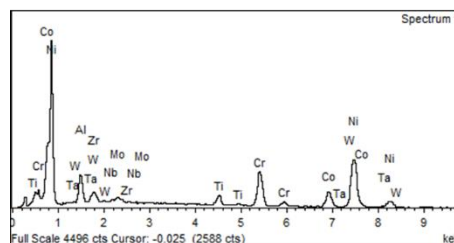
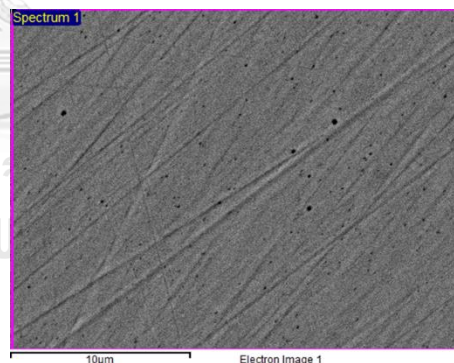
## ก7: ชิ้นงาน 5

Element	Weight%	Atomic%
Al K	3.99	8.40
Ti K	2.93	3.48
Cr K	15.02	16.44
Co K	13.50	13.03
Ni K	57.42	55.63
Zr L	0.33	0.21
Nb L	0.67	0.41
Mo L	1.74	1.03
Ta M	1.29	0.40
W M	3.11	0.96
Totals	100.00	



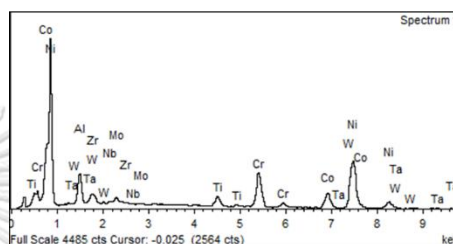
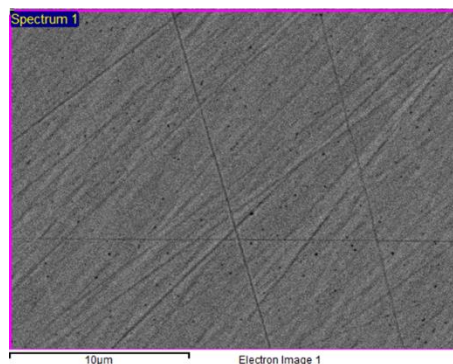
รูปที่ ก19 ส่วนผสม ทางเคมีชิ้นงาน 5 (บริเวณที่ 1)

Element	Weight%	Atomic%
Al K	3.79	8.02
Ti K	2.94	3.50
Cr K	15.18	16.66
Co K	14.16	13.71
Ni K	56.93	55.35
Zr L	0.16	0.10
Nb L	0.55	0.34
Mo L	1.26	0.75
Ta M	1.67	0.53
W M	3.35	1.04
Totals	100.00	



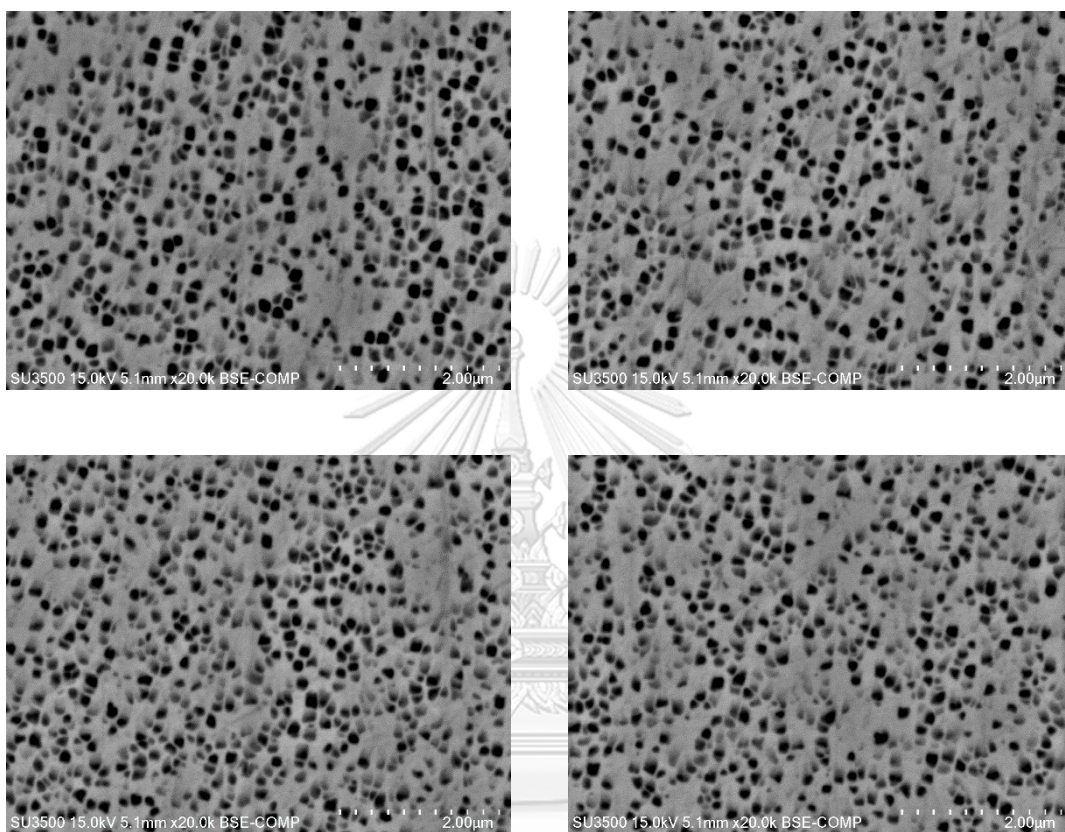
รูปที่ ก20 ส่วนผสม ทางเคมีชิ้นงาน 5 (บริเวณที่ 2)

Element	Weight%	Atomic%
Al K	4.15	8.76
Ti K	2.72	3.24
Cr K	14.96	16.41
Co K	14.01	13.56
Ni K	56.12	54.53
Zr L	0.32	0.20
Nb L	0.99	0.61
Mo L	2.06	1.23
Ta M	1.42	0.45
W M	3.24	1.01
Totals	100.00	



รูปที่ ก21 ส่วนผสม ทางเคมีชิ้นงาน 5 (บริเวณที่ 3)

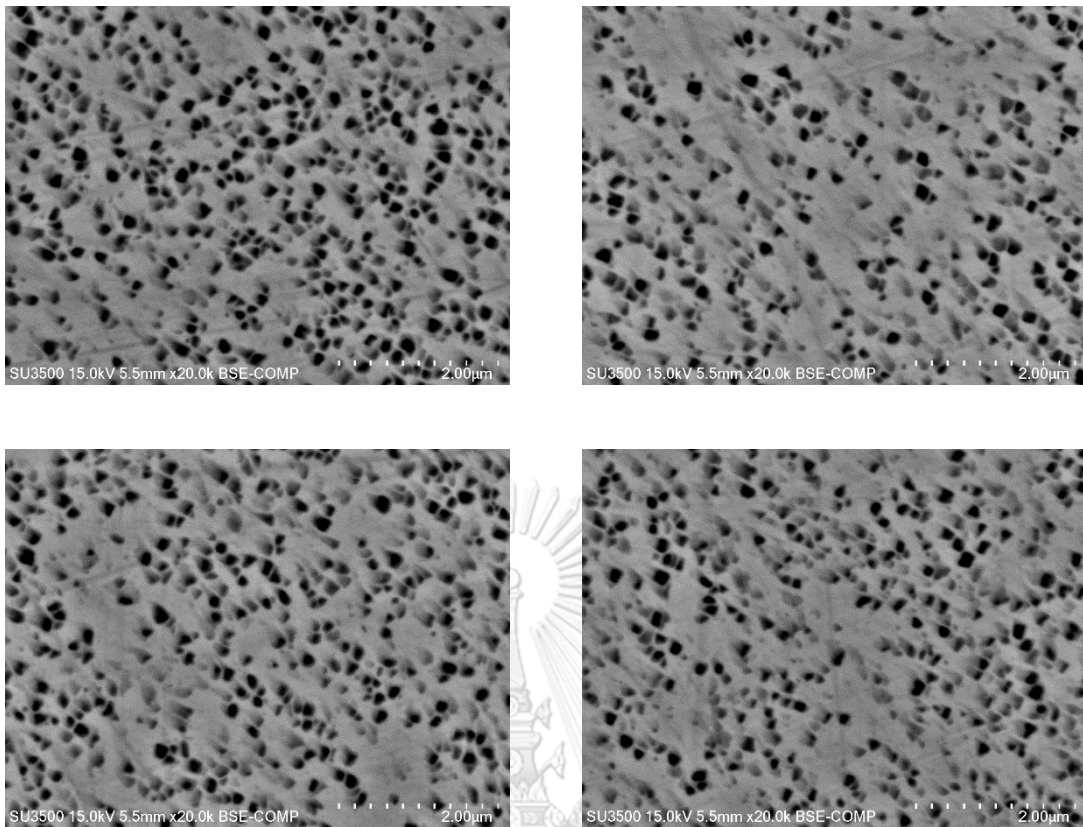
ภาคผนวก ข โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหลังการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง



