

ผลของการลดลงของอุณหภูมิระหว่างการทำละลายในกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อฟื้นฟูโครงสร้าง และ  
การจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานต่อโครงสร้างจุลภาคสุดท้ายของยูดีเมท 520

นางสาวกฤษฎานีย์ แซ่ล้อ



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

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

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการและวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Effect of temperature dropping during solution treatment in rejuvenation heat treatment and following long-term simulated service at high temperatures on final microstructures of Udimet 520

Miss Kritsayanee Saelor



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

Engineering

Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลของการลดลงของอุณหภูมิระหว่างการทำละลายใน  
กรรมวิธีทางความร้อนเพื่อฟื้นฟูโครงสร้าง และการจำลอง  
การใช้งานที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานต่อโครงสร้างจุลภาค  
สุดท้ายของยูดีเมท 520

โดย

นางสาวกฤษฎานีย์ แซ่ลื้อ

สาขาวิชา

วิศวกรรมโลหการและวัสดุ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

อาจารย์ ดร.ปัญญาวัชร วังยาว

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(อาจารย์ ดร.ปัญญาวัชร วังยาว)

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

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





# # 5570534121 : MAJOR METALLURGICAL AND MATERIALS ENGINEERING

KEYWORDS: NICKEL BASE SUPERALLOY / TEMPERATURE DROPPING / REJUVENATION  
HEAT TREATMENT / SOLUTION TREATMENT / UDIMET 520 / LONG-TERM SERVICE /  
MICROSTRUCTURE / GAMMA PRIME

KRITSAYANEE SAEOR: Effect of temperature dropping during solution treatment in rejuvenation heat treatment and following long-term simulated service at high temperatures on final microstructures of Udimet 520. ADVISOR: PANYAWAT WANGYAO, Ph.D., 133 pp.

After long term service at elevated temperatures, the turbine blades, which are made of cast nickel base superalloys, would be microstructurally degraded. This would result in lower mechanical properties and shorter life time. Generally, these degraded turbine blades can be microstructurally restored by rejuvenation heat treatment to return the microstructural requirements. The rejuvenation heat treatment processes usually consist of solutioning treatment and precipitation aging. However, in some cases, temperature dropping could accidentally occur in the solutioning process and result in final microstructure. This work had studied the effect of temperature dropping in various conditions during solutioning treatment of cast nickel base superalloy grade, Udimet 520. After various simulated solutioning treatments with temperature dropping following by double precipitation agings, all re-heat treated samples were long term heated for 1,000 hours at the temperatures of 800 °C and 900 °C. From all obtained results, it was found that the various conditions of temperature dropping during solutioning treatment provided slightly difference in final microstructures. This recieved result is different from those of other experiments of other cast nickel base superalloys. This might be due to very low volume fraction of  $\gamma'$  precipitated phase in the studied alloy, which could be completely dissolved in very short-time solutioning treatment.

Department: Metallurgical Engineering Student's Signature .....

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

Academic Year: 2015

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.ปัญญาวัชร วั่งยาว ที่สละเวลาคอยช่วยเหลือให้คำปรึกษา คำแนะนำ และข้อคิดเห็นในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ทำให้งานวิจัยนี้ผ่านไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ และเจ้าหน้าที่ธุรการภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่านที่คอยให้ความรู้ และอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และโดยเฉพาะอย่างยิ่ง พี่ลาวัลย์ บุญประคอง ศูนย์วิจัยชีววิทยาช่องปาก คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่ และเครื่องมือทดสอบเป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา-มารดา และครอบครัวที่ให้การสนับสนุน และคอยเป็นกำลังใจให้แก่ผู้วิจัยตลอดมา รวมถึงขอบคุณเพื่อนๆ และน้องๆมหาดบัณฑิตทุกท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งนางสาวกัญมูหตา อังอำนาจศิริ และนางสาวนวรรตน์ ไชยฤกษ์ที่คอยให้ความช่วยเหลืออยู่ ฝ้าห้องปฏิบัติการเป็นเพื่อนตลอดเวลาที่ทำการวิจัย

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแต่บิดา มารดา และบุพพการีทุกท่านที่ได้อบรม และให้กำลังใจผู้วิจัยมาตลอดในทุกเรื่อง

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
สารบัญตาราง.....	ต
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ปริทรรศน์วรรณกรรม.....	4
2.1 โลหะผสมพิเศษ.....	4
2.2 ชนิดของโลหะผสมพิเศษ.....	4
2.2.1 โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล.....	4
2.2.2 โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล-เหล็ก.....	5
2.2.3 โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นโคบอลต์.....	5
2.3 สมบัติต่างๆของโลหะผสมพิเศษ.....	5
2.3.1 สมบัติทางกล.....	5
2.3.2 ลักษณะทางกายภาพ.....	6
2.4 ธาตุผสมของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล.....	7
2.5 โครงสร้างจุลภาคและเฟสของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล.....	10

2.6 สมบัติทั่วไปของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิล	11
2.7 สมบัติทั่วไปของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิลเกรดยูดีเมท 520	11
2.8 กรรมวิธีทางความร้อนสำหรับโลหะผสมพิเศษเพื่อฟื้นฟูโครงสร้างจุลภาค	12
2.8.1 การทำละลาย (Solution Treatment)	12
2.8.2 การบ่มแข็งเพื่อให้เกิดการตกตะกอน (Precipitate Aging Treatment)	12
2.8.3 การจุ่มชุบ (Quenching)	13
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	14
บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีการทดลอง	22
3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้สำหรับทำงานวิจัย	22
3.1.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงาน	22
3.1.2 อุปกรณ์สำหรับการเตรียมผิวชิ้นงาน	22
3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	22
3.2 วิธีการทดลอง	22
3.3 แผนการดำเนินงานวิจัย	30
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปราย	31
4.1 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมพิเศษเกรดยูดีเมท 520 ที่ได้รับ	31
4.2 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ได้รับ (As-Received microstructure)	31
4.3 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาค สภาวะแบบต่างๆ	32
4.4 โครงสร้างจุลภาคระหว่างการทำละลายของการทดลองแบบสภาวะ 1-1-1-1	40
4.5 ผลของระดับอุณหภูมิที่ลดลงระหว่างการทำละลายต่อขนาดของอนุภาคภาคแกมมา ไพร์ม	42
4.6 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนและทำการจำลองการใช้งานที่ อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง	44

4.7 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนและทำการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง.....	52
4.8 อภิปรายผลของการทดลองต่อขนาด และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นที่.....	61
4.9 ความแข็ง .....	63
4.10 เฟสอันตราย (TCP Phases).....	64
บทที่ 5 สรุปผล และข้อเสนอแนะ.....	65
5.1 สรุปผล .....	65
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	66
รายการอ้างอิง .....	67
ภาคผนวก .....	69
ภาคผนวก ก (โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะต่างๆ) ..	70
ภาคผนวก ข (โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะต่างๆ หลังผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง).....	87
ภาคผนวก ค (โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะต่างๆ หลังผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง).....	104
ภาคผนวก ง (ค่าขนาดพื้นที่ของแกมมาไพร์มเฉลี่ย).....	121
ภาคผนวก จ (ค่าร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นที่).....	125
ภาคผนวก ฉ (ค่าความแข็งจุลภาค).....	129
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	133

## สารบัญรูปร่างภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 ธาตุต่างๆที่มีผลต่อโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้หนักเกิด.....	8
รูปที่ 2.2 ลักษณะของคาร์ไบด์ของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้หนักเกิด.....	11
รูปที่ 2.3 หลักการในการบ่มแข็งให้เกิดการตะกอนของอนุภาคแกมมาไพร์ม.....	13
รูปที่ 2.4 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิของโลหะผสมพิเศษเกรดยูติเมท 520...	15
รูปที่ 2.5 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นประลัย (Rupture strength) ที่ 700 องศาเซลเซียส หลังการทดสอบ 1,000 ชั่วโมง กับสัดส่วนเชิงพื้นที่ทั้งหมดของแกมมาไพร์ม และแกมมา ดับเบิลไพร์มซึ่งเป็นเฟสเพิ่มความแข็งแรงของแต่ละวัสดุที่นิยมนำมาทำใบพัดกังหันแก๊ส...	15
รูปที่ 2.6 การโตของอนุภาคแกมมาไพร์ม และการพัฒนาของคาร์ไบด์ตามบริเวณขอบเกรนจนกลายเป็นฟิล์มคาร์ไบด์ต่อเนื่องรอบๆชั้นของแกมมาไพร์ม (ภาพกำลังขยาย 3,500 เท่า).....	17
รูปที่ 2.7 โครงสร้างจุลภาคสุดท้ายของชิ้นงานอินโคเนล 738 ที่ผ่านการทดลองตามสภาวะต่างๆ...	18
รูปที่ 2.8 โครงสร้างจุลภาคสุดท้ายของชิ้นงานจิทิตี 111 ที่ผ่านการทดลองตามสภาวะต่างๆ.....	20
รูปที่ 3.1 รูปแบบกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของยูติเมท 520 แบบ สภาวะมาตรฐาน.....	23
รูปที่ 3.2 รูปแบบกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของยูติเมท 520 แบบ สภาวะ 1-3.....	24
รูปที่ 3.3 รูปแบบกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของยูติเมท 520 แบบ สภาวะ 2-2.....	24
รูปที่ 3.4 รูปแบบกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของยูติเมท 520 แบบ สภาวะ 3-1.....	25
รูปที่ 3.5 รูปแบบกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของยูติเมท 520 แบบ สภาวะ 1-2-1.....	26

## สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่3.6 รูปแบบกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของยูติเมท 520 แบบ สภาวะ 1-1-1-1.....	27
รูปที่4.1 (ก) โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ได้รับ (กำลังขยาย 50,000 เท่า) (ข) โครงสร้างจุล ภาคของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบมาตรฐาน (กำลังขยาย 50,000 เท่า)....	31
รูปที่4.2 โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ (ก) A 1-3 (ข) B 1-3 และ (ค) C 1-3 (กำลังขยาย 50,000 เท่า).....	33
รูปที่4.3 โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ (ก) A 2-2 (ข) B 2-2 และ (ค) C 2-2 (กำลังขยาย 50,000 เท่า).....	34
รูปที่4.4 โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ (ก) A 3-1 (ข) B 3-1 และ (ค) C 3-1 (กำลังขยาย 50,000 เท่า).....	35
รูปที่4.5 โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ (ก) A 1-2-1 (ข) B 1-2-1 และ (ค) C 1-2-1 (กำลังขยาย 50,000 เท่า).....	37
รูปที่4.6 โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ (ก) A 1-1-1-1 (ข) B 1-1-1-1 และ (ค) C 1-1-1-1 (กำลังขยาย 50,000 เท่า).....	38
รูปที่4.7 ขนาดโดยเฉลี่ยของอนุภาคแกมมาไพร์มของชิ้นงานหลังการทำกรรมวิธีทางความร้อน.....	39
รูปที่4.8 ร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นของชิ้นงานหลังการทำกรรมวิธีทาง ความร้อน.....	39
รูปที่4.9 รูปแบบกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของยูติเมท 520 แบบ 1-1-1-1.....	40
รูปที่4.10 โครงสร้างจุลภากระหว่างการทำละลายของกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อปรับปรุงโครง สร้างจุลภาคของยูติเมท 520 แบบ 1-1-1-1 .....	42
รูปที่4.11 ผลของการลดลงของอุณหภูมิระหว่างการทำละลายต่อขนาดอนุภาคแกมมาไพร์ม.....	43

## สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่4.12 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบมาตรฐานหลังผ่าน การจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง (กำลัง ขยาย 50,000 เท่า).....	44
รูปที่4.13 โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ (ก) A 1-3 (ข) B 1-3 และ (ค) C 1-3 หลังผ่านการจำลอง การใช้งานที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง (กำลังขยาย 50,000 เท่า).....	45
รูปที่4.14 โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ (ก) A 2-2 (ข) B 2-2 และ (ค) C 2-2 หลังผ่านการจำลอง การใช้งานที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง (กำลังขยาย 50,000 เท่า).....	47
รูปที่4.15 โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ (ก) A 3-1 (ข) B 3-1 และ (ค) C 3-1 หลังผ่านการจำลอง การใช้งานที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง (กำลังขยาย 50,000 เท่า).....	48
รูปที่4.16 โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ (ก) A 1-2-1 (ข) B 1-2-1 และ (ค) C 1-2-1 หลังผ่าน การจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง (กำลังขยาย 50,000 เท่า).....	49
รูปที่4.17 โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ (ก) A 1-1-1-1 (ข) B 1-1-1-1 และ (ค) C 1-1-1-1 หลังผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง (กำลังขยาย 50,000 เท่า).....	50
รูปที่4.18 ขนาดโดยเฉลี่ยของอนุภาคแกมมาไพรม์ของชิ้นงานหลังผ่านการจำลองการใช้งานที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง.....	51
รูปที่4.19 ร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพรม์ต่อเนื้อพื้นของชิ้นงานหลังผ่านการจำลองการ ใช้งานที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง.....	52



## สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่4.20	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบมาตรฐานหลังผ่าน การจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง (กำลัง ขยาย 50,000 เท่า).....	53
รูปที่4.21	โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ (ก) A 1-3 (ข) B 1-3 และ (ค) C 1-3 หลังผ่านการจำลอง การใช้งานที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง (กำลังขยาย 50,000 เท่า).....	54
รูปที่4.22	โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ (ก) A 2-2 (ข) B 2-2 และ (ค) C 2-2 หลังผ่านการจำลอง การใช้งานที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง (กำลังขยาย 50,000 เท่า).....	55
รูปที่4.23	โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ (ก) A 3-1 (ข) B 3-1 และ (ค) C 3-1 หลังผ่านการจำลอง การใช้งานที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง (กำลังขยาย 50,000 เท่า).....	56
รูปที่4.24	โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ (ก) A 1-2-1 (ข) B 1-2-1 และ (ค) C 1-2-1 หลังผ่านการ จำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง (กำลังขยาย 50,000 เท่า).....	57
รูปที่4.25	โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ (ก) A 1-1-1-1 (ข) B 1-1-1-1 และ (ค) C 1-1-1-1 หลัง ผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง (กำลังขยาย 50,000 เท่า).....	59
รูปที่4.26	ขนาดโดยเฉลี่ยของอนุภาคแกมมาไพรม์ของชิ้นงานหลังผ่านการจำลองการใช้งานที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง.....	60
รูปที่4.27	ร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพรม์ต่อเนื้อพื้นของชิ้นงานหลังผ่านการจำลองการใช้ งานที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง.....	62
รูปที่4.28	ขนาดโดยเฉลี่ยของอนุภาคแกมมาไพรม์ของชิ้นงานหลังผ่านการทดลองสภาวะต่างๆ....	62

## สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่4.29 ร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นของชิ้นงานหลังผ่านการทดลอง สภาวะต่างๆ.....	62
รูปที่4.30 ความแข็งโดยเฉลี่ยของชิ้นงานหลังจากการทดลองในสภาวะต่างๆ.....	63



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 หน้าที่ของธาตุต่างๆที่ช่วยปรับปรุงสมบัติต่างๆของโลหะผสมพิเศษ.....8

ตารางที่ 2.2 สมบัติทั่วไปของโลหะผสมพิเศษเกรดยูดีเมท 520.....12

ตารางที่ 2.3 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมพิเศษยูดีเมท 520.....14

ตารางที่ 2.4 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมพิเศษเกรดยูดีเมท 520 .....16

ตารางที่ 4.1 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมพิเศษเกรดยูดีเมท 520 ที่ใช้ในการทดลอง.....31



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

มีการนำโลหะผสมพิเศษมาใช้ในงานภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูงในปัจจุบันอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งงานซึ่งเกี่ยวข้องกับด้านพลังงาน ซึ่งในโรงผลิตไฟฟ้านิยมนำโลหะผสมพิเศษมาใช้ผลิตเป็นใบพัดภายในเครื่องจักรกังหันก๊าซเนื่องจากเป็นชิ้นส่วนที่ต้องรับแรง และทนอุณหภูมิจากก๊าซร้อนที่จะส่งผ่านไปยังเครื่องจักรกังหันก๊าซ โดยวัสดุที่นิยมนำมาใช้สร้างชิ้นส่วนใบพัดเครื่องจักรกังหันก๊าซนิยมใช้โลหะผสมพิเศษชนิดเนื้อพื้นนิเกิล (Nickel-base Superalloys) เนื่องจากวัสดุชนิดนี้มีน้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับเนื้อพื้นชนิดอื่น อีกทั้งมีความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงซึ่งเป็นผลมาจากกลไกการเพิ่มความแข็งแรงโดยสารละลายของแข็ง (Solid Solution Strengthening) ด้วยวิธีการบ่มแข็งทำให้เกิดอนุภาคของสารประกอบเชิงโลหะ หรือเฟสแกมมาไพรม์ลงบนเนื้อพื้นแกมมาซึ่งทำหน้าที่ช่วยขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันจึงเป็นสาเหตุทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น แต่เมื่อชิ้นงานที่เป็นโลหะผสมพิเศษชนิดเนื้อพื้นนิเกิลถูกใช้งานที่อุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลานาน โครงสร้างจุลภาคของวัสดุก็จะเกิดการเสื่อมสภาพโดยเกิดการโตของอนุภาคแกมมาไพรม์ และการรวมตัวของอนุภาคแกมมาไพรม์ อีกทั้งยังเกิดการรวมตัวของคาร์ไบด์ขึ้นด้วย เป็นสาเหตุทำให้ความสามารถในการยับยั้งการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันลดลงสมบัติทางกลลดลงส่งผลให้เกิดการเสื่อมสภาพของชิ้นงานขึ้น

จากสาเหตุข้างต้นจึงมีการนำชิ้นงานที่ผ่านการใช้งานจนเกิดการเสื่อมสภาพของโครงสร้างจุลภาคมาปรับปรุงสมบัติของโลหะผสมพิเศษชนิดเนื้อพื้นนิเกิล โดยใช้กระบวนการทางความร้อน (Rejuvenation heat treatment) เพื่อให้ได้โครงสร้างจุลภาคที่ใกล้เคียงกับโครงสร้างจุลภาคก่อนการใช้งานเพื่อเป็นการลดต้นทุนเนื่องจากชิ้นงานใหม่มีราคาสูงเมื่อเทียบกับค่าใช้จ่ายในการทำ heat treatment ชิ้นงานที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว

โดยกรรมวิธีทางความร้อนที่ใช้มี 2 ขั้นตอน คือ

- การทำละลาย (Solution) ซึ่งจะทำการเผาชิ้นงานที่อุณหภูมิสูง ค้างไว้เป็นระยะเวลาหนึ่งเพื่อให้อนุภาคต่างๆที่มีอยู่ในเนื้อพื้นนั้นละลายกลับเข้าไปยังเนื้อพื้นทั้งหมด
- การบ่มแข็ง (Aging) เป็นการเผาที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการทำละลาย โดยเผาค้างไว้เป็นระยะเวลานาน เพื่อให้เกิดการตกตะกอนของอนุภาคแกมมาไพรม์ลงบนเนื้อพื้นแกมมา

ขั้นตอนการทำละลายมักประสบปัญหาในทางปฏิบัติเนื่องจากการทำละลายทำที่อุณหภูมิสูงและใช้ระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งในช่วงระยะเวลาดังกล่าวหากเกิดความผิดพลาดของเตาเผาชิ้นงานขึ้นโดยเตาเผามักจะตัดไฟเองอัตโนมัติ ส่งผลทำให้เกิดการลดลงของอุณหภูมิระหว่างขั้นตอนการทำละลาย

ซึ่งส่งผลอย่างมากต่อโครงสร้างจุลภาคสุดท้ายของโลหะผสมพิเศษชนิดเนื้อพื้นนิเกิลทำให้หลังจากการทำการรวมวิธีทางความร้อนเพื่อฟื้นฟูโครงสร้างได้โครงสร้างจุลภาคสุดท้ายไม่เป็นไปตามที่ต้องการซึ่งส่งผลอย่างมากเมื่อนำไปใช้งาน

ผู้ทำวิจัยจึงสนใจศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ และเวลาที่อาจเกิดขึ้นเนื่องจากการขัดข้องของเตาเผาที่เกิดการตัดไฟเองอัตโนมัติ ทำการทดลองโดยการดัดแปลงรูปแบบกรรมวิธีทางความร้อนแบบมาตรฐานของโลหะผสมพิเศษชนิดเนื้อพื้นนิเกิลเกรดยูดีเมท 520 ซึ่งโลหะผสมพิเศษชนิดดังกล่าวเป็นโลหะผสมพิเศษชนิดเนื้อพื้นนิเกิลเกรดหนึ่งที่นิยมใช้งานในการทำเป็นใบพัดภายในเครื่องจักรกังหันก๊าซ อีกทั้งผู้ทำวิจัยจะทำการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน 1,000 ชั่วโมง เพื่อศึกษาผลที่เกิดขึ้นจากการทดลองโดยทำการเปรียบเทียบ หาความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบกรรมวิธีทางความร้อนกับโครงสร้างจุลภาค และค่าความแข็ง

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการลดลงของอุณหภูมิระหว่างการทำการรวมวิธีทางความร้อนเพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาค และผลการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานต่อโครงสร้างจุลภาคสุดท้ายของโลหะผสมชนิดเนื้อพื้นนิเกิลเกรดยูดีเมท 520
- 1.2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการลดลงของอุณหภูมิการทำละลายระหว่างการทำการรวมวิธีทางความร้อนเพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาค และผลการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานต่อความแข็งจุลภาคของโลหะผสมชนิดเนื้อพื้นนิเกิลเกรดยูดีเมท 520
- 1.2.3 เพื่อศึกษาความเป็นได้ที่จะเกิดเฟสต่างๆที่ไม่ต้องการในโครงสร้างจุลภาคสุดท้ายของชิ้นงานโลหะผสมชนิดเนื้อพื้นนิเกิลเกรดยูดีเมท 520 ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนซึ่งมีการลดลงของอุณหภูมิการทำละลายระหว่างการทำการรวมวิธีทางความร้อนเพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาค และการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน

## 1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1.3.1 ศึกษาโครงสร้างจุลภาคสุดท้ายของโลหะผสมพิเศษชนิดเนื้อพื้นนิเกิลเกรดยูดีเมท 520 ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนซึ่งมีการลดลงของอุณหภูมิการทำละลายตามรูปแบบต่างๆที่กำหนดโดยอุณหภูมิที่ใช้ทำละลายเท่ากับ 1,125 องศาเซลเซียส โดยทำละลายเป็นเวลารวม 4 ชั่วโมง และการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิสูงที่ 800 และ

900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope: OM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)

- 1.3.2 ศึกษาวิเคราะห์หาขนาดเฉลี่ยของอนุภาคแกมมาไพร์ม และสัดส่วนเชิงพื้นที่ของแกมมาไพร์มว่ามีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรตามกรรมวิธีทางความร้อนซึ่งมีการลดลงของอุณหภูมิการทำละลายตามรูปแบบต่างๆที่กำหนดโดยอุณหภูมิที่ใช้ทำละลายเท่ากับ 1,125 องศาเซลเซียส โดยทำละลายเป็นเวลารวม 4 ชั่วโมง และการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิสูงที่ 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง โดยใช้โปรแกรม Image Analysis
- 1.3.3 ศึกษาความแข็งจุลภาคของโลหะผสมพิเศษชนิดเนื้อพื้นนิเกิลเกรดยูดีเมท 520 ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนซึ่งมีการลดลงของอุณหภูมิการทำละลายตามรูปแบบต่างๆที่กำหนดระหว่างการทำการกรรมวิธีการทำละลายโดยอุณหภูมิที่ใช้ทำละลายเท่ากับ 1,125 องศาเซลเซียส โดยทำละลายเป็นเวลารวม 4 ชั่วโมง และการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิสูงที่ 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทราบถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการลดลงของอุณหภูมิการทำละลายตามรูปแบบต่างๆตามที่กำหนด และผลของการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคสุดท้าย และค่าความแข็งจุลภาคของโลหะผสมพิเศษเกรดยูดีเมท 520
- 1.4.2 ทราบถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการลดลงของอุณหภูมิการทำละลายตามรูปแบบต่างๆตามที่กำหนดต่อโครงสร้างจุลภาคสุดท้ายของโลหะผสมพิเศษเกรดยูดีเมท 520 โดยเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่มีลดลงของอุณหภูมิการทำละลายระหว่างการทำการกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาค
- 1.4.3 เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการลดลงของอุณหภูมิการทำละลายระหว่างการทำการกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาค และผลของการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานที่ส่งผลต่อสมบัติทางกลด้านอื่นๆของโลหะผสมพิเศษเกรดยูดีเมท 520

## บทที่ 2

### ปริทรรศน์วรรณกรรม

#### 2.1 โลหะผสมพิเศษ

โลหะผสมพิเศษมีสมบัติเด่น[1, 2] คือ มีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดี, มีความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงดี, มีการต้านการคืบสูง, มีการขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำ และมีการนำความร้อนที่ดี ปัจจุบันโลหะผสมพิเศษถูกใช้ผลิตเป็นชิ้นส่วนในเครื่องบิน, เรือเดินสมุทร, ยานอวกาศ, เครื่องยนต์กังหันก๊าซสำหรับยานพาหนะและสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า, เครื่องยนต์ของจรวด, ชิ้นส่วนในเตาปฏิกรณ์ปรมาณู, เรือดำน้ำ, โรงไฟฟ้ากังหันไอน้ำ, อุปกรณ์ทางด้านปิโตรเคมี และสำหรับใช้งานด้านอื่นๆที่วัสดุต้องทนต่ออุณหภูมิสูง เป็นต้น

งานพวกเครื่องยนต์กังหันก๊าซ (Gas Turbine Engine) นิยมใช้โลหะผสมพิเศษมาผลิตเป็นชิ้นส่วนต่างๆมากมายเช่นกัน เนื่องด้วยเครื่องยนต์กังหันก๊าซมีการใช้งานที่อุณหภูมิสูง จึงต้องการวัสดุที่มีความสามารถในการรับแรงสูง, ต้านทานการเกิดความล้า และต้านทานการเกิดการคืบได้ดี อีกทั้งยังมีสมบัติต้านทานการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูงอีกด้วย ดังนั้นประโยชน์จากการใช้งานโลหะผสมพิเศษจึงถูกนำมาใช้งานเป็นชิ้นส่วนหลักของเครื่องยนต์กังหันก๊าซซึ่งทำงานที่อุณหภูมิสูงกว่า 550 องศาเซลเซียส และอาจสูงถึง 1,200 องศาเซลเซียส โดยเฉพาะชิ้นส่วนใบพัดกังหันก๊าซ (Turbine Blades)