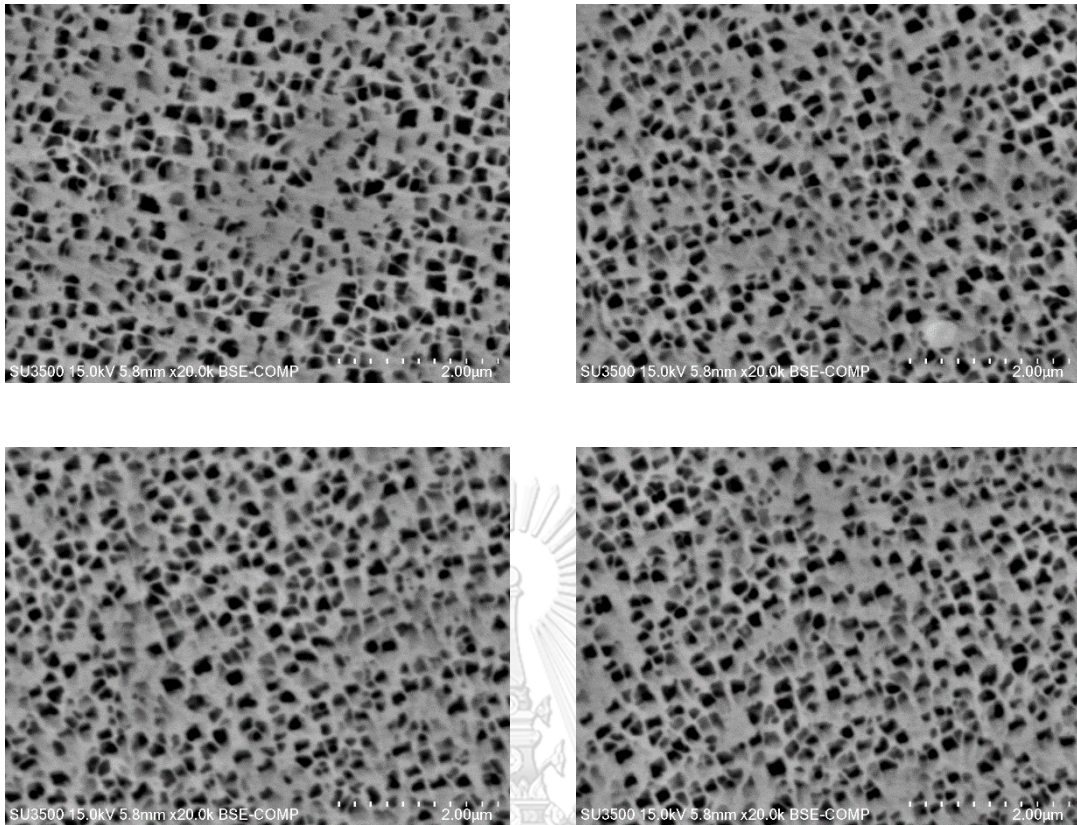
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ข1 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงาน 0 กำลังขยาย 20000 เท่า จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ  
ส่องกราด Hitachi รุ่น SU3500

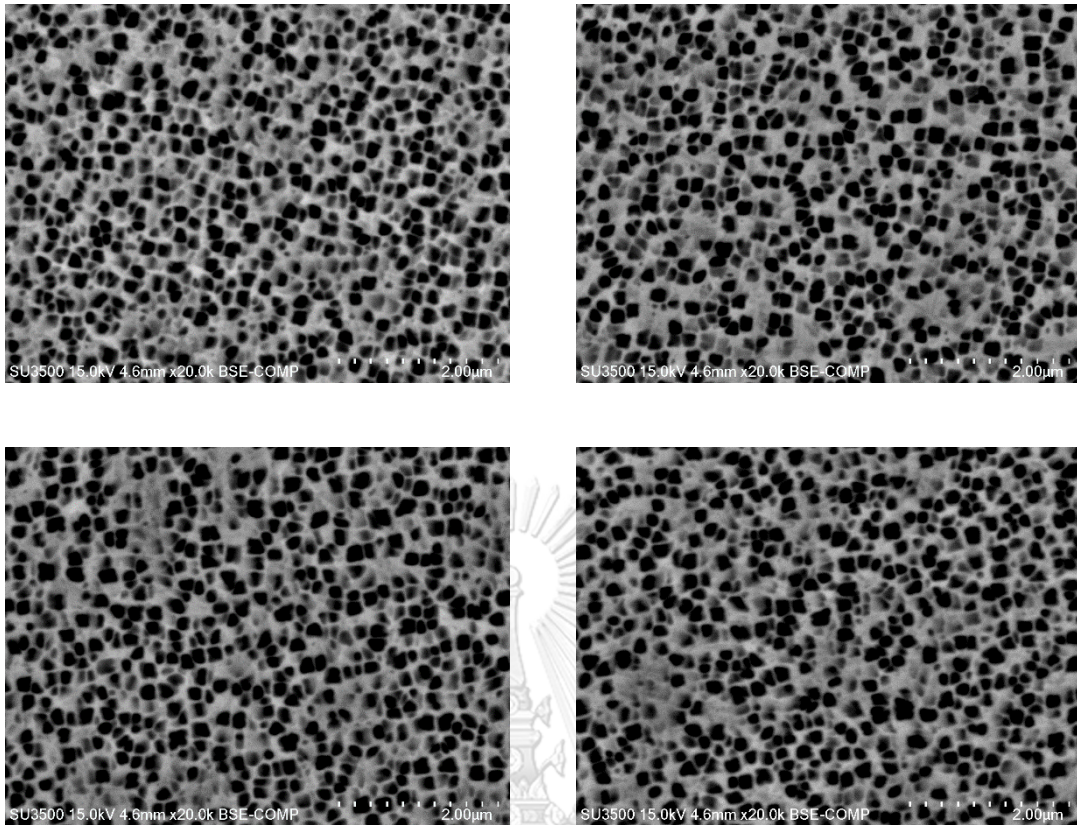




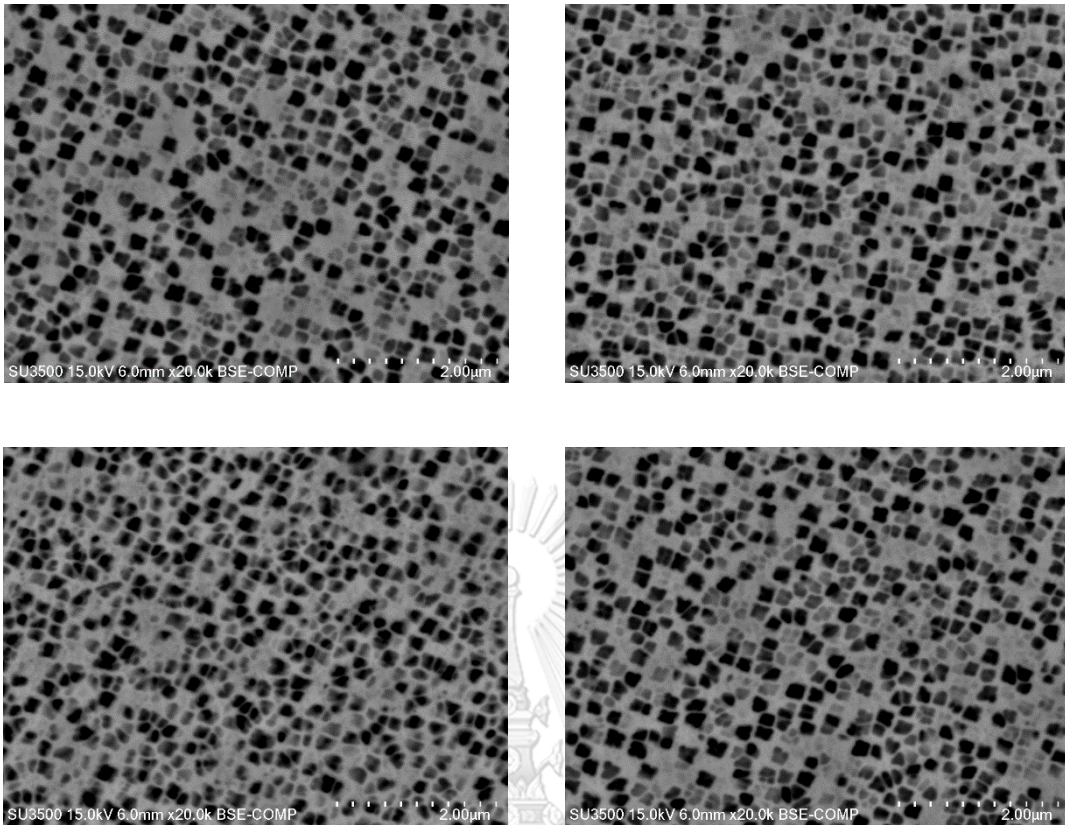
รูปที่ ข2 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงาน 1 กำลังขยาย 20000 เท่า จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ  
ส่องกราด Hitachi รุ่น SU3500



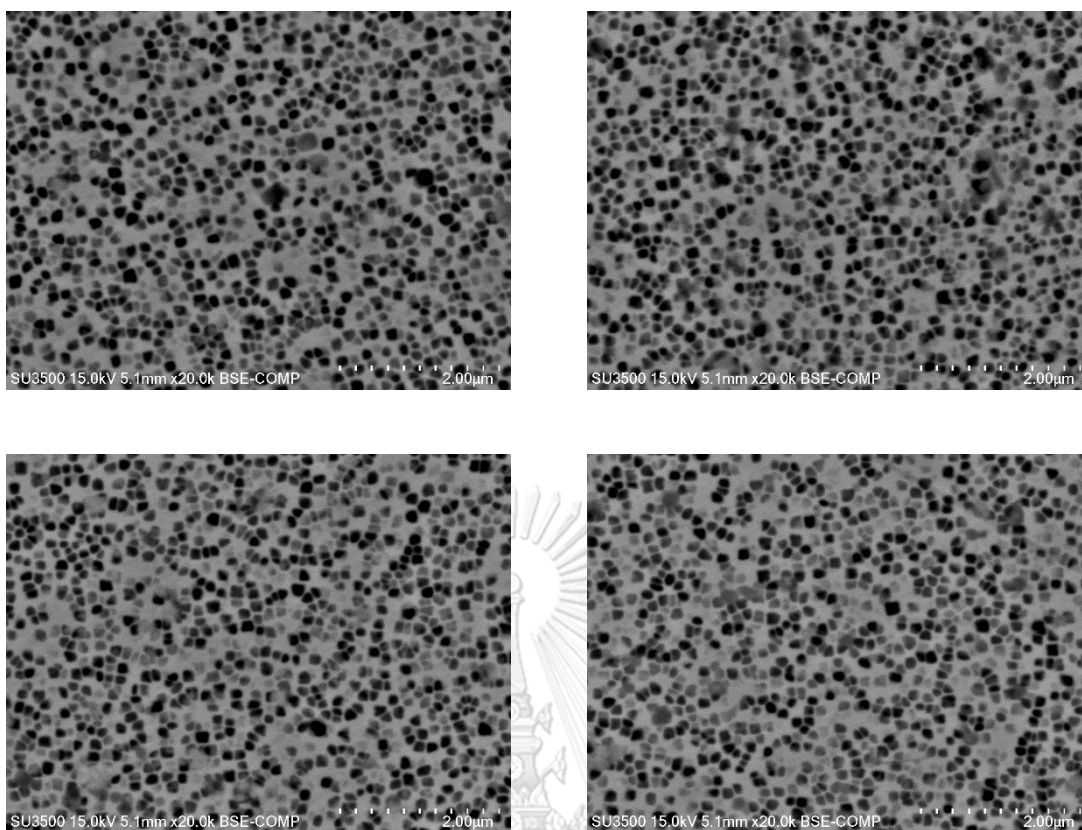
รูปที่ ข3 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงาน 2 กำลังขยาย 20000 เท่า จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ  
ส่องกราด Hitachi รุ่น SU3500