โดยทั่วไปโลหะผสมพิเศษส่วนมากจะมีส่วนผสมของธาตุนิกเกิล, โครเมียม, โคบอลต์, โมลิบดีนัม, เหล็ก, คาร์บอน และโบรอน เป็นต้น ยังมีส่วนผสมของนิกเกิล หรือโคบอลต์ในปริมาณที่สูงกว่าธาตุอื่นๆจะช่วยให้โลหะผสมพิเศษนั้นสามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ดี และมีความแข็งแรงสูงอีกด้วย

#### 2.2 ชนิดของโลหะผสมพิเศษ

ชนิดของโลหะผสมพิเศษสามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่มหลักๆ[1-3] ดังนี้

##### 2.2.1 โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล

โลหะผสมพิเศษกลุ่มนี้มีนิกเกิลเป็นส่วนผสมทางเคมีหลัก และมีการเติมธาตุอื่นๆลงไปอีกหลายธาตุ โดยธาตุที่สำคัญคือ โครเมียมซึ่งจะเติมประมาณ 20% โดยน้ำหนัก โครเมียมจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงเนื่องจากการเกิดสารละลายของแข็ง (Solid Solution Strengthening), ไทเทเนียมและอลูมิเนียมเติมประมาณ 2.25% และ 1% โดยน้ำหนักตามลำดับจะทำให้เกิด  $Ni_3(Al,Ti)$  หรือที่เรียกกันว่า “แกมมาไพร์ม” ซึ่งช่วยเพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง และต้านทานการเกิดออกซิเดชัน นอกจากนี้ยังมีธาตุตัวอื่นอีกเช่น โมลิบดีนัม, โคบอลต์, ไนโอเบียม, เซอร์โคเนียม, โบรอน, เหล็ก และ

ธาตุอื่นๆอีก โดยผสมเพื่อปรับปรุงสมบัติของโลหะผสมพิเศษ และในปัจจุบันโลหะผสมพิเศษกลุ่มนี้มีการใช้งานมากที่สุด ส่วนใหญ่มักพบในอุตสาหกรรมเครื่องบิน อุตสาหกรรมการผลิตเครื่องกังหันก๊าซสำหรับเครื่องบินไอพ่นและสำหรับโรงไฟฟ้า อุปกรณ์ทางนิวเคลียร์ เครื่องมือในงานอุตสาหกรรมทางปิโตรเคมี และงานอื่นๆ

### 2.2.2 โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล-เหล็ก

โลหะผสมพิเศษกลุ่มนี้มีส่วนผสมทางเคมีหลักคือ นิกเกิล 25-60% และเหล็ก 15-60% โดยน้ำหนัก ข้อดีของโลหะผสมพิเศษกลุ่มนี้คือ มีราคาถูกกว่ากลุ่มอื่น เนื่องจากการนำเหล็กมาแทนนิกเกิลบางส่วน แต่มีข้อด้อยคือ ความสามารถในการใช้งานที่อุณหภูมิสูงไม่เทียบเท่ากับกลุ่มโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล-เหล็กเช่น A-286, V-57 ใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงเพียง 650 องศาเซลเซียส และ Pyromet 860 สามารถใช้งานที่อุณหภูมิได้สูงสุดเพียง 815 องศาเซลเซียส เนื่องจากปริมาณของธาตุนิกเกิลลดลง ความแข็งแรงจะได้รับการเติมธาตุต่างๆลงไปเช่น ไทเทเนียม, อะลูมิเนียม และไนโอเบียม จึงทำให้สามารถเพิ่มความแข็งแรงได้โดยกระบวนการบ่มแข็ง (Precipitation Hardening) โดยการเติมธาตุโครเมียมประมาณ 15-28% โดยน้ำหนักจะช่วยเพิ่มการต้านทานการกัดกร่อน ส่วนการเติมธาตุโมลิบดีนัมประมาณ 1-6% โดยน้ำหนักจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงจากการเกิดสารละลายของแข็ง

### 2.2.3 โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นโคบอลต์

โลหะผสมพิเศษกลุ่มนี้มีส่วนผสมทางเคมีหลักคือ โคบอลต์ และโครเมียมอย่างน้อย 50% และ 25% โดยน้ำหนักตามลำดับ โครงสร้างทางจุลภาคของโลหะผสมเนื้อพื้นโคบอลต์ประกอบด้วยโครงสร้างพื้นเป็นเฟสเซ็นเตอร์คิวบิก (Face Centered Cubic, FCC) และมีคาร์ไบด์ชนิดต่างๆ ความแข็งแรงของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นโคบอลต์ได้จากสารละลายของแข็ง และคาร์ไบด์ โดยสมบัติเด่นของโลหะผสมพิเศษกลุ่มนี้คือ ต้านทานการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูงได้ดีมาก โลหะผสมพิเศษกลุ่มนี้เหมาะสำหรับงานทำชิ้นส่วนที่ไม่มีหรือมีการเคลื่อนที่ หรือไม่มีการเคลื่อนที่ไหวต่างๆเนื่องจากโคบอลต์มีน้ำหนักเยอะทำให้ชิ้นงานเกิดการคืบได้ง่าย

## 2.3 สมบัติต่างๆของโลหะผสมพิเศษ

สมบัติต่างๆของโลหะผสมพิเศษ[1, 2] มีสมบัติหลักๆดังนี้

### 2.3.1 สมบัติทางกล

โลหะผสมพิเศษส่วนใหญ่มีโครงสร้างแบบเฟสเซ็นเตอร์คิวบิก ซึ่งมีความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง อีกทั้งมีความต้านทานการคืบด้วย นอกจากนี้ยังมีความยืดหยุ่น (Ductility) และความต้านทานต่อแรงกระทำที่ดี รวมถึงมีความสามารถต้านทานความล้าที่รอบต่ำ, รอบสูง และความล้าที่เกิดจากอุณหภูมิสูงได้ดี นอกจากนี้มีความสามารถในการละลายธาตุอื่นๆที่ผสมลงไปได้ดี อีกทั้งมี



ความสามารถในการควบคุมการตกตะกอนเช่น แกมมาไพร์ม และแกมมาดับเบิลไพร์มเพื่อสร้างความแข็งแรง

ความแข็งแรงของโลหะผสมพิเศษสามารถเกิดได้จาก

1. การตกตะกอนของแกมมาไพร์ม และแกมมาดับเบิลไพร์มโดยหลักๆเกิดจากการเติมธาตุอะลูมิเนียม และไทเทเนียม
2. สารละลายของแข็งเกิดจากการเติมธาตุต่างๆโดยมีขนาดอะตอมที่แตกต่างกันกับอะตอมของนิกเกิล เช่น โครเมียม, อะลูมิเนียม และไทเทเนียม เป็นต้น
3. การตกตะกอนของคาร์ไบด์ เกิดทั้งในขอบเกรน และบริเวณขอบเกรนโดยเฉพาะในโลหะผสมพิเศษที่ได้จากการหล่อ และการรีด

## 2.3.2 ลักษณะทางกายภาพ

### 2.3.2.1 ความหนาแน่น

โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล-เหล็กมีความหนาแน่นต่ำที่สุดในกลุ่มโลหะผสมพิเศษเนื่องจากเหล็กมีความหนาแน่นต่ำกว่านิกเกิล และโคบอลต์ สำหรับโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล ความหนาแน่นสามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยขึ้นอยู่กับปริมาณธาตุที่ผสม

### 2.3.2.2 การขยายตัวจากความร้อน

โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล และโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นโคบอลต์มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนที่ใกล้เคียงกัน และมีค่าต่ำกว่าโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล-เหล็ก

### 2.3.2.3 การนำความร้อน

การใช้งานโดยส่วนใหญ่ของโลหะผสมพิเศษถูกใช้ในงานที่มีอุณหภูมิสูง ดังนั้นการนำความร้อนจึงเป็นสิ่งที่จะต้องพิจารณาเพื่อที่จะสามารถถ่ายเทความร้อนออกไปได้ เพื่อให้ผลต่างระหว่างอุณหภูมิน้อยที่สุด และเพื่อลดการเกิดความเค้นจากอุณหภูมิ และแนวโน้มของการแตกหักเนื่องจากความล้าที่อุณหภูมิสูง

### 2.3.2.4 ความไม่เสถียรของเฟส

เฟสที่ปรากฏอยู่ในโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมพิเศษก่อนการใช้งานไม่ได้อยู่ในสภาวะสมดุล และเมื่อผ่านการใช้งานที่อุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลาอันยาวนานมีแนวโน้มที่เปลี่ยนเข้าสู่สมดุล ดังนั้นการใช้งานของโลหะผสมพิเศษจึงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และเวลาในการใช้งาน ในทางกลับกันเฟสที่ไม่เสถียรจะทำให้เกิดเฟสที่ไม่ต้องการขึ้นมาในโครงสร้างได้ สำหรับโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลนั้นมีข้อได้เปรียบมากกว่าโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นอื่นๆ เพราะมีความสามารถที่จะเติมธาตุผสมได้มาก โดยที่ไม่ก่อให้เกิดเฟสอันตรายที่ส่งผลเสียต่อสมบัติอื่นๆ

### 2.3.2.5 ความเสถียรของพื้นผิว

#### 1) การเกิดออกซิเดชัน (Oxidation)

เป็นปฏิกิริยาของโลหะผสมกับก๊าซออกซิเจนในระหว่างการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่สะอาดปราศจากสิ่งเจือปน เช่น ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ หรือวาเนเดียม โดยทั่วไปโลหะผสมนิกเกิล - โครเมียมที่ผสมอะลูมิเนียมสูงเช่น IN-713C และ B4900 จะมีความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชันที่ดีเยี่ยม เนื่องจากมีความสามารถเกิดออกไซด์แบบ  $Cr_2O_3$  และ  $Al_2O_3$  ได้ดีเยี่ยม และโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลยังมีความต้านทานการเกิดออกซิเดชันสูงกว่าโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นโคบอลต์อีกด้วย

#### 2) การกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูง (Hot Corrosion)

การกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูงเป็นผลมาจากการเกิดออกซิเดชันทำปฏิกิริยากับซัลเฟอร์และธาตุเจือปนอื่นๆที่อยู่ในอากาศหรือเชื้อเพลิง ความต้านทานต่อการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูงขึ้นอยู่กับปริมาณโครเมียม สำหรับโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นโคบอลต์ส่วนใหญ่จะมีโครเมียมมากกว่าโลหะผสมพิเศษอื่นๆเนื่องจากต้องการความต้านทานการกัดกร่อนสูงทำให้โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นโคบอลต์จะต้านทานต่อการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูงดีกว่าโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล

### 2.4 ธาตุผสมของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล

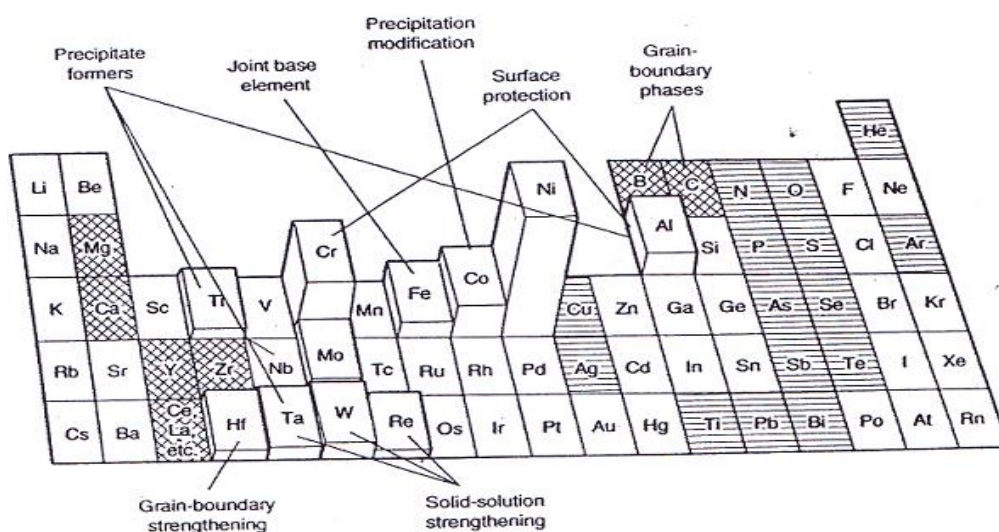
หน้าที่ของธาตุต่างๆ ในโลหะผสมเนื้อพื้นนิกเกิลสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มหลักๆ[1-3] (ดังแสดงดังรูปที่ 2.1) ได้ดังนี้

1) กลุ่มที่เป็นเนื้อพื้นโลหะประกอบไปด้วย นิกเกิล, โคบอลต์, เหล็ก, โครเมียม, โมลิบดีนัม, ทังสแตน และวานาเดียม

2) กลุ่มที่ทำให้เกิดการตกตะกอนประกอบไปด้วย อะลูมิเนียม, ไทเทเนียม, ไนโอเบียม และแทนทาลัม

3) กลุ่มที่เกิดการแยกตัวตามขอบเกรนประกอบไปด้วย แมกนีเซียม, โบรอน, เซอร์โคเนียม และคาร์บอน

โดยแต่ละธาตุมีหน้าที่ในการเพิ่มสมบัติต่างๆของโลหะผสมพิเศษโดยสรุปดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ธาตุต่างๆที่มีผลต่อโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้เหล็ก [3]

ตารางที่ 2.1 หน้าที่ของธาตุต่างๆที่ช่วยปรับปรุงสมบัติต่างๆของโลหะผสมพิเศษ [1]

ผลของการเติมธาตุ	ธาตุที่เติม
เพิ่มความแข็งแรงโดยกลไกการละลายของแข็ง	Co, Cr, Fe, Mo, W, Ta
เกิดเป็นคาร์ไบด์ :	
คาร์ไบด์ชนิด MC	W, Ta, Ti, Mo, Nb
คาร์ไบด์ชนิด $M_7C_3$	Cr
คาร์ไบด์ชนิด $M_{23}C_6$	Cr, Mo, W
คาร์ไบด์ชนิด $M_6C$	Mo, W
เกิดเป็น Carbonitride ชนิด M(CN)	C, N
ความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน	Al, Cr
ปรับปรุงสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูง	La, Th
ความต้านทานต่อปฏิกิริยาซัลไฟต์	Cr
Creep property improvement	B
Rupture strength improvement	B
Causes grain boundary segregation	B, Cr, Zr

ธาตุต่างๆมีบทบาทในโลหะผสมพิเศษ[1] ดังนี้

#### 2.4.1 นิกเกิล (Nickel, Ni)

เป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างเนื้อพื้นแบบอสเทนไนต์ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ทนความร้อน ช่วยให้เกิดการละลายของสารละลายแบบของแข็ง และลดการเกิดเฟสที่อันตราย (Detrimental Phases) ต่อโครงสร้าง

#### 2.4.2 โครเมียม (Chromium, Cr)

ช่วยเพิ่มความต้านทานการเกิดออกซิเดชัน และการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูง โดยจะทำให้เกิดฟิล์มออกไซด์ (Protective Oxide Layer,  $Cr_2O_3$ ) ขึ้นเพื่อป้องกันช่วยเพิ่มความต้านทานการเกิดออกซิเดชัน และการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูงนั่นเอง นอกจากนี้ยังทำให้เกิดกลไกการเพิ่มความแข็งแรงแบบสารละลายของแข็งซึ่งทำให้โลหะผสมพิเศษมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น รวมถึงทำให้เกิดคาร์ไบด์ที่ขอบเกรนโดยเกิดขึ้นในรูป  $M_{23}C_6$  ซึ่งช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้มากขึ้น แต่ถ้ามีมากเกินไปจะลดอุณหภูมิการหลอมละลายของแกมมาไพร์ม ( $\gamma'$ - Solvus Temperature)

#### 2.4.3 อลูมิเนียม (Aluminum, Al)

เพิ่มความต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูง โดยเกิดเป็นฟิล์มออกไซด์ (Protective Oxide Layer,  $Al_2O_3$ ) เกิดการตกตะกอนเป็นแกมมาไพร์ม (Ni,(Al,Ti)) ทำให้มีความแข็งแรงมากขึ้น แต่ถ้าเติมอลูมิเนียมมากเกินไปจะเกิดการแยกตัวในพื้น หรือขอบเกรนทำให้ความสามารถในการขึ้นรูปลดลง

#### 2.4.4 โมลิบดีนัม (Molybdenum, Mo)

ทำให้เกิดการละลายของสารละลายแบบของแข็ง และทำให้เกิดคาร์ไบด์ในรูป  $M_6C$  ที่ขอบเกรนซึ่งทำให้ความแข็งแรงของโลหะผสมพิเศษมากขึ้น และช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูง หากมีมากเกินไปจะทำให้เกิดการตกตะกอนของคาร์ไบด์มากเกินไปซึ่งทำให้ความสามารถในการขึ้นรูปน้อยลง

#### 2.4.5 โคบอลต์ (Cobalt, Co)

ช่วยเพิ่มอุณหภูมิการหลอมละลายของแกมมาไพร์ม, ปรับปรุงความสามารถในการใช้งานที่อุณหภูมิสูง และลดสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน

#### 2.4.6 ทังสเตน (Tungsten, W)

ทำให้เกิดการละลายของสารละลายของแข็ง และคาร์ไบด์ของทังสเตนซึ่งมีความเสถียรที่อุณหภูมิสูงช่วยเพิ่มความแข็งแรง

#### 2.4.7 คาร์บอน (Carbon, C)

เป็นส่วนประกอบของคาร์ไบด์โดยจับตัวกับ Cr, Mo, W, V, Nb, Ta และ Ti เป็น MC,  $M_{23}C_6$ ,  $M_6C$  และ  $M_7C_3$  ซึ่งจะใส่ในปริมาณต่ำระหว่างร้อยละ 0.05 - 0.2 โดยน้ำหนัก

#### 2.4.8 ไทเทเนียม (Titanium, Ti)

เพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูง และสามารถรวมกับ C ในรูป MC เป็น TiC ซึ่งเป็นเฟสที่เสถียร และแข็งแรง นอกจากนั้นยังมีแนวโน้มที่จะจับกับไนโตรเจนเป็นไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) แต่ถ้ามีมากเกินไปจะทำให้การขึ้นรูปร้อนทำได้ยาก และเกิดการแยกตัวในเนื้อพื้น หรือบริเวณขอบเกรน

#### 2.4.9 โบรอน (Boron, B)

ช่วยลดการแพร่ที่บริเวณขอบเกรน และเกิดเป็นสารประกอบโบไรด์ซึ่งช่วยเพิ่มความเหนียวของชิ้นงาน อีกทั้งยังช่วยเพิ่มอายุการใช้งาน (Rupture Life)

#### 2.4.10 เหล็ก (Ferrous, Fe)

ทำให้เนื้อพื้นร่วมกับนิกเกิลเป็นเฟสเซ็นเตอร์คิวบิกออสเทนไนต์ และช่วยเพิ่มความหนาแน่น

### 2.5 โครงสร้างจุลภาคและเฟสของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล

โครงสร้างจุลภาคและเฟสของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล[1, 3] มีส่วนประกอบดังนี้

#### 2.5.1 เนื้อพื้นแกมมา ( $\gamma$ )

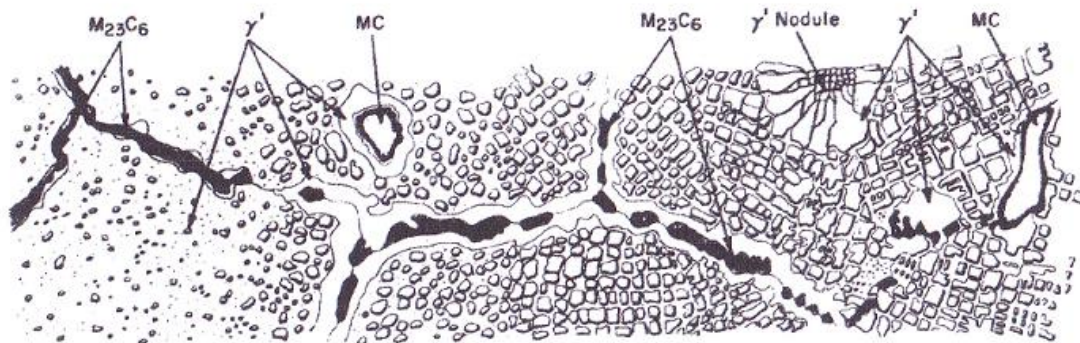
เป็นโครงสร้างเนื้อพื้นซึ่งมีโครงสร้างแบบเฟสเซ็นเตอร์คิวบิก หรือออสเทนไนต์ สามารถเกิดสารละลายของแข็งโดยเติมธาตุเช่น โคบอลต์ เหล็ก โครเมียม โมลิบดีนัม และทังสเตนซึ่งช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้มากขึ้น

#### 2.5.2 แกมมาไพร์ม ( $\gamma'$ )

มีโครงสร้างผลึกเป็นเฟสเซ็นเตอร์คิวบิก โดยมีสูตรเป็น  $A_3B$  มักเกิดจากการรวมตัวกันของอลูมิเนียม และไทเทเนียมโดยทำปฏิกิริยากับนิกเกิลเกิดการตกตะกอนของสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic Phase) ซึ่งคือ  $Ni_3(Al,Ti)$  หรือที่เรียกกันว่า “แกมมาไพร์ม” ลงบนเนื้อพื้น

#### 2.5.3 คาร์ไบด์

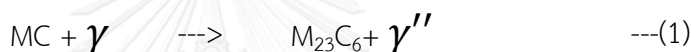
จะกระจายอยู่ตามขอบเกรน และอยู่สม่ำเสมอภายในเกรน การวิเคราะห์ทางเคมีของ คาร์ไบด์ชี้ให้เห็นว่า ภายในเกรนจะมีคาร์ไบด์ประเภท MC เป็นหลัก ซึ่ง M แทนด้วย ไทเทเนียม, ทังสเตน และแทนทาลัม (Ta) คาร์ไบด์ที่พบบริเวณขอบเกรนจะเป็นประเภท  $M_{23}C_6$  ซึ่ง M แทนด้วยโครเมียม และโมลิบดีนัม ภายในเกรนเราสามารถเห็นคาร์ไบด์เป็นจุดสีดำ จากการวิเคราะห์ทางเคมีแสดงให้เห็นว่าอนุภาคออกไซด์, ไนไตรต์ หรือคาร์โบไนไตรต์เป็นตำแหน่งเกิดนิวเคลียสของคาร์ไบด์ ขอบเกรนที่เป็นรูปร่างพื้นปลาช่วยป้องกันการเคลื่อนตัวของขอบเกรน และช่วยเพิ่มการต้านทานการคืบได้



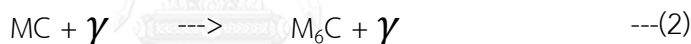
รูปที่ 2.2 ลักษณะของคาร์ไบด์ของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล [1]

โดยปฏิกิริยาการเกิดคาร์ไบด์เกิดได้ทั้งในกรรมวิธีทางความร้อน และระหว่างการใช้งานซึ่งคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นมีดังนี้

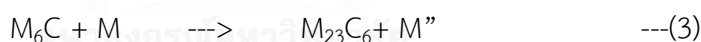
- คาร์ไบด์  $M_{23}C_6$



- คาร์ไบด์  $M_6C$



- คาร์ไบด์  $M_6C$  และคาร์ไบด์  $M_{23}C_6$  สามารถเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับไปมาซึ่งกันและกันได้



## 2.6 สมบัติทั่วไปของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล

โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล[1-3] มีสมบัติเด่นในหลายๆด้านเช่น มีความเสถียรที่อุณหภูมิสูง, ต้านทานการเกิดออกซิเดชัน และการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูง, มีความแข็งแรงสูง, มีการหดขยายตัวทางความร้อนต่ำ, นำความร้อนได้ดี และเป็นเนื้อพื้นที่ดีในการเติมธาตุผสมเนื่องจากเกิดเฟสอันตรายต่อโครงสร้างน้อย

## 2.7 สมบัติทั่วไปของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรดยูติเมท 520

โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรดยูติเมท 520[4] เป็นโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลที่มีปริมาณแกมมาไพร์มต่ำซึ่งนิยมนำมาใช้ในการทำชิ้นส่วนกังหันแก๊ส และโบลท์ในงานด้านอุตสาหกรรม และงานที่ใช้สัมผัสน้ำทะเล โดยมีสมบัติทั่วไปตามตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมบัติทั่วไปของโลหะผสมพิเศษเกรดยูดีเมท 520 [5]

ความหนาแน่น	8.21 g/cm <sup>3</sup>
จุดหลอมเหลว	1371 °C
แรงต้านทานการดึง (@ 950 °C)	350 MPa
ค่าความเค้น (@ Strain 0.200%, 850 °C)	500 MPa
ค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวก่อนขาด (@ 50 °C)	100 %

## 2.8 กรรมวิธีทางความร้อนสำหรับโลหะผสมพิเศษเพื่อฟื้นฟูโครงสร้างจุลภาค

กรรมวิธีทางความร้อนสำหรับโลหะผสมพิเศษเพื่อฟื้นฟูโครงสร้างจุลภาค[1,6] สำหรับโลหะผสมพิเศษประกอบด้วยกรรมวิธีหลักๆดังนี้

### 2.8.1 การทำละลาย (Solution Treatment)

กรรมวิธีทางความร้อนสำหรับโลหะผสมพิเศษที่ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจากการตกตะกอนของเฟสที่สอง อุดหนุนในการทำละลายขึ้นอยู่กับสมบัติต่างๆที่ต้องการ โดยการใช้อุณหภูมิการทำละลายที่สูงจะทำให้มีความต้านทานต่อการเกิดความเสียหายจากการคืบคืบขึ้น และอุณหภูมิการทำละลายที่ต่ำจะทำให้มีความต้านทานต่อแรงดึงในช่วงเวลาสั้นๆขณะที่ใช้งานที่อุณหภูมิสูงดี โลหะผสมพิเศษที่ขึ้นรูปโดยการรีดการใช้อุณหภูมิการทำละลายที่สูงอาจทำให้เกิดการไต่ และเกิดการละลายของคาร์ไบด์ที่มากขึ้น