รูปที่ ข4 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงาน 3 กำลังขยาย 20000 เท่า จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ  
ส่องกราด Hitachi รุ่น SU3500

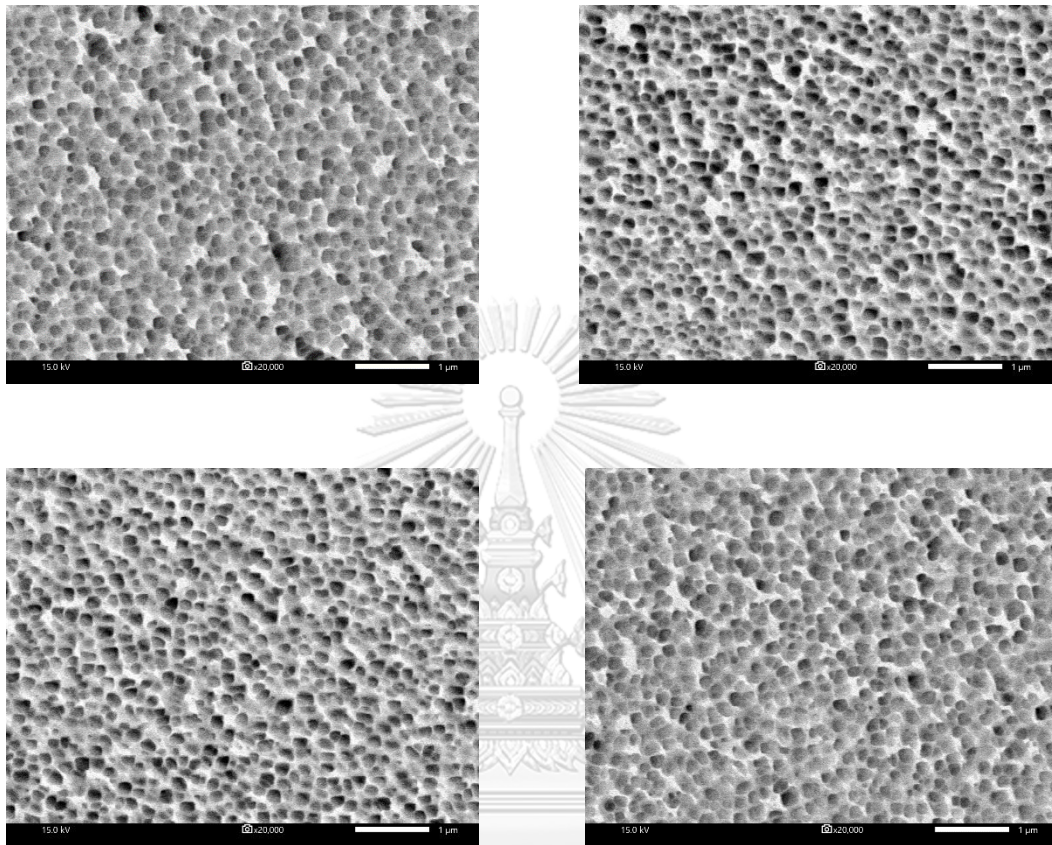


รูปที่ ข5 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงาน 4 กำลังขยาย 20000 เท่า จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ  
ส่องกราด Hitachi รุ่น SU3500

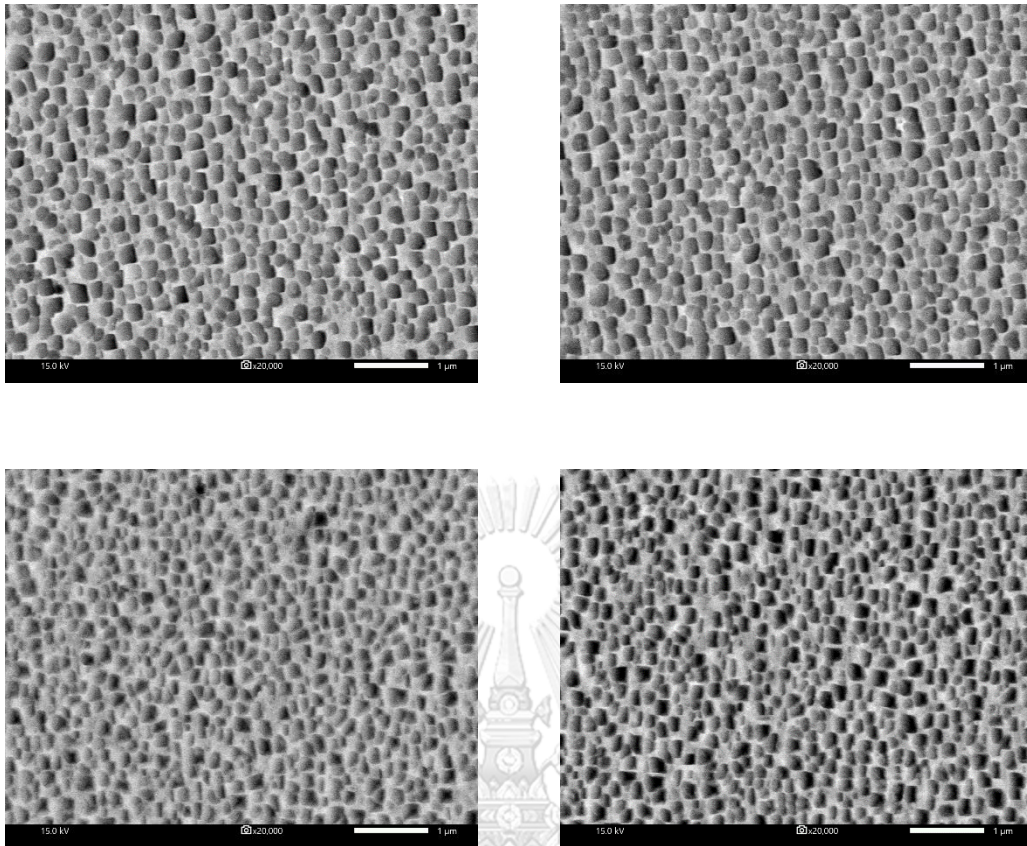


รูปที่ ข6 โครงสร้างจุลภาคชั้นงาน 5 กำลังขยาย 20000 เท่า จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ  
ส่องกราด Hitachi รุ่น SU3500

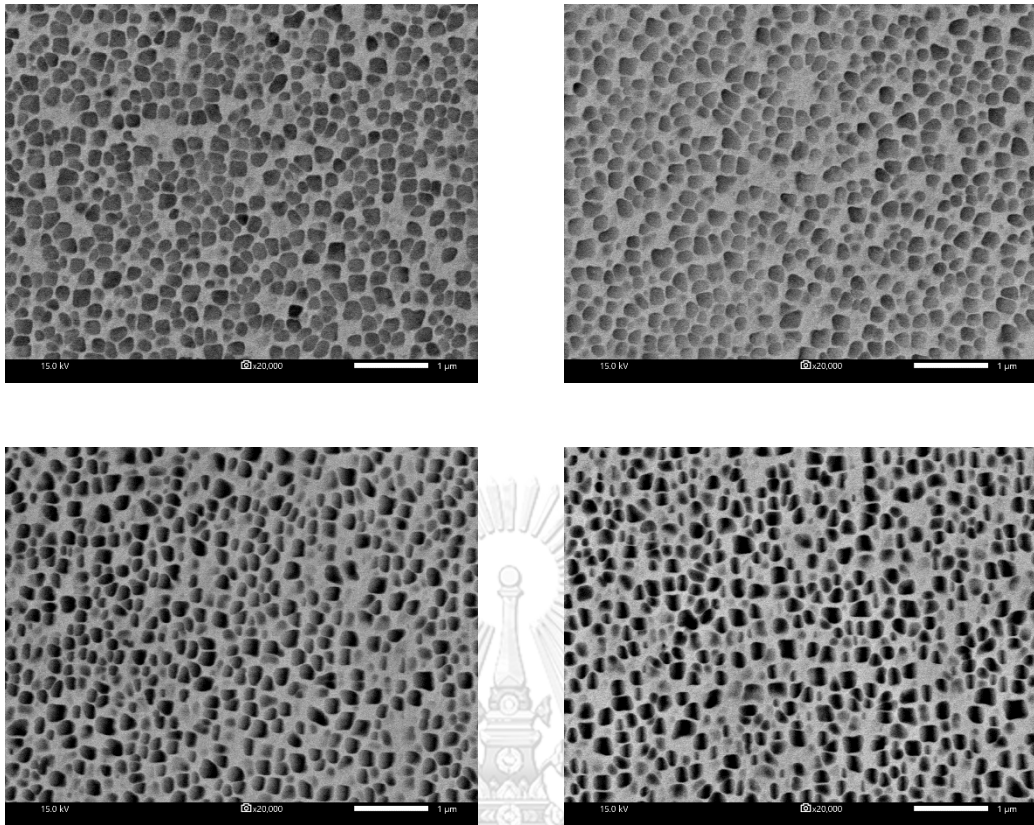
ภาคผนวก ค โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหลังการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 845°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ ค1 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงาน 0 กำลังขยาย 20000 เท่า จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ  
ส่องกราด JEOL รุ่น JSM IT-500HR