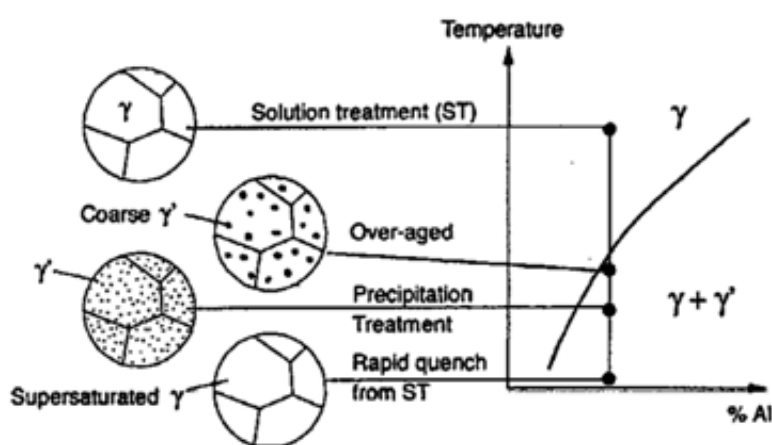
### 2.8.2 การบ่มแข็งเพื่อให้เกิดการตกตะกอน (Precipitate Aging Treatment)

กระบวนการบ่มแข็งทำให้โลหะผสมพิเศษแข็งแรงขึ้นโดยการตกตะกอนของเฟสหนึ่ง หรือหลายเฟสคือ เฟส  $\gamma'$  และ  $\gamma''$  จากโครงสร้างเนื้อพื้นที่อิ่มตัวยิ่งยวด (supersaturated matrix) ซึ่งได้จากกรรมวิธีการทำการละลาย และทำให้เนื้อพื้นที่อิ่มตัวยิ่งยวดคงอยู่โดยการทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วจากอุณหภูมิการทำละลาย กระบวนการบ่มแข็งใช้อุณหภูมิคงที่ซึ่งจะอยู่ในช่วงอุณหภูมิค่า 620 ถึง 1,038 องศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิการบ่มแข็งมีผลต่อการกระจายขนาด (size distribution) และชนิดของเฟสที่ตกตะกอน สำหรับโลหะผสมที่ผ่านการรีด (wrought alloy) โดยทั่วไปจะทำกระบวนการบ่มแข็งเพื่อให้เกิดการตกตะกอนแบบหลายชั้นตอนซึ่งต่างจากโลหะหล่อ (cast alloy)

การทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิเดียวอาจทำให้ได้ปริมาณเฟสที่ตกตะกอนในปริมาณที่เหมาะสมซึ่งอาจหลากหลาย และมีมากกว่าหนึ่งเฟสที่ตกตะกอนจากโครงสร้างพื้น ในขณะทำการบ่มแข็งสองชั้นตอนจะทำให้ได้ขนาด และชนิดที่แตกต่างของเฟสที่ตกตะกอนที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน ซึ่งหลักการในการทำการบ่มแข็งสองชั้นตอนนอกจากการคุม  $\gamma'$  หรือ  $\gamma''$  ที่ต้องการให้เกิดการตกตะกอนแล้ว ยังต้องการควบคุมลักษณะการเกิดคาร์ไบด์ที่ขอบเกรนได้อีกด้วย

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเลือกจำนวนขั้นตอนการบ่มแข็ง, เวลา และอุณหภูมิในการตกตะกอน มีดังนี้

- ชนิด และจำนวนของเฟสที่ตกตะกอนที่ต้องการ
- อุณหภูมิการใช้งานที่ต้องการนำชิ้นงานไปใช้งาน
- ขนาดของเฟสที่ตกตะกอนที่ต้องการ
- ความแข็งแรง และความเหนียวที่ต้องการ
- กระบวนการทางความร้อนของโลหะที่คล้ายๆกัน



รูปที่ 2.3 หลักการในการบ่มแข็งให้เกิดการตกตะกอนของอนุภาคแกมมาไพร์ม [1]

กรรมวิธีทางความร้อนเพื่อฟื้นฟูโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการใช้งานมาเป็นระยะเวลาอันยาวนานดังรูปที่ 2.3 ทำโดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงเพื่อละลายเฟสแกมมาไพร์มที่มีอยู่ในโครงสร้างจุลภาค หลังจากนั้นทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว แล้วค่อยทำการบ่มแข็งเพื่อให้เฟสแกมมาไพร์มตกตะกอนมาอีกครั้งหนึ่งอย่างสม่ำเสมอ อย่างไรก็ตามอุณหภูมิของการทำการบ่มแข็งต้องเหมาะสม ถ้าสูงเกินไปอนุภาคที่ตกตะกอนออกมาจะมีลักษณะหยาบ กระจายตัวไม่สม่ำเสมอ และมีปริมาณที่น้อยได้

### 2.8.3 การจุ่มชุบ (Quenching)

มีวัตถุประสงค์เพื่อให้โลหะผสมพิเศษยังคงสถานะสารละลายของแข็งที่อิ่มตัวยิ่งยวดที่ได้จากการทำละลายของเฟสที่ตกตะกอนเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้คงอยู่ที่อุณหภูมิต่ำ โดยการจุ่มลงในน้ำมัน หรือน้ำ หรืออาจจะปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ หรือในสภาวะของก๊าซเฉื่อย การจุ่มชุบทำให้เกิดอนุภาคแกมมาไพร์มละเอียดเหมาะสมสำหรับการบ่มแข็งในภายหลัง หลักการที่สำคัญในการจุ่มชุบคือรักษาธาตุที่ให้ความแข็งแรง (hardening element) เช่น อลูมิเนียม, ไทเทเนียม และไนโอเบียมให้คงอยู่ในสารละลายมากเท่าที่จะยอมให้มี โดยขนาดและการกระจายตัวของเฟสแกมมาไพร์ม และแกมมา



ไพร์มดับเบิลไพร์มที่เหมาะสมควบคุมได้ในกรรมวิธีการทำการบ่มแข็งเพื่อให้เกิดการตกตะกอน แต่โลหะที่ทำให้เกิดสารละลายของแข็ง และคาร์ไบด์เพื่อเพิ่มความแข็งแรงจะไม่ทำการจุ่มชุบเพราะผลจากความเค้นภายใน (internal stress)

กรรมวิธีทางความร้อนเพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลเกรดยูติเมท 520 นิยมทำโดยการนำชิ้นงานเผาที่อุณหภูมิ 1,121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เมื่อครบ 4 ชั่วโมง นำชิ้นงานออกมาจากเตาเผาปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ และทำการบ่มแข็ง 2 ขั้นตอน โดยบ่มแข็งขั้นแรกที่อุณหภูมิ 843 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในอากาศ บ่มแข็งขั้นที่สองที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในอากาศ

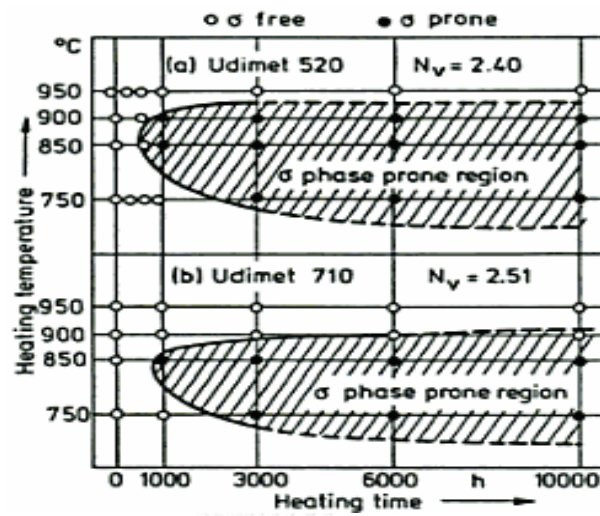
## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โลหะผสมพิเศษเกรดยูติเมท 520[4] เป็นโลหะผสมพิเศษที่โครงสร้างมีการตกตะกอนของเฟสเพื่อเพิ่มความแข็งแรงโดยโลหะผสมพิเศษเกรดยูติเมท 520 ที่มีส่วนผสมดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมพิเศษยูติเมท 520 [4]

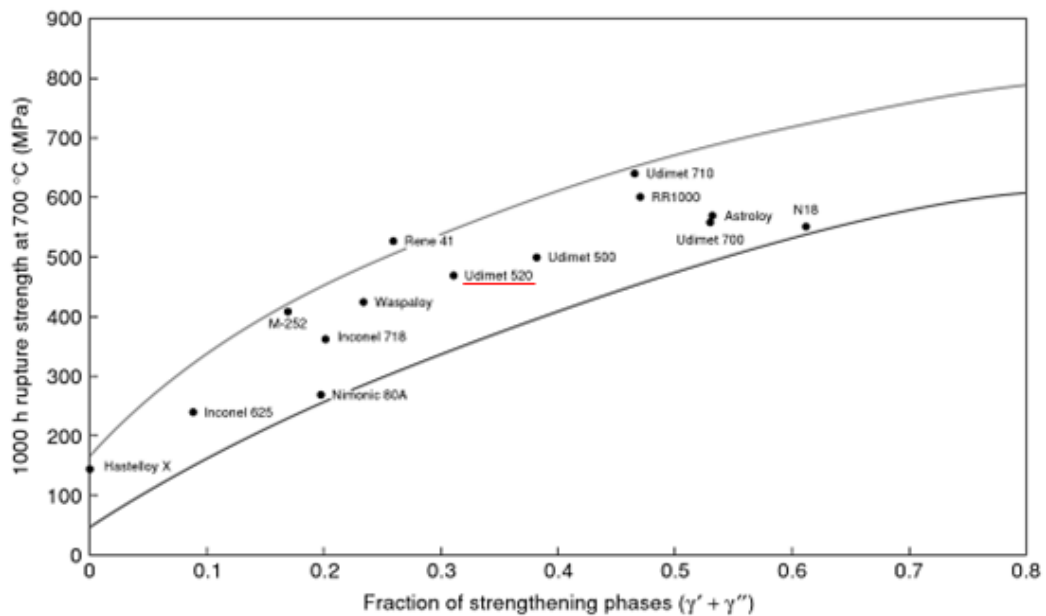
ส่วนผสมทางเคมี, เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก								
Cr	C	Co	Mo	W	Ti	Al	B	Ni
18.8	0.03	11.8	6.0	0.9	2.9	2.1	0.02	Bal

อีกทั้งโลหะผสมพิเศษเกรดยูติเมท 520 เมื่อนำไปใช้งานที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานนั้นจากความสัมพันธ์ระหว่างเวลา และอุณหภูมิมีแนวโน้มก่อให้เกิดเฟสซิกมาได้ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งในการทดลองครั้งนี้มีการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส รวมเป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง ซึ่งจากรูปที่ 2.4 จะพบว่าสถานะที่ทำการทดลองครั้งนี้แนวโน้มที่อาจจะพบเฟสซิกมาเกิดขึ้นในโครงสร้างของชิ้นงานได้หลังการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส รวมเป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง



รูปที่ 2.4 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิของโลหะผสมพิเศษเกรดยูดีเมท 520 [4]

โลหะผสมพิเศษเกรดยูดีเมท 520 [6] มีสัดส่วนเชิงพื้นที่ทั้งหมดของแกมมาไพร์ม และแกมมาดับเบิลไพร์มอยู่ที่ประมาณ 31 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าความเค้นประลัยที่ 700 ounced เซลเซียส หลังการทดสอบ 1,000 ชั่วโมงอยู่ที่ประมาณ 460 เมกะปาสคาล ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นประลัย (Rupture strength) ที่ 700 ounced เซลเซียส หลังการทดสอบ 1,000 ชั่วโมง กับสัดส่วนเชิงพื้นที่ทั้งหมดของแกมมาไพร์ม และแกมมาดับเบิลไพร์มซึ่งเป็นเฟสเพิ่มความแข็งแรงของแต่ละวัสดุที่นำมาทำไบพัตกักหน้แก๊ส [6]

H. Kazempour-Liacy et al[7] รวมถึง Fardin Nematzadeh et al[8, 9] กล่าวว่า โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิลเกรดยูติเมท 520 เป็นเกรดที่มีปริมาณแกมมาไพร์มต่ำซึ่งนิยมนำมาใช้งานที่อุณหภูมิสูง ขั้นตอนการกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อพื้นฟูโครงสร้างจุลภาคสำหรับโลหะผสมพิเศษเกรดยูติเมท 520 ปกติทำการละลายที่อุณหภูมิ 1,121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในอากาศ และทำการบ่มแข็ง 2 ขั้นตอน ขั้นแรกทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 843 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในอากาศบ่มแข็งขั้นที่สองที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในอากาศ ในบางงานยังมีการอบคลายความเครียดต่ออีกขั้นโดยใช้อุณหภูมิ 816 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในอากาศ หลังจากกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อพื้นฟูโครงสร้างจุลภาคจะได้โครงสร้างจุลภาคที่มีเนื้อพื้นซึ่งประกอบไปด้วยนิเกิลโครเมียมและโคบอลต์ในปริมาณมาก อีกทั้งยังมีเฟสแกมมาไพร์ม ( $\text{Ni}_3(\text{Al,Ti})$ ) ซึ่งมีขนาดประมาณ 0.1 ไมครอนที่ตกตะกอนเพื่อเพิ่มความแข็งแรง รวมถึงพบคาร์ไบด์ที่มีลักษณะเป็นเส้นยาว

D. M. Moon และ F. J. Wall[10] ทำการทดสอบการแตกหักเนื่องจากความเค้นที่อุณหภูมิสูง เป็นระยะเวลาของโลหะผสมพิเศษเกรดยูติเมท 520 ตามมาตรฐาน ASTM. โดยชิ้นงานที่ใช้ทดสอบมีส่วนผสมตามตารางที่ 2.4 และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนมาตรฐานโดยการทำการละลายที่ 2050 องศาฟาเรนไฮต์ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เย็นตัวในอากาศ ตามด้วยบ่มแข็ง 2 ขั้นตอนที่ 1550 องศาฟาเรนไฮต์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เย็นตัวในอากาศ และ 1400 องศาฟาเรนไฮต์ เป็นเวลา 16 ชั่วโมง เย็นตัวในอากาศ

ตารางที่ 2.4 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมพิเศษเกรดยูติเมท 520 [10]

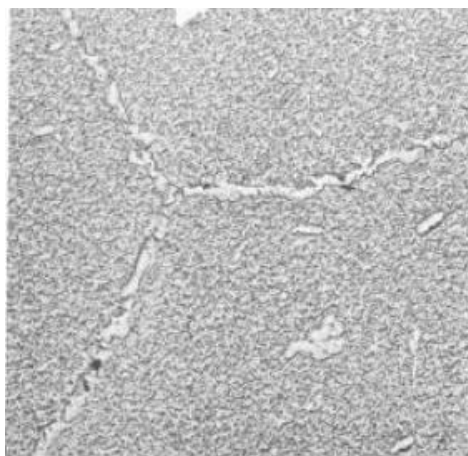
Ni	Cr	Fe	Co	Mo	W	Ti	Al	Mn	C	Si	B
Bal.	12.1	0.10	12.2	6.20	0.98	3.00	1.98	0.1	0.04	0.1	0.005

เฟสสารประกอบเชิงโลหะ  $\text{Ni}_3(\text{Al,Ti})$  หรือแกมมาไพร์มซึ่งมีลักษณะหยาบ และคาร์ไบด์ชนิด  $\text{M}_{23}\text{C}_6$  ขึ้นในโครงสร้าง โดยกลไกการโตขึ้นของแกมมาไพร์มสามารถอธิบายได้ตามสมการ

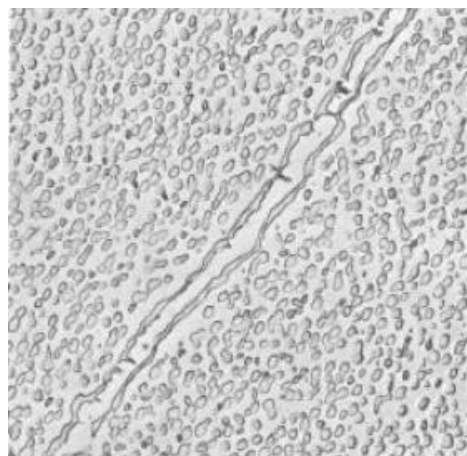
$$d = kt^{1/3}$$

$d$  = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคแกมมาไพร์ม

$k$  = ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กัอุณหภูมิ และ  $t$  = เวลา



a) ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีการทางความร้อนมาตรฐาน



b) ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีการทางความร้อนมาตรฐาน และตามด้วยการเผาที่ 1450 องศาฟาเรนไฮต์ เป็นเวลา 9,700 ชั่วโมง

**รูปที่ 2.6** การโตของอนุภาคแกมมาไพร์ม และการพัฒนาของคาร์ไบด์ตามบริเวณขอบเกรนจนกลายเป็นฟิล์มคาร์ไบด์ต่อเนื่องรอบๆชิ้นของแกมมาไพร์ม (ภาพกำลังขยาย 3,500 เท่า) [10]

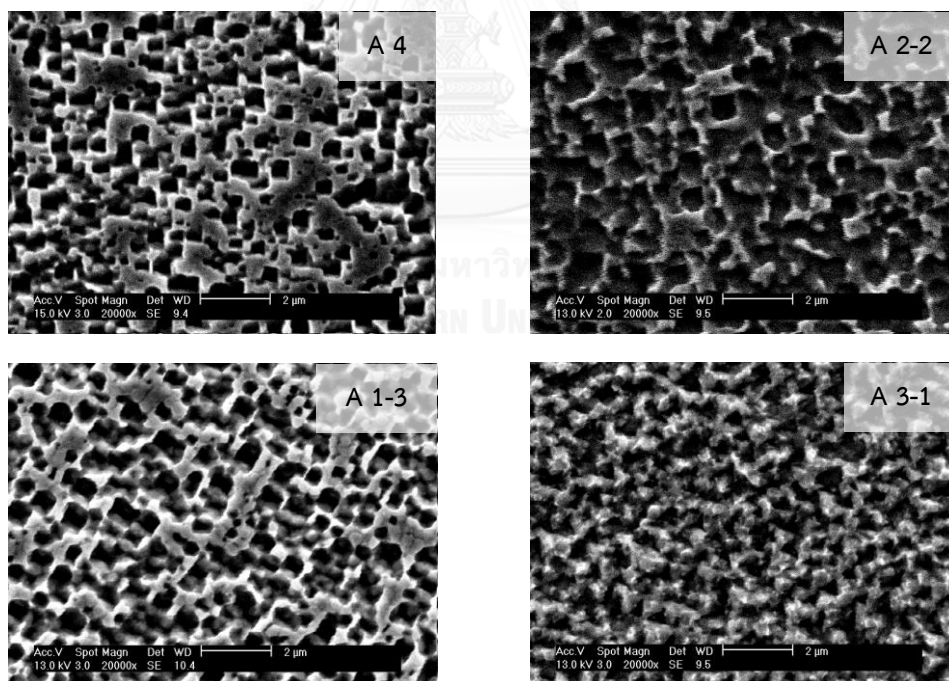
อนุภาคแกมมาไพร์มโตจาก 0.09 ไมครอน เป็น 0.38 ไมครอน หลังจากการเผาที่ 1450 องศาฟาเรนไฮต์ เป็นเวลา 9,700 ชั่วโมง และโตถึง 0.40 ไมครอน หลังเผาเป็นเวลา 15,000 ชั่วโมง โดยความเค้นส่งผลน้อยมากๆต่อกลไกการโตของแกมมาไพร์ม จากการทดสอบพบเฟสซิกมาแต่ไม่ส่งผลต่อค่าความเค้นประลัย (Rupture Strength) ของชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรดยูติเมท 520

S. Xu, J.I. Dickson และ A.K. Koul [11] ทำการศึกษาพฤติกรรมการโตของเกรน และกลไกการตกตะกอนของคาร์ไบด์ในชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรดยูติเมท 520 ผลการศึกษาพบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการทำละลายส่งผลอย่างมากต่อการโตของเกรน ยิ่งอุณหภูมิที่ใช้ในการทำละลายสูงขึ้นยิ่งทำให้ขนาดของเกรนเฉลี่ยมีขนาดใหญ่ขึ้นอย่างช้าๆ และเมื่อเวลาในการทำละลายเพิ่มขึ้นก็ส่งผลให้ขนาดของเกรนเฉลี่ยมีขนาดใหญ่ขึ้นอย่างช้าๆ อีกทั้งเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการทำละลายสูงขึ้นค่าความแข็งของชิ้นงานก็มากขึ้นตาม

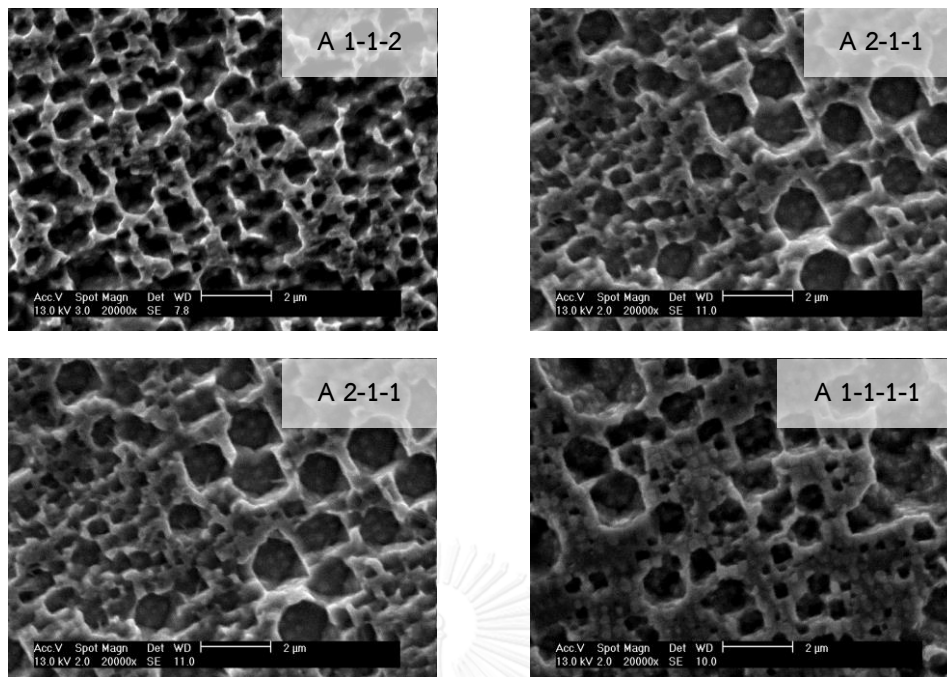
จากการศึกษาพบว่าในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรดยูติเมท 520 นั้นยังไม่ได้มีผู้วิจัยทำการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของการลดลงของอุณหภูมิระหว่างการทำละลายในกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อพื้นฟูโครงสร้างจุลภาคว่าส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคสุดท้ายอย่างไร แต่พบว่าได้มีการวิจัยในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรดอื่นๆเช่น

เอมอมร พรหมบุบผา [12] ได้ศึกษาโดยใช้โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรดอินโคเนล 738 โดยทำการละลายที่ 1,125 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 4 ชั่วโมง และบ่มแข็ง 2 ขั้นตอนโดยขั้นตอน

แรก บ่มแข็งที่อุณหภูมิ 1,055 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และบ่มแข็งขั้นที่สองที่ 845 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยมีการลดลงของอุณหภูมิระหว่างการทำละลายลงมาที่อุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียส ตามสภาวะต่างๆที่ได้กำหนดไว้เช่น กรรมวิธีทางความร้อนเพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคแบบสภาวะ 2-2 ทำโดยการนำชิ้นงานเผาที่อุณหภูมิ 1,125 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อครบ 2 ชั่วโมงทำการตัดไฟเตาเผา รอจนอุณหภูมิลดลงถึง 845 องศาเซลเซียส หลังจากอุณหภูมิลดลงถึง 845 องศาเซลเซียส แล้วทำการให้ความร้อนกลับไปเพื่อให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นกลับไปยังอุณหภูมิ 1,125 องศาเซลเซียส เผาชิ้นงานที่อุณหภูมินี้ต่อไปอีก 2 ชั่วโมง นำชิ้นงานออกมาจากเตาเผาปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ และทำการบ่มแข็ง 2 ขั้นตอนตามลำดับต่อไป โครงสร้างจุลภาคสุดท้ายที่ได้รับแสดงดังรูปที่ 2.7 พบว่าการลดลงของอุณหภูมิการทำละลายในช่วงต้นส่งผลให้อนุภาคแกมมาไพร์มมีขนาดเล็กกว่าการลดลงของอุณหภูมิจากการทำละลายในช่วงปลาย และการลดลงของอุณหภูมิจากการทำละลาย 3 ครั้ง ส่งผลให้อนุภาคแกมมาไพร์มมีขนาดโตกว่า รวมถึงโครงสร้างจุลภาคสุดท้ายที่ได้รับมีความไม่สม่ำเสมอมากกว่าการลดลงของอุณหภูมิจากการทำละลาย 2 และ 1 ครั้ง ตามลำดับ

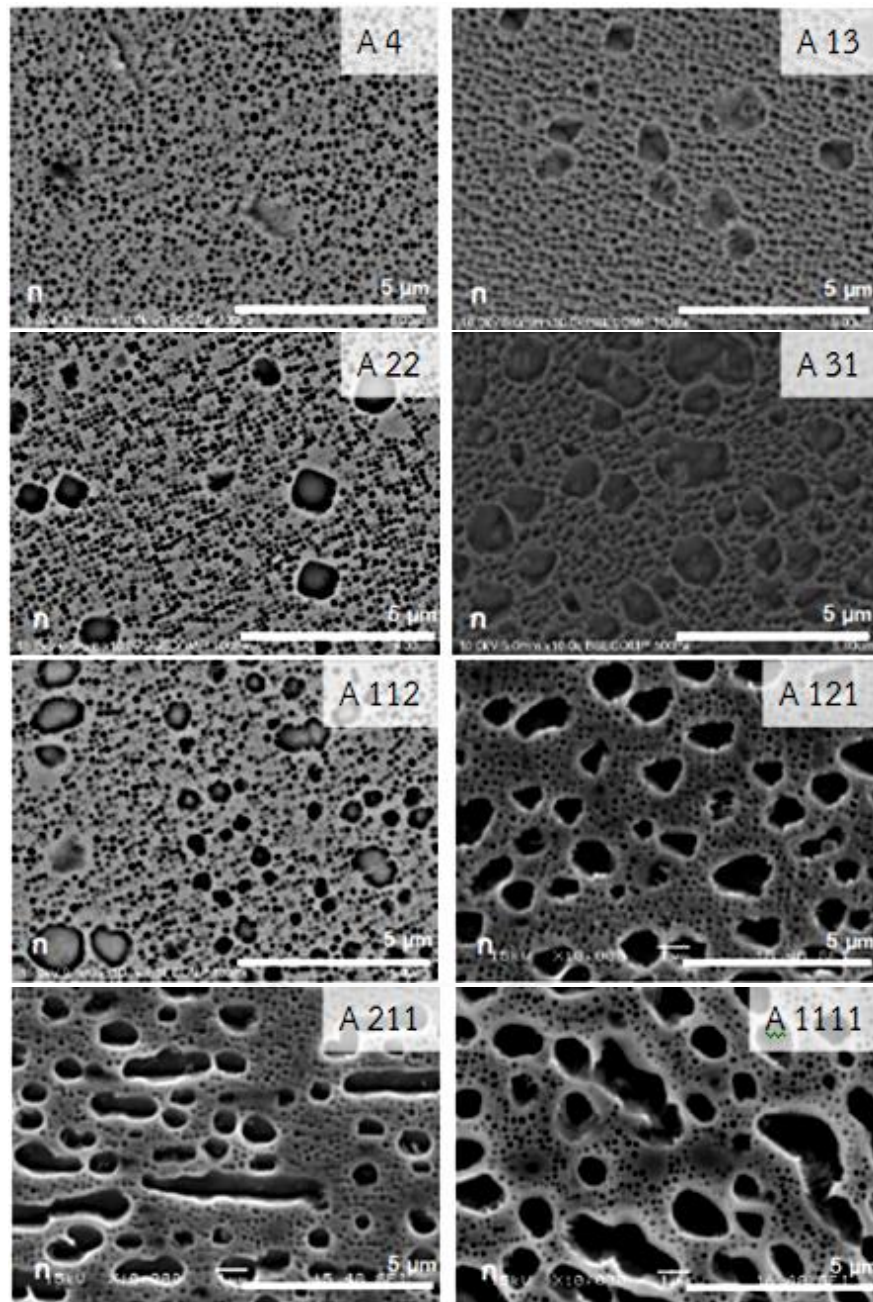


รูปที่ 2.7 โครงสร้างจุลภาคสุดท้ายของชิ้นงานอินโคเนล 738 ที่ผ่านการทดลองตามสภาวะต่างๆ [12]