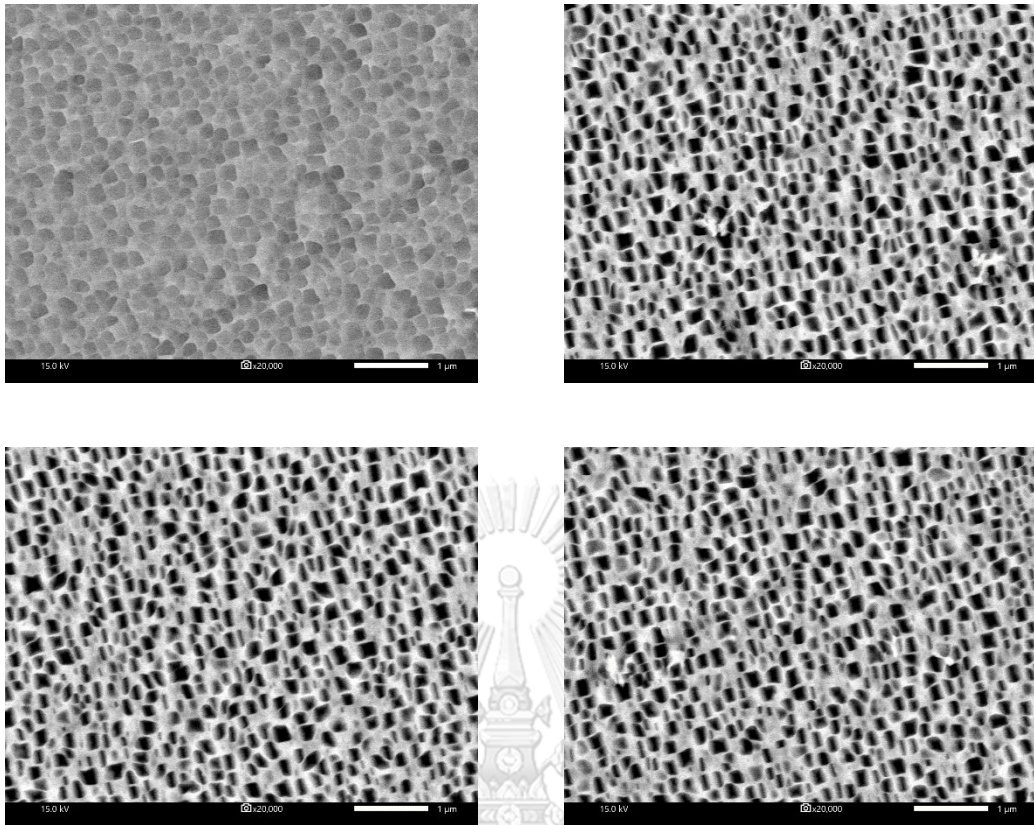


รูปที่ ค2 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงาน 1 กำลังขยาย 20000 เท่า จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ  
ส่องกราด JEOL รุ่น JSM IT-500HR

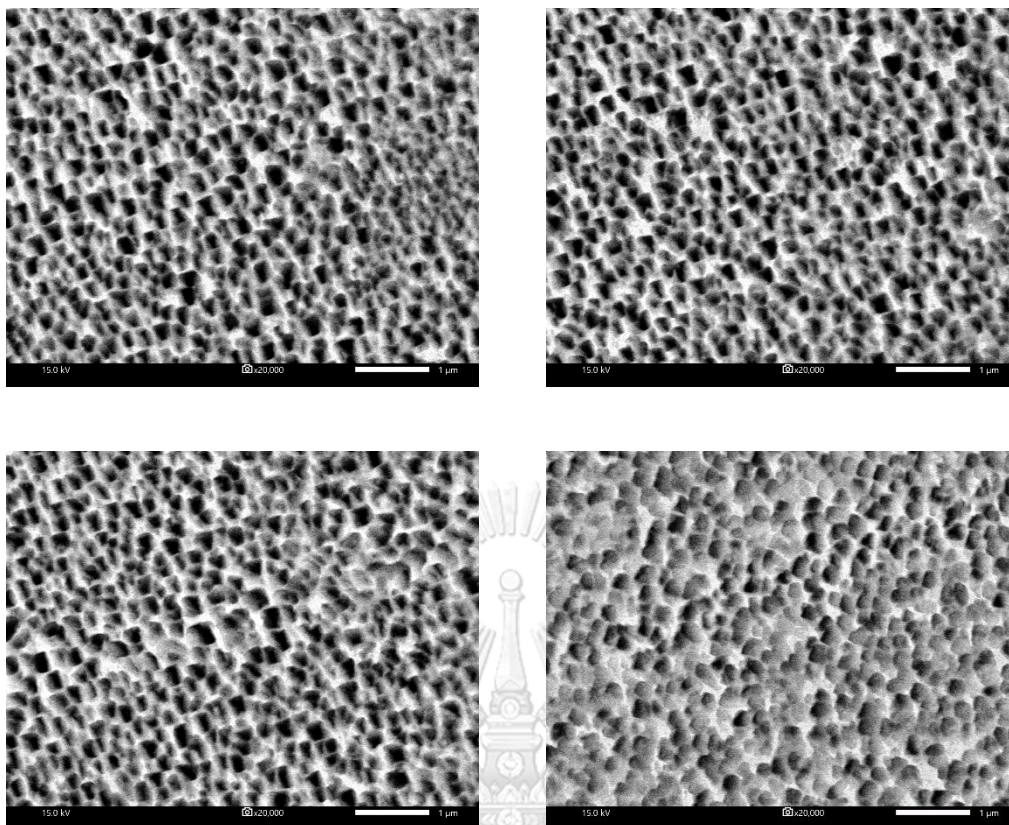


รูปที่ ค3 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงาน 2 กำลังขยาย 20000 เท่า จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ  
ส่องกราด JEOL รุ่น JSM IT-500HR

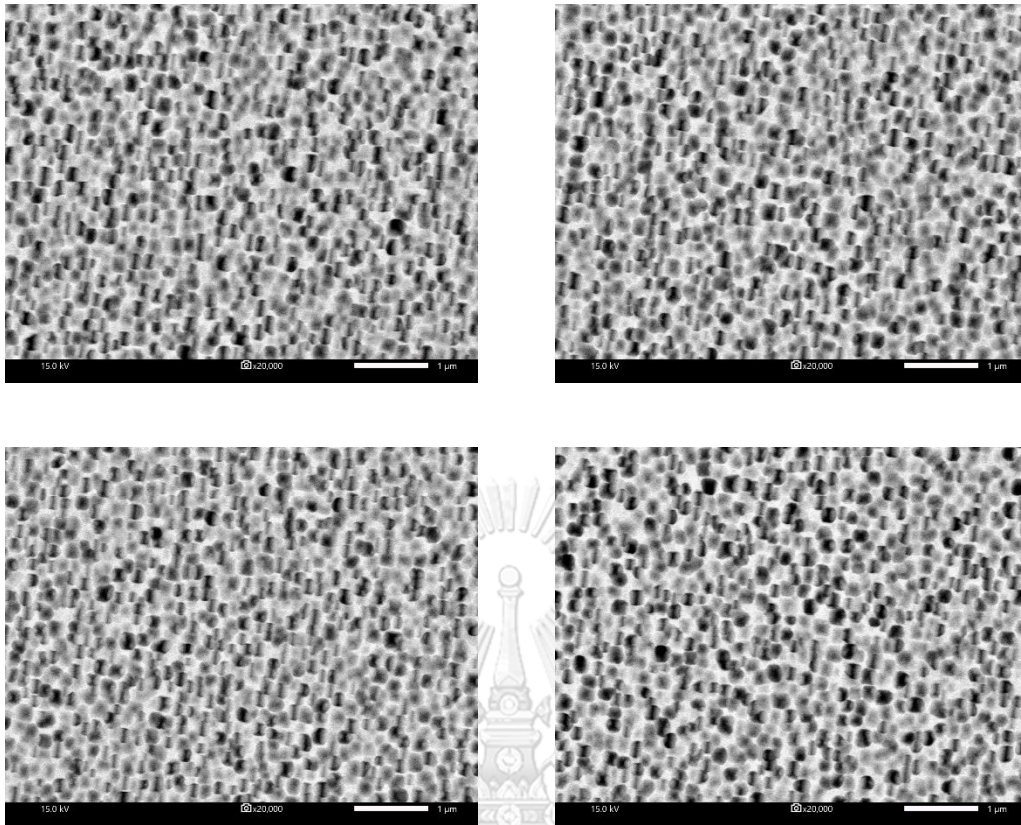




รูปที่ ค4 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงาน 3 กำลังขยาย 20000 เท่า จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ  
ส่องกราด JEOL รุ่น JSM IT-500HR