รูปที่ 2.7(ต่อ) โครงสร้างจุลภาคสุดท้ายของชิ้นงานอินโคเนล 738 ที่ผ่านการทดลองตามสภาวะต่างๆ [12]

ปิยภัทร วงศ์นวปรีชาชัย[13] ได้ศึกษาโดยใช้โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิลเกรดจีทีดี 111 โดยทำการละลายที่ 1,165 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 4 ชั่วโมง และบ่มแข็ง 2 ขั้นตอนโดยขั้นตอนแรกที่ 1,055 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และบ่มแข็งขั้นที่สองที่ 845 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยมีการลดลงของอุณหภูมิระหว่างการทำละลายลงมาที่อุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียส ตามสภาวะต่างๆที่ได้กำหนดไว้เช่น กรรมวิธีทางความร้อนเพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคแบบสภาวะ 3-1 ทำโดยการนำชิ้นงานเผาที่อุณหภูมิ 1,125 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เมื่อครบ 3 ชั่วโมง ทำการตัดไฟเตาเผา รอจนอุณหภูมิลดลงถึง 845 องศาเซลเซียส หลังจากอุณหภูมิลดลงถึง 845 องศาเซลเซียส ทำการเปิดเตาเพื่อให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นกลับไปถึง 1,125 องศาเซลเซียส แล้วเผาชิ้นงานที่อุณหภูมินี้ต่อไปอีก 1 ชั่วโมง นำชิ้นงานออกมาจากเตาเผาปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ และทำการบ่มแข็ง 2 ขั้นตอนตามลำดับต่อไป



รูปที่ 2.8 โครงสร้างจุลภาคสุดท้ายของชิ้นงานจีทีดี 111 ที่ผ่านการทดลองตามสถานะต่างๆ [13]

โครงสร้างจุลภาคสุดท้ายที่ได้รับแสดงดังรูปที่ 2.8 พบเช่นเดียวกับการทดลองในโลหะผสมพิเศษเกรดอินโคเนล 738 ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ว่าการลดลงของอุณหภูมิการทำละลายในช่วงต้นส่งผลให้อนุภาคแกมมาไพร์มมีขนาดเล็กกว่าการลดลงของอุณหภูมิการทำละลายในช่วงปลาย และการลดลงของอุณหภูมิการทำละลาย 3 ครั้ง ส่งผลให้อนุภาคแกมมาไพร์มมีขนาดโตกว่า รวมถึงโครงสร้างจุลภาคสุดท้ายที่ได้รับมีความไม่สม่ำเสมอมากกว่าการลดลงของอุณหภูมิการทำละลาย 2 และ 1 ครั้งตามลำดับ



ซึ่งจากการศึกษาผลกระทบของการลดลงของอุณหภูมิระหว่างการทำละลายในกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อฟื้นฟูโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้กิลเกรตอินโคเนล 738 และจีทีดี 111 ในข้างต้นพบว่า การลดลงของอุณหภูมิระหว่างการทำละลายนั้นส่งผลอย่างมากต่อโครงสร้างจุลภาคสุดท้าย ซึ่งโครงสร้างจุลภาคสุดท้ายนั้นส่งผลอย่างมากต่อสมบัติต่างๆของชิ้นงานอีกด้วย ดังนั้นจึงได้เกิดแนวคิดที่จะศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อมีการลดลงของอุณหภูมิระหว่างกรรมวิธีการทำละลายในกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อฟื้นฟูโครงสร้างจุลภาคต่อโครงสร้างจุลภาคสุดท้ายของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้กิลเกรตยูติเมท 520 ว่า จะส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคสุดท้ายอย่างไร โดยอุณหภูมิที่ลดลงระหว่างกรรมวิธีการทำละลายที่เราจะใช้ในการศึกษามี 3 ระดับด้วยกันคือ 840, 800 และ 760 องศาเซลเซียส เนื่องจากอุณหภูมิ 840 และ 760 องศาเซลเซียสเป็นอุณหภูมิที่ใช้ในการทำการบ่มแข็ง ดังนั้นอุณหภูมิช่วงนี้น่าจะส่งผลอย่างมากต่อการตกตะกอนของเฟสแกมมาไพร์มซึ่งน่าจะทำให้การศึกษาครั้งนี้เห็นผลที่ส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคสุดท้ายเนื่องความแตกต่างของอุณหภูมิที่ลดลงมาชัดเจนมากขึ้นนั่นเอง





## บทที่ 3

### ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

#### 3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้สำหรับทำงานวิจัย

##### 3.1.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงาน

- ชิ้นงาน (โลหะผสมพิเศษชนิดเนื้อพื้นนิกเกิลเกรดยูดีเมท 520)
- เครื่องตัดชิ้นงาน Discotom

##### 3.1.2 อุปกรณ์สำหรับการเตรียมผิวชิ้นงาน

- กระดาษทราย
- เครื่องขัดผิวโลหะ
- อุปกรณ์ทำตัวเรือนแบบเย็น
- ผ้าสักหลาด
- ผงอะลูมินา
- กรดไฮโดรคลอริก (HCl)
- สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต ( $\text{CuSO}_4$ )
- เอทานอล ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ )
- น้ำกลั่น ( $\text{H}_2\text{O}$ )

##### 3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

- เต้าเผาชิ้นงาน
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope)
- กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope)
- เครื่องมือวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี (Spectroscopy)
- เครื่องมือวัดความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์

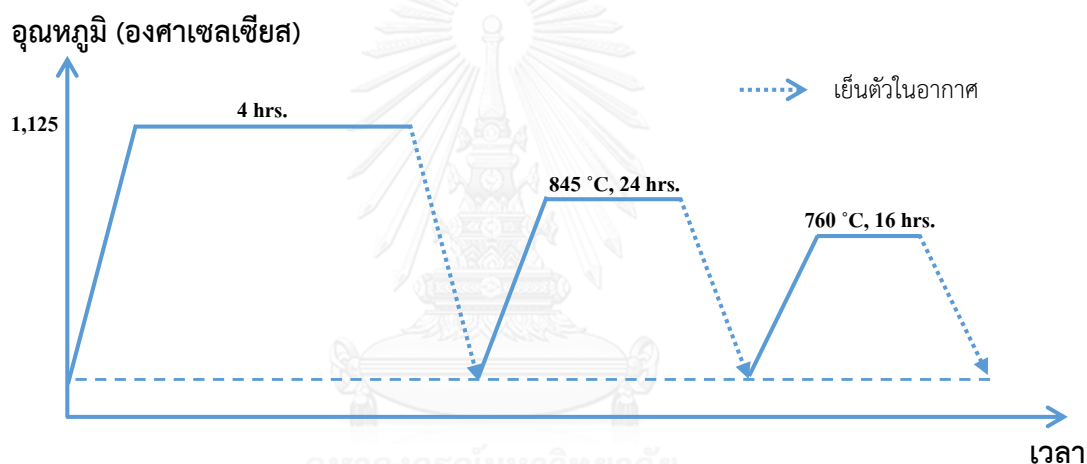
#### 3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 นำชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรดยูดีเมท 520 ซึ่งเป็นใบพัดกังหันก๊าซที่เสื่อมสภาพ นำมาตัดแบ่งเป็นชิ้นๆ โดยแต่ละชิ้นมีขนาดประมาณ  $1 \times 1 \times 1$  ลูกบาศก์เซนติเมตร ( $\text{cm}^3$ )

3.2.2 นำชิ้นงานที่ตัดแล้วไปทำการอบด้วยกรรมวิธีทางความร้อนตามสภาวะการทดลองต่างๆ โดยแบ่งออกเป็น 16 สภาวะ สภาวะละ 5 ชิ้น ซึ่งอุณหภูมิที่ลดลงในช่วงระหว่างการทำละลาย ( $T^{\circ}\text{C}$ ) มีค่าลดลงมาจนถึงอุณหภูมิที่แตกต่างกัน 3 อุณหภูมิคือ 840, 800 และ 760 องศาเซลเซียส

#### 1. กรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะมาตรฐาน (Standard heat treatment)

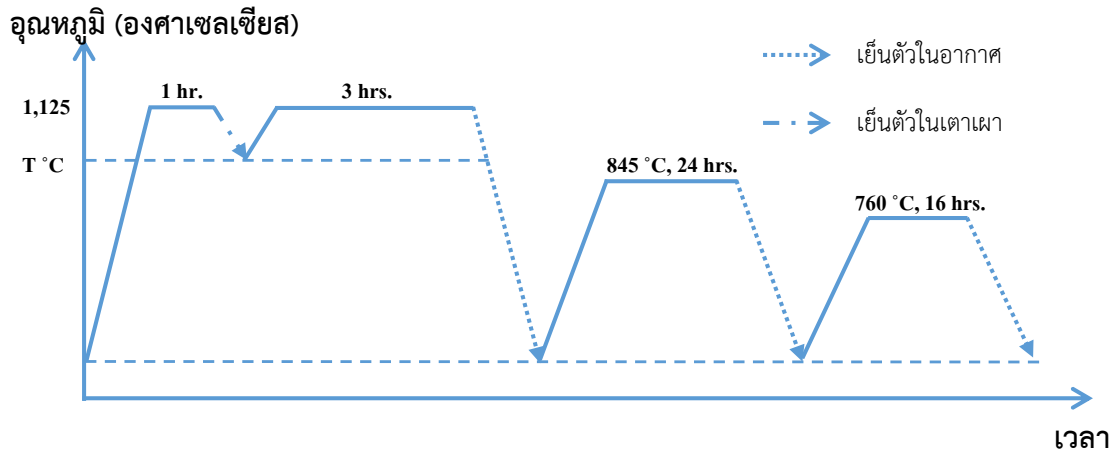
กรรมวิธีทางความร้อนเพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมพิเศษเนื้อฟีนิกเกิลเกรดยูดีเมท 520 แบบสภาวะมาตรฐานดังรูปที่ 3.1 ทำโดยการนำชิ้นงานเผาที่อุณหภูมิ 1,125 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เมื่อครบ 4 ชั่วโมง นำชิ้นงานออกมาจากเตาเผาปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ และทำการบ่มแข็ง 2 ขั้นตอน โดยบ่มแข็งขั้นแรกที่อุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในอากาศ บ่มแข็งขั้นที่สองที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในอากาศ



รูปที่ 3.1 รูปแบบกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของยูดีเมท 520 แบบสภาวะมาตรฐาน