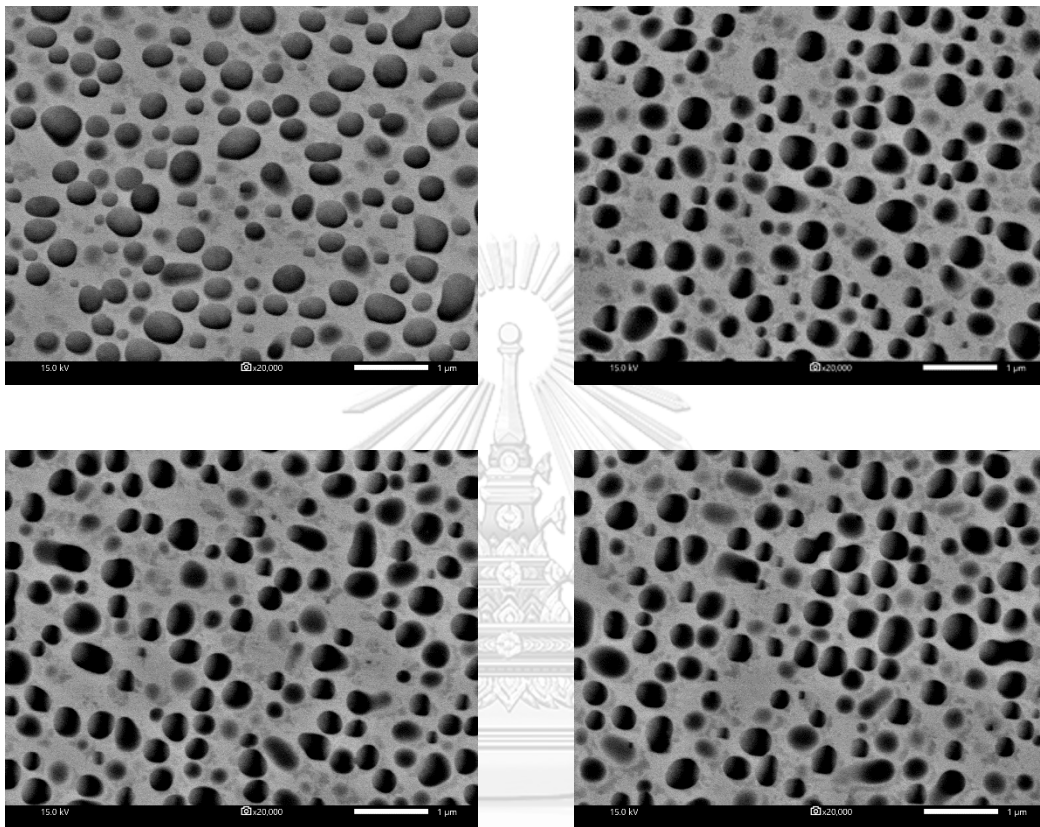


รูปที่ ค5 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงาน 4 กำลังขยาย 20000 เท่า จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ  
ส่องกราด JEOL รุ่น JSM IT-500HR



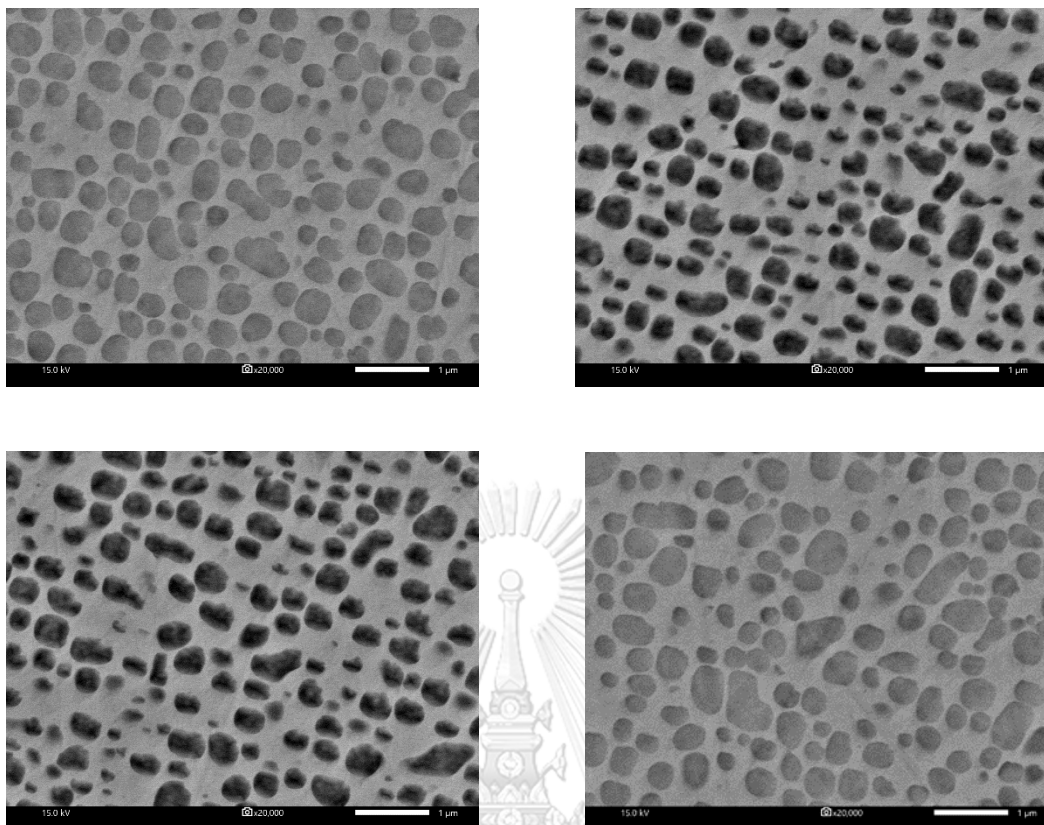
รูปที่ ๓๖ โครงสร้างจุลภาคชิ้นงาน 5 กำลังขยาย 20000 เท่า จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ  
ส่องกราด JEOL รุ่น JSM IT-500HR

ภาคผนวก ง โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหลังการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง

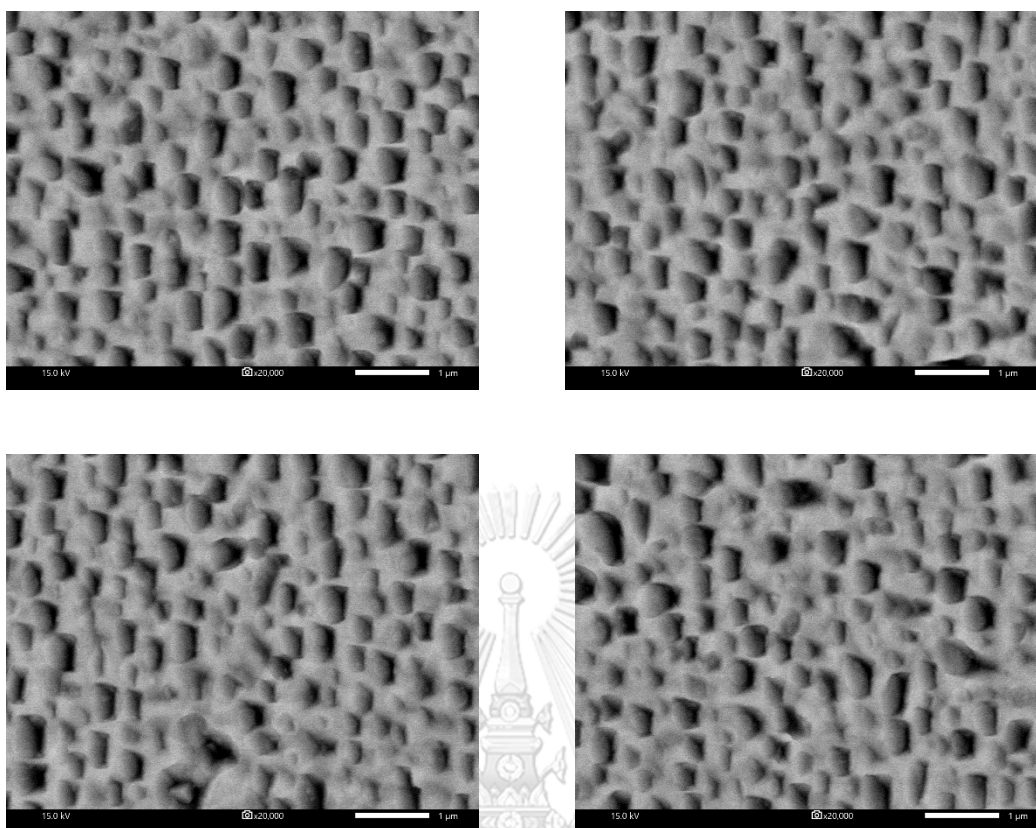


จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

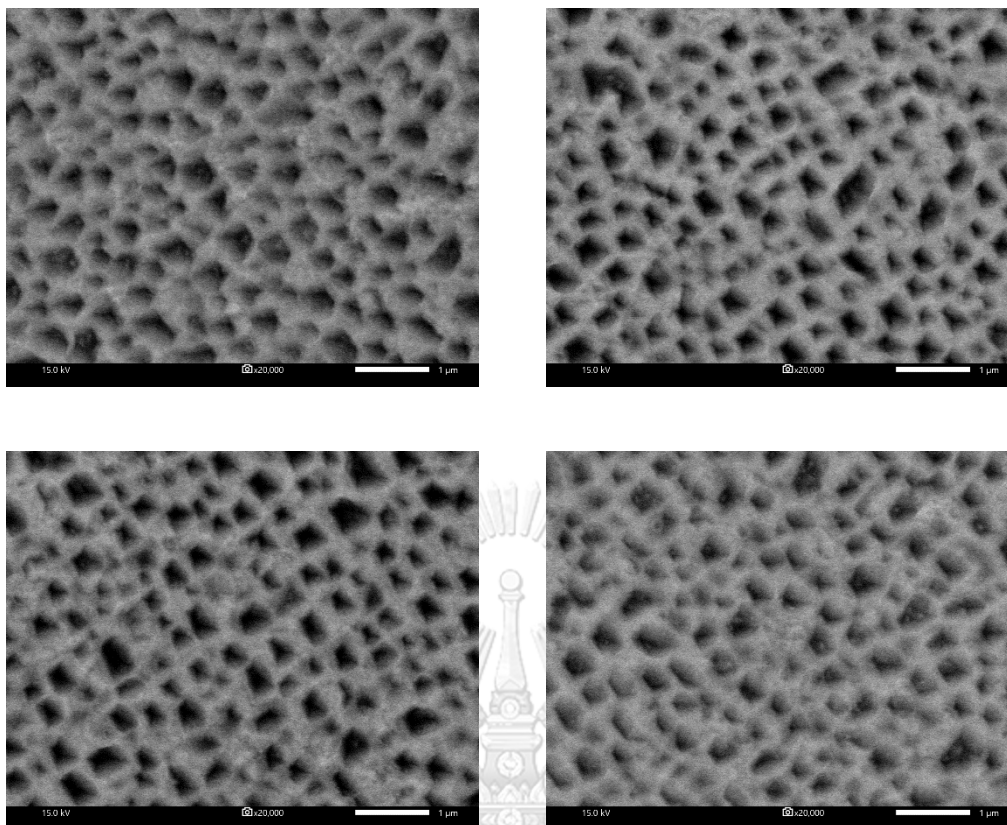
รูปที่ ง1 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงาน 0 กำลังขยาย 20000 เท่า จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด JEOL รุ่น JSM IT-500HR



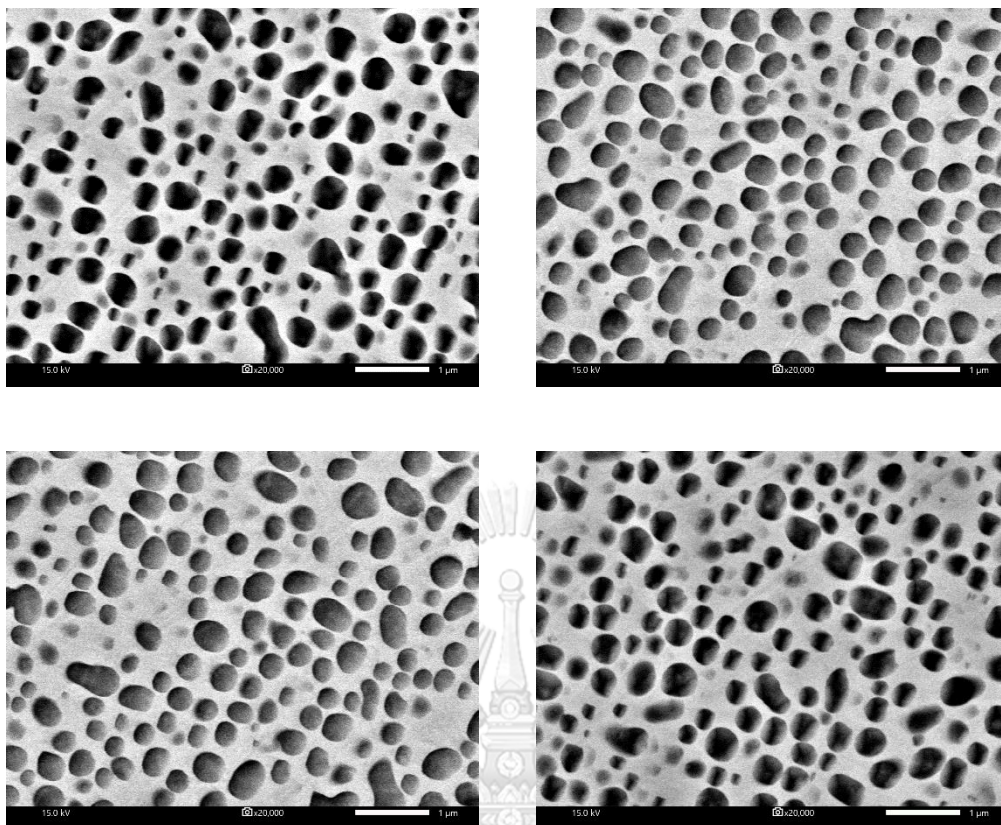
รูปที่ ง2 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงาน 1 กำลังขยาย 20000 เท่า จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ  
ส่องกราด JEOL รุ่น JSM IT-500HR



รูปที่ ๓ โครงสร้างจุลภาคชิ้นงาน 2 กำลังขยาย 20000 เท่า จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ  
ส่องกราด JEOL รุ่น JSM IT-500HR

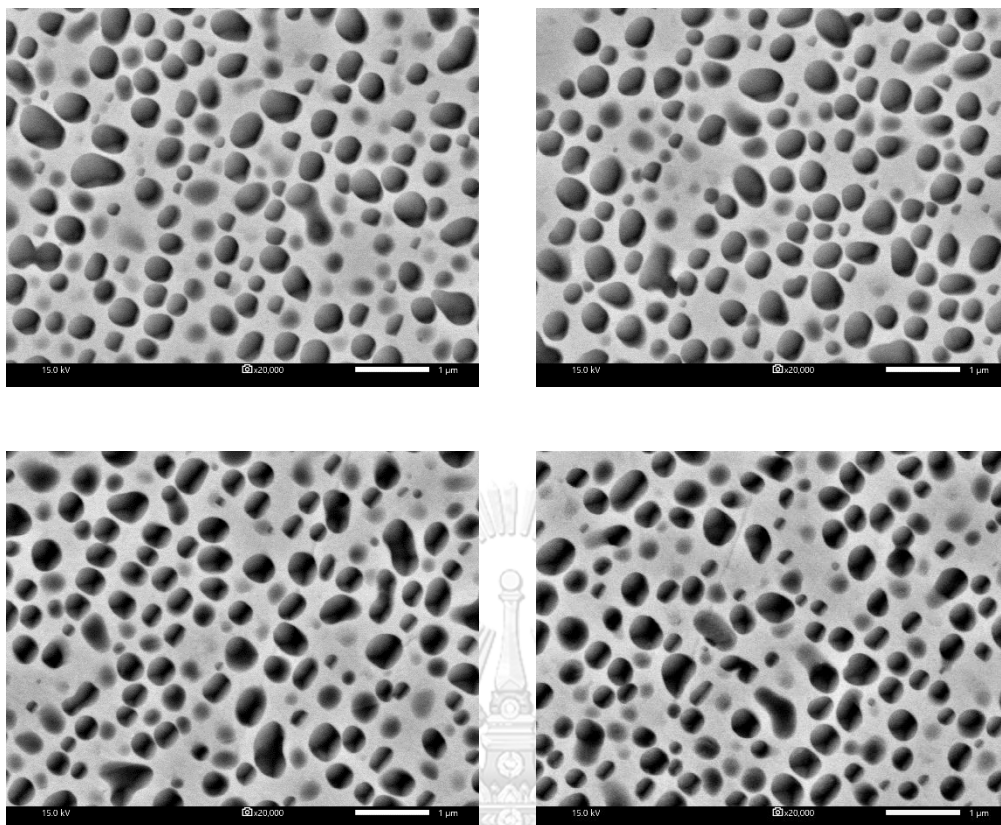


รูปที่ ๔ โครงสร้างจุลภาคชิ้นงาน 3 กำลังขยาย 20000 เท่า จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ  
ส่องกราด JEOL รุ่น JSM IT-500HR



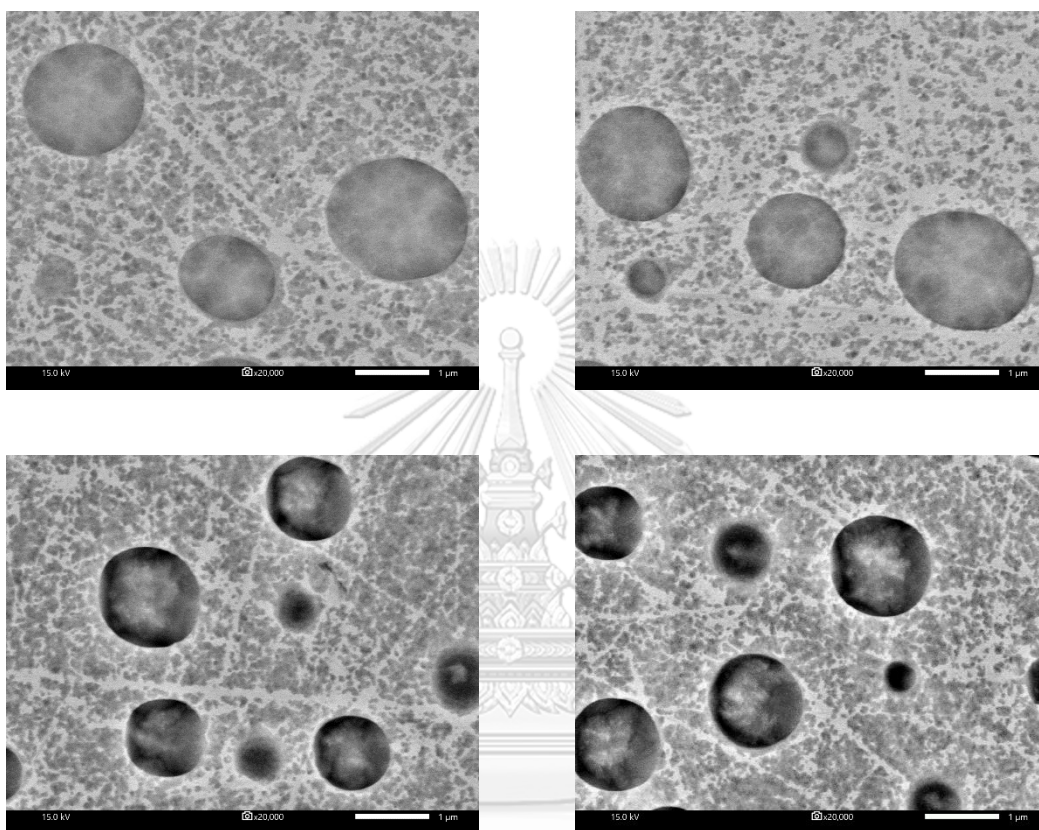
รูปที่ ๖5 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงาน 4 กำลังขยาย 20000 เท่า จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ  
ส่องกราด JEOL รุ่น JSM IT-500HR