#### 2. กรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ 1-3

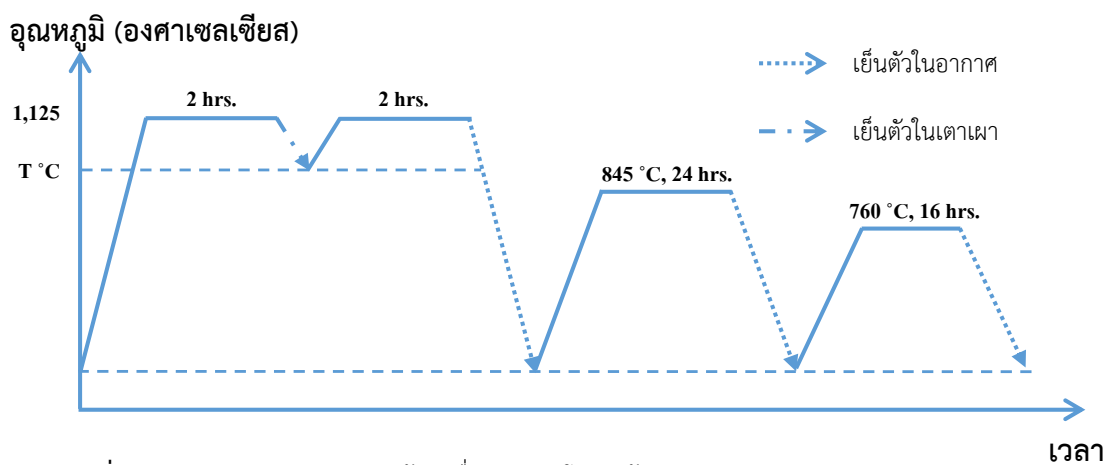
กรรมวิธีทางความร้อนเพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมพิเศษเนื้อฟีนิกเกิลเกรดยูดีเมท 520 แบบสภาวะ 1-3 ดังรูปที่ 3.2 ทำโดยการนำชิ้นงานเผาที่อุณหภูมิ 1,125 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงเมื่อครบ 1 ชั่วโมง ทำการตัดไฟเตาเผา รอจนอุณหภูมิลดลงถึง  $T^{\circ}\text{C}$  ซึ่งอุณหภูมิ  $T^{\circ}\text{C}$  มีค่าแตกต่างกัน 3 อุณหภูมิคือ 840, 800 และ 760 องศาเซลเซียส (สภาวะ A, B และ C ตามลำดับ) หลังจากอุณหภูมิลดลงถึง  $T^{\circ}\text{C}$  ทำการเปิดเตาเพื่อให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นกลับไปถึง 1,125 องศาเซลเซียส เผาชิ้นงานที่อุณหภูมินี้ต่อไปอีก 3 ชั่วโมง นำชิ้นงานออกมาจากเตาเผาปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ และทำการบ่มแข็ง 2 ขั้นตอนต่อไป โดยบ่มแข็งขั้นแรกที่อุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในอากาศ บ่มแข็งขั้นที่สองที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในอากาศ



รูปที่ 3.2 รูปแบบกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของยูดีเมท 520 แบบสภาวะ 1-3

### 3. กรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ 2-2

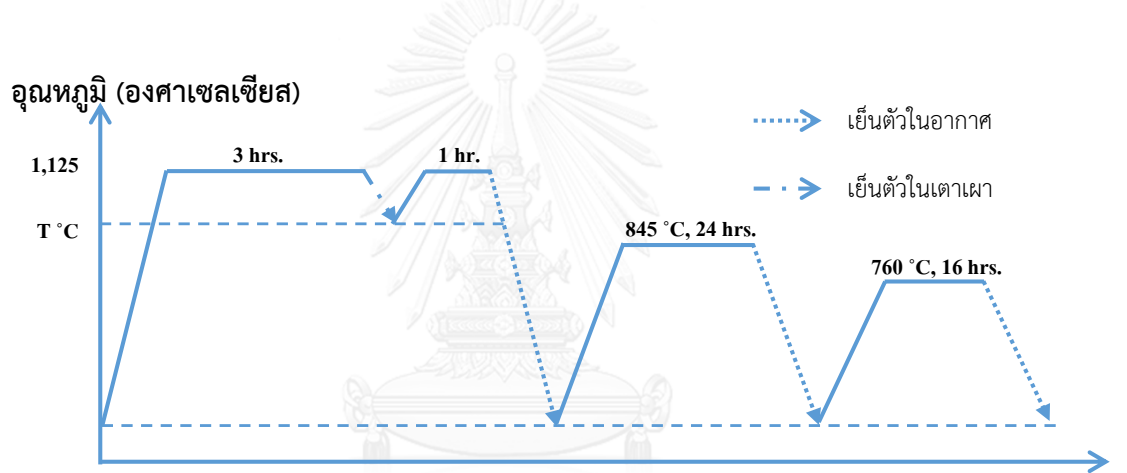
กรรมวิธีทางความร้อนเพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมพิเศษเนื้อฟีนิกเกิลเกรด ยูดีเมท 520 แบบสภาวะ 2-2 ดังรูปที่ 3.3 ทำโดยการนำชิ้นงานเผาที่อุณหภูมิ 1,125 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อครบ 2 ชั่วโมง ทำการตัดไฟเตาเผา รอจนอุณหภูมิลดลงถึง  $T^{\circ}\text{C}$  ซึ่งอุณหภูมิ  $T^{\circ}\text{C}$  มีค่าแตกต่างกัน 3 อุณหภูมิคือ 840, 800 และ 760 องศาเซลเซียส (สภาวะ A, B และ C ตามลำดับ) หลังจากอุณหภูมิลดลงถึง  $T^{\circ}\text{C}$  ทำการเปิดเตาเพื่อให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นกลับไปถึง 1,125 องศาเซลเซียส เผาชิ้นงานที่อุณหภูมินี้ต่อไปอีก 2 ชั่วโมง นำชิ้นงานออกมาจากเตาปล่อยให้เย็นตัว ในอากาศ และทำการบ่มแข็ง 2 ขั้นตอน โดยบ่มแข็งขั้นแรกที่อุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในอากาศ บ่มแข็งขั้นที่สองที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในอากาศ



รูปที่ 3.3 รูปแบบกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของยูดีเมท 520 แบบสภาวะ 2-2

#### 4. กรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ 3-1

กรรมวิธีทางความร้อนเพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมพิเศษเนื้อฟีนิกเกิลเกรด ยูดีเมท 520 แบบสภาวะ 3-1 ดังรูปที่ 3.4 ทำโดยการนำชิ้นงานเผาที่อุณหภูมิ 1,125 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เมื่อครบ 3 ชั่วโมง ทำการตัดไฟเตาเผา รอจนอุณหภูมิลดลงถึง  $T^{\circ}\text{C}$  ซึ่งอุณหภูมิ  $T^{\circ}\text{C}$  มีค่าแตกต่างกัน 3 อุณหภูมิคือ 840, 800 และ 760 องศาเซลเซียส (สภาวะ A, B และ C ตามลำดับ) หลังจากอุณหภูมิลดลงถึง  $T^{\circ}\text{C}$  ทำการเปิดเตาเพื่อให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นกลับไปถึง 1,125 องศาเซลเซียส เผาชิ้นงานที่อุณหภูมินี้ต่อไปอีก 1 ชั่วโมง นำชิ้นงานออกจากเตาเผาปล่อยให้เย็นตัว ในอากาศ และทำการบ่มแข็ง 2 ขั้นตอน โดยบ่มแข็งขั้นแรกที่อุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในอากาศ บ่มแข็งขั้นที่สองที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในอากาศ

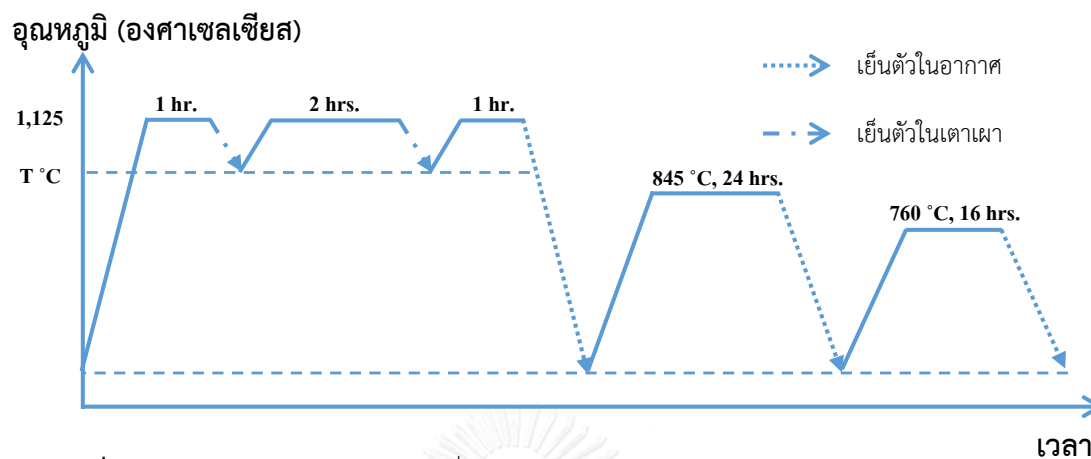


รูปที่ 3.4 รูปแบบกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของยูดีเมท 520 แบบสภาวะ 3-1

#### 5. กรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ 1-2-1

กรรมวิธีทางความร้อนเพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมพิเศษเนื้อฟีนิกเกิลเกรด ยูดีเมท 520 แบบสภาวะ 1-2-1 ดังรูปที่ 3.5 ทำโดยการนำชิ้นงานเผาที่อุณหภูมิ 1,125 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อครบ 1 ชั่วโมง ทำการตัดไฟเตาเผา รอจนอุณหภูมิลดลงถึง  $T^{\circ}\text{C}$  ซึ่งอุณหภูมิ  $T^{\circ}\text{C}$  มีค่าแตกต่างกัน 3 อุณหภูมิคือ 840, 800 และ 760 องศาเซลเซียส (สภาวะ A, B และ C ตามลำดับ) หลังจากอุณหภูมิลดลงถึง  $T^{\circ}\text{C}$  ทำการเปิดเตาเพื่อให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นกลับไปถึง 1,125 องศาเซลเซียส เผาชิ้นงานที่อุณหภูมินี้ต่อไปอีก 2 ชั่วโมง เมื่อครบ 2 ชั่วโมง ทำการตัดไฟเตาเผา รอจนอุณหภูมิลดลงถึง  $T^{\circ}\text{C}$  หลังจากอุณหภูมิลดลงถึง  $T^{\circ}\text{C}$  ทำการเปิดเตาเพื่อให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นกลับไปถึง 1,125 องศาเซลเซียส เผาชิ้นงานที่อุณหภูมินี้ต่อไปอีก 1 ชั่วโมง นำชิ้นงานออกจากเตาเผาปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ และทำการบ่มแข็ง 2 ขั้นตอน โดยบ่มแข็งขั้นแรกที่อุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในอากาศ บ่มแข็งขั้นที่

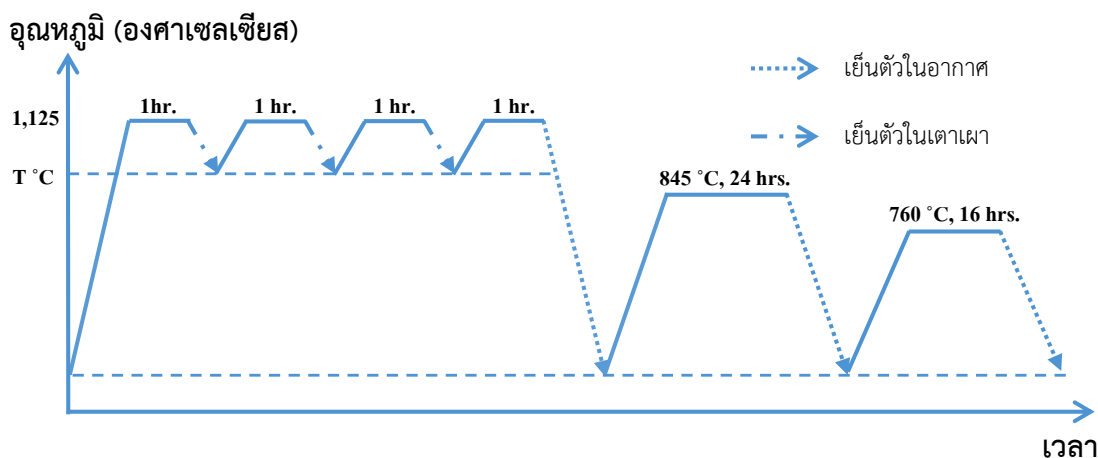
สองที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในอากาศ



รูปที่ 3.5 รูปแบบกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของยูดีเมท 520 แบบสภาวะ 1-2-1

#### 6. กรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ 1-1-1-1

กรรมวิธีทางความร้อนเพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมพิเศษเนื้อฟีนิกเกิลเกรด ยูดีเมท 520 แบบสภาวะ 1-1-1-1 ดังรูปที่ 3.6 ทำโดยการนำชิ้นงานเผาที่อุณหภูมิ 1,125 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อครบ 1 ชั่วโมง ทำการตัดไฟเตาเผา รอจนอุณหภูมิลดลงถึง T °C ซึ่งอุณหภูมิ T °C มีค่าแตกต่างกัน 3 อุณหภูมิคือ 840, 800 และ 760 องศาเซลเซียส (สภาวะ A, B และ C ตามลำดับ) หลังจากอุณหภูมิลดลงถึง T °C ทำการเปิดเตาเพื่อให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นกลับไปถึง 1,125 องศาเซลเซียส เผาชิ้นงานที่อุณหภูมินี้ต่อไปอีก 1 ชั่วโมง เมื่อครบ 1 ชั่วโมง ทำการตัดไฟเตาเผา รอจนอุณหภูมิลดลงถึง T °C หลังจากอุณหภูมิลดลงถึง T °C ทำการเปิดเตาเพื่อให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นกลับไปถึง 1,125 องศาเซลเซียส เผาชิ้นงานที่อุณหภูมินี้ต่อไปอีก 1 ชั่วโมง เมื่อครบ 1 ชั่วโมง ทำการตัดไฟเตาเผา รอจนอุณหภูมิลดลงถึง T °C หลังจากอุณหภูมิลดลงถึง T °C ทำการเปิดเตาเพื่อให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นกลับไปถึง 1,125 องศาเซลเซียส เผาชิ้นงานที่อุณหภูมินี้ต่อไปอีก 1 ชั่วโมง นำชิ้นงานออกมาจากเตาเผาปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ และทำการบ่มแข็ง 2 ขั้นตอน โดยบ่มแข็งขั้นแรกที่อุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในอากาศ บ่มแข็งขั้นที่สองที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในอากาศ



รูปที่ 3.6 รูปแบบกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของยูติเมท 520 แบบสภาวะ 1-1-1-1