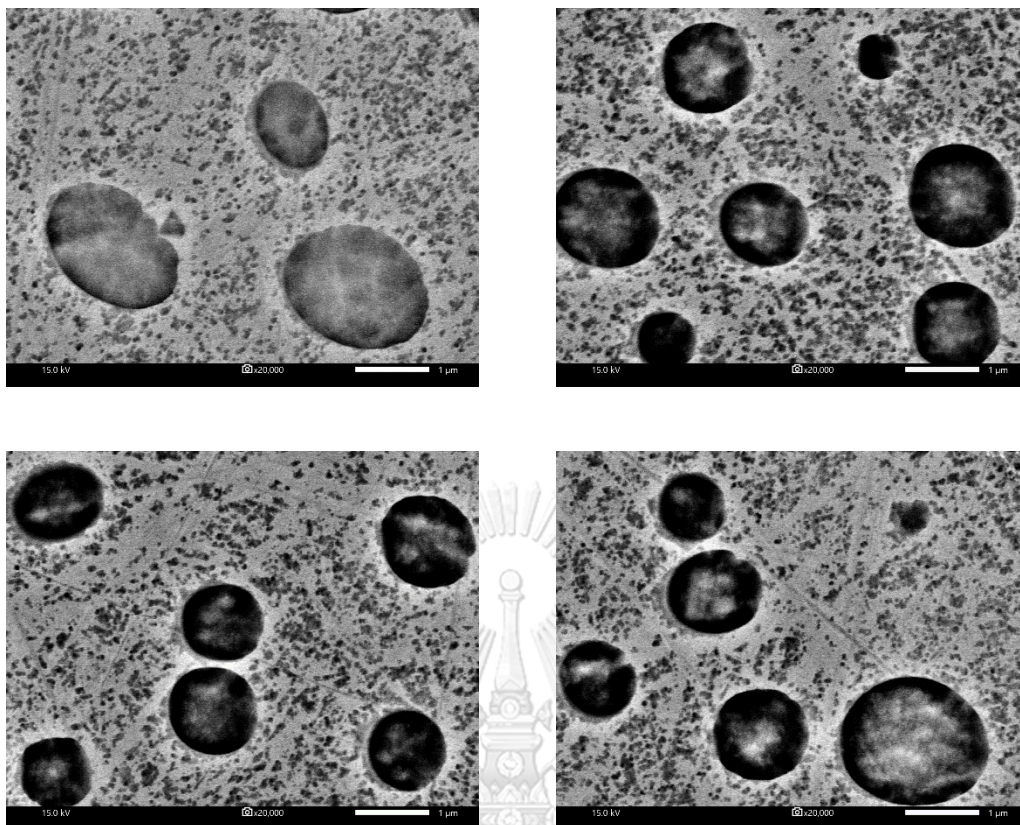
รูปที่ ๖ โครงสร้างจุลภาคชิ้นงาน 5 กำลังขยาย 20000 เท่า จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ  
ส่องกราด JEOL รุ่น JSM IT-500HR

ภาคผนวก จ โครงสร้างจุลภาคชิ้นงานหลังการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 400 ชั่วโมง

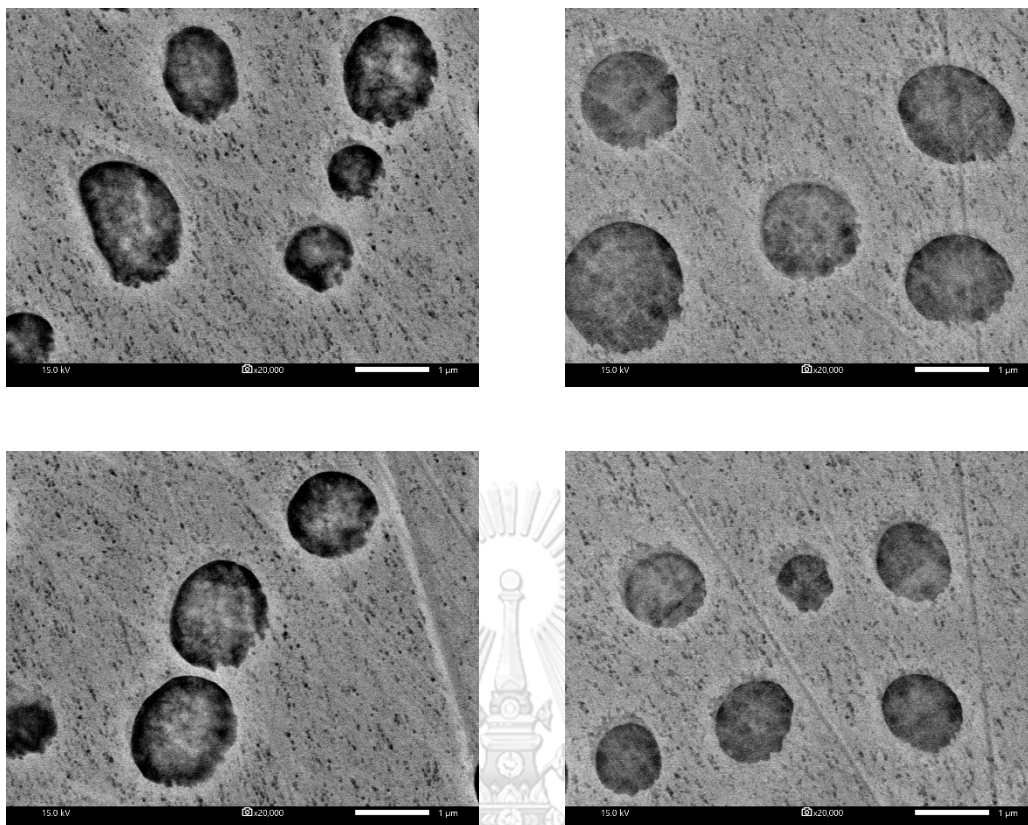


จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

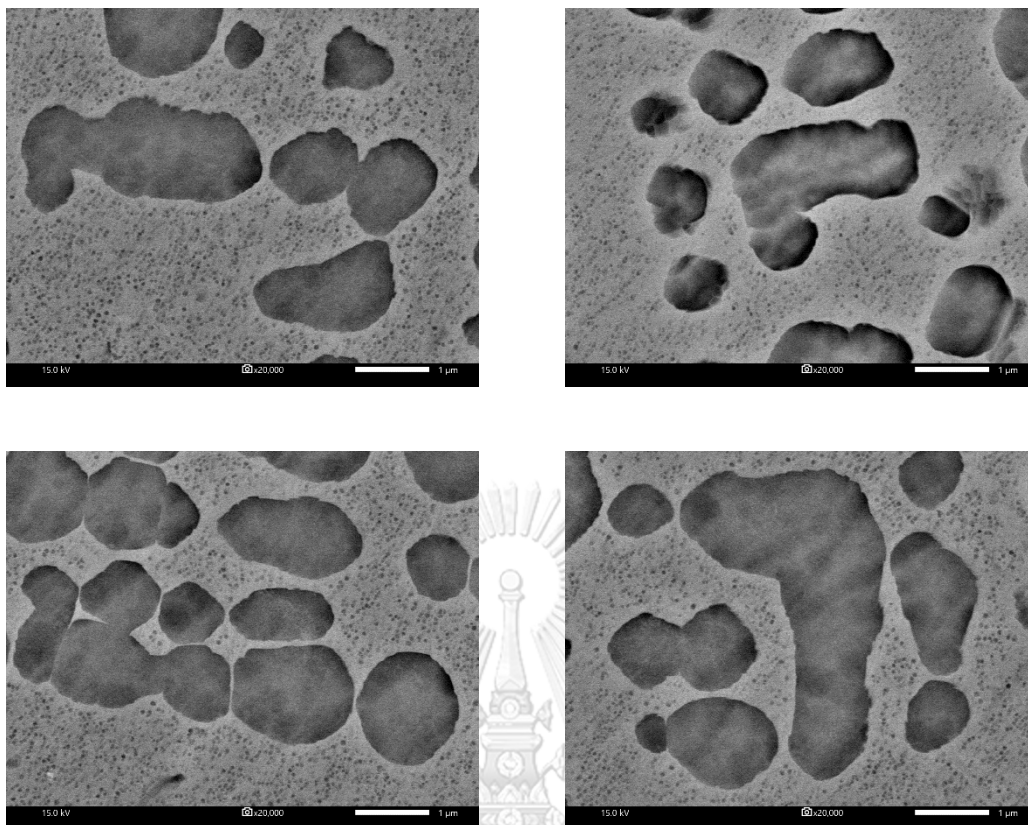
รูปที่ จ1 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงาน 0 กำลังขยาย 20000 เท่า จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด JEOL รุ่น JSM IT-500HR



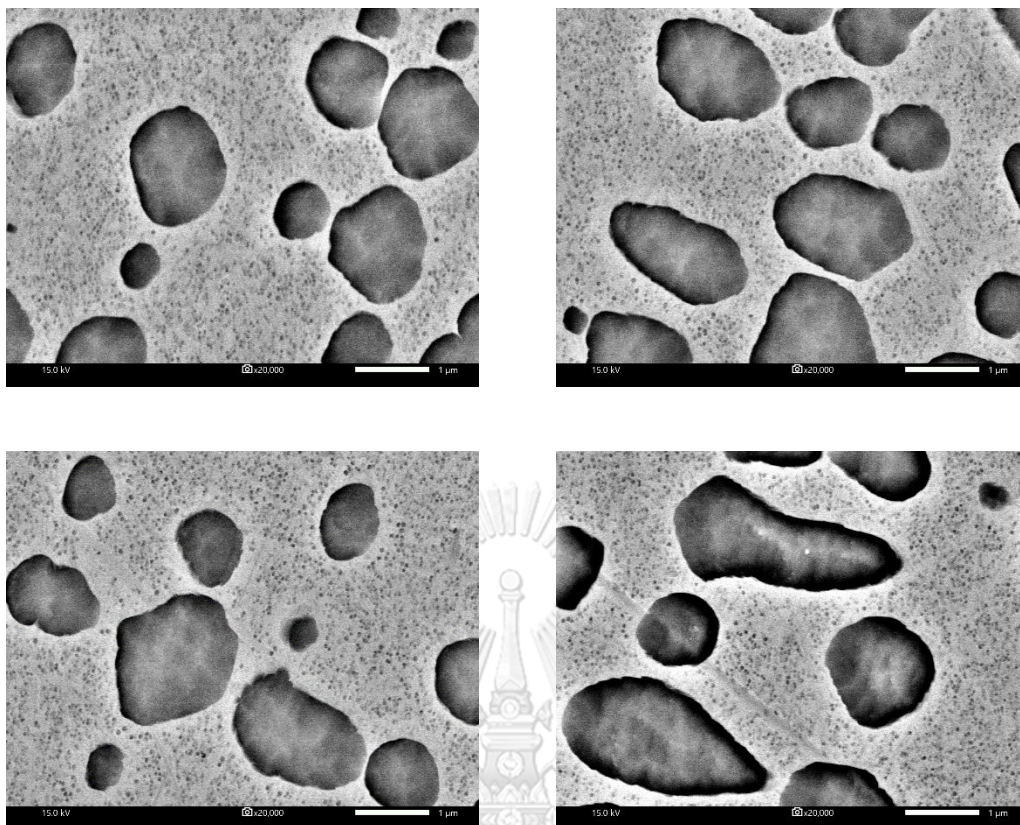
รูปที่ จ2 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงาน 1 กำล้างขยาย 20000 เท่า จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ  
ส่องกราด JEOL รุ่น JSM IT-500HR



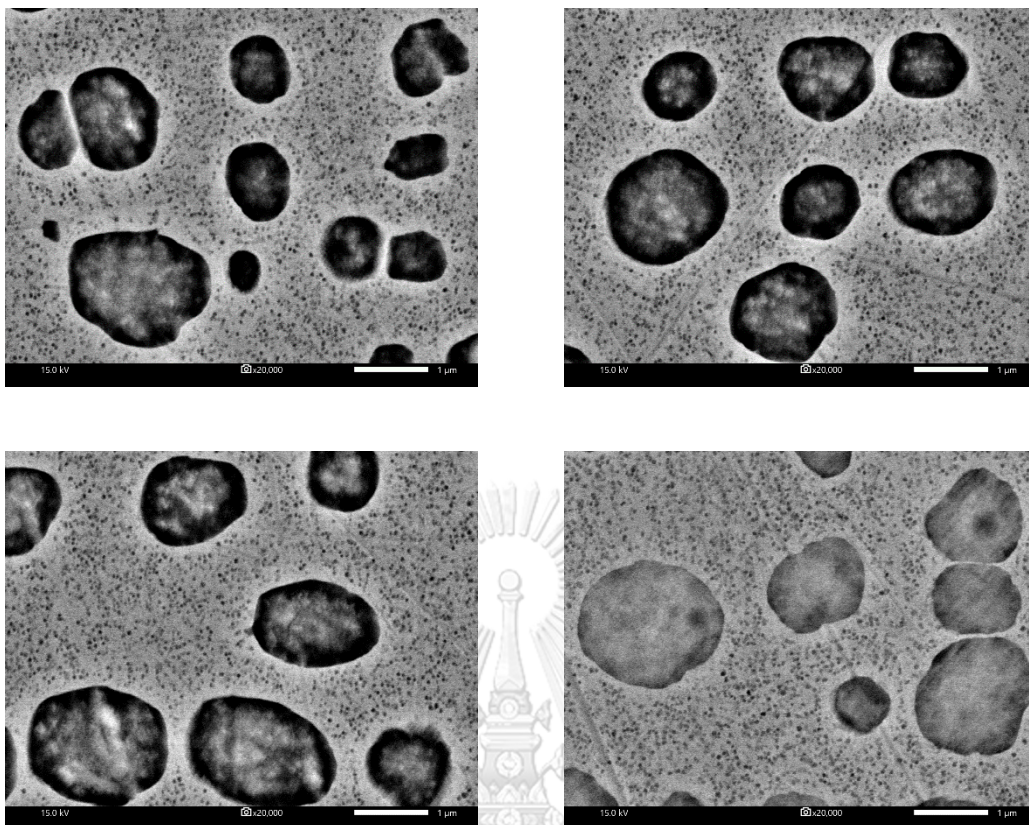
รูปที่ จ3 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงาน 2 กำลังขยาย 20000 เท่า จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ  
ส่องกราด JEOL รุ่น JSM IT-500HR



รูปที่ จ4 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงาน 3 กำลังขยาย 20000 เท่า จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ  
ส่องกราด JEOL รุ่น JSM IT-500HR



รูปที่ จ5 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงาน 4 กำลังขยาย 20000 เท่า จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ  
ส่องกราด JEOL รุ่น JSM IT-500HR



รูปที่ จ6 โครงสร้างจุลภาคชิ้นงาน 5 กำลังขยาย 20000 เท่า จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ  
ส่องกราด JEOL รุ่น JSM IT-500HR

## บรรณานุกรม

1. ว่างยาว, ป., เอกสารการสอนวิชา *High Temperature Material*. 2548, ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
2. Thakur, A., *Microstructural Responses of a Nickel Base Cast IN-738 Superalloy to a Variety of Pre-weld Heat-treatments*. 1998: University of Manitoba.
3. Donachie, M.J., and Donachie, S. J., *Superalloys: a technical guide: ASM international*. 2002.
4. ศรีเกียรติพันธ์, ป., ผลการเติมอะลูมิเนียมและไทเทเนียมในโลหะผสมพิเศษเกรด *Hastelloy X* ที่ผลิตด้วยการหลอมอาร์คต่อโครงสร้างจุลภาคและความต้านทานการเกิดออกซิเดชัน, in ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ 2556, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
5. University, K., *Material innovation center*. 2012.
6. *Turbine Blades*. Internet. p. [http://www.spaceflight.esa.int/impress/text/education/Circular%20Motion/Turbine\\_Blades.html](http://www.spaceflight.esa.int/impress/text/education/Circular%20Motion/Turbine_Blades.html).
7. Reed, R.C., *The superalloys: fundamentals and applications: Cambridge university press*. 2008.
8. *Ni base superalloy*. Internet. p. [https://www.mah.se/upload/\\_upload/Ni-base%20superalloys.pdf](https://www.mah.se/upload/_upload/Ni-base%20superalloys.pdf).
9. company, t.i.n., *Alloy IN-738 Technical data*. New York.
10. Liu, J.L., Zhang, J., Meng, J., Jia, Y. X., and Jin, T., *The effect of Co on the microstructure and stress rupture properties of a single crystal superalloy*. 2014.
11. Wang, B., Zhang, J., Huang, T., Yang, W., Su, H., Li, Z., and Fu, H. , *Effect of Co on microstructural stability of the third generation Ni-based single crystal superalloys*. *Journal of Materials Research*, 2016: p. 1328-1337.
12. Wangyao, P., et al., *Effects of Al Additions and Reheat Treatments on Microstructures of Modified Nickel-Based Superalloy, Grade Inconel 738, by Vacuum Arc Melting Process*. *Advanced Materials Research*, 2014. 1025-1026: p. 395-402.
13. Wangyao, P., et al., *Effect of Al Addition in Cast Nickel Base Superalloys, Inconel-738 on Microstructures and Oxidation Behaviors at 900°C and 1000°C*.



- Key Engineering Materials, 2015. 656-657: p. 39-44.
14. C.T. SIMS, W.C.H., *The superalloys*. 1972, New York: Wiley.
  15. Kazantseva, N., et al. *Analysis of phase transformations in Inconel 738C alloy after regenerative heat treatment*. in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. IOP Publishing.
  16. Shi, Q., et al., *Co effect on as-cast and heat-treated microstructures in Ru-containing single-crystal superalloys*. 2014. 45(4): p. 1833-1843.
  17. Chen, J.Y., et al. *Role of Cobalt in the Microstructural Stability of Single Crystal Superalloys*. in *Materials Science Forum*. 2016. Trans Tech Publ.
  18. Nararak, A., et al., *Effect of rhenium and cobalt additions on the microstructure and gamma prime phase stability of vacuum arc melted modified nickel-based superalloys grade MGA 1400*. 2019. 61(7): p. 609-617.
  19. Nathal, M. and L.J.M.T.A. Ebert, *The influence of cobalt, tantalum, and tungsten on the microstructure of single crystal nickel-base superalloys*. 1985. 16(10): p. 1849-1862.
  20. Kontikame, N., S. Polsilapa, and P. Wangyao. *Effect of Precipitation Aging Temperatures on Reheat Treated Microstructures and its Phase Stability after Long-Term Exposure in Cast Nickel Base Superalloy, Grade Inconel 738*. in *Materials Science Forum*. 2017. Trans Tech Publ.
  21. Llewelyn, S., et al., *The effect of Ni: Co ratio on the elemental phase partitioning in  $\gamma$ - $\gamma'$  Ni-Co-Al-Ti-Cr alloys*. 2017. 131: p. 296-304.
  22. Meher, S., et al., *Coarsening behaviour of gamma prime precipitates and concurrent transitions in the interface width in Ni-14 at.% Al-7 at.% Cr*. 2013. 93(9): p. 521-530.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	วิซชเวศร์ ก่อธรรมนิเวศน์
วัน เดือน ปี เกิด	23 ตุลาคม 2536
สถานที่เกิด	สุราษฎร์ธานี
วุฒิการศึกษา	เข้าศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2555 เข้าศึกษาระดับปริญญาโทบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโลหการและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2559
ที่อยู่ปัจจุบัน	1/61 ถ.ดอนนกะ ต.ตลาด อ.เมือง จ.สุราษฎร์ธานี



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY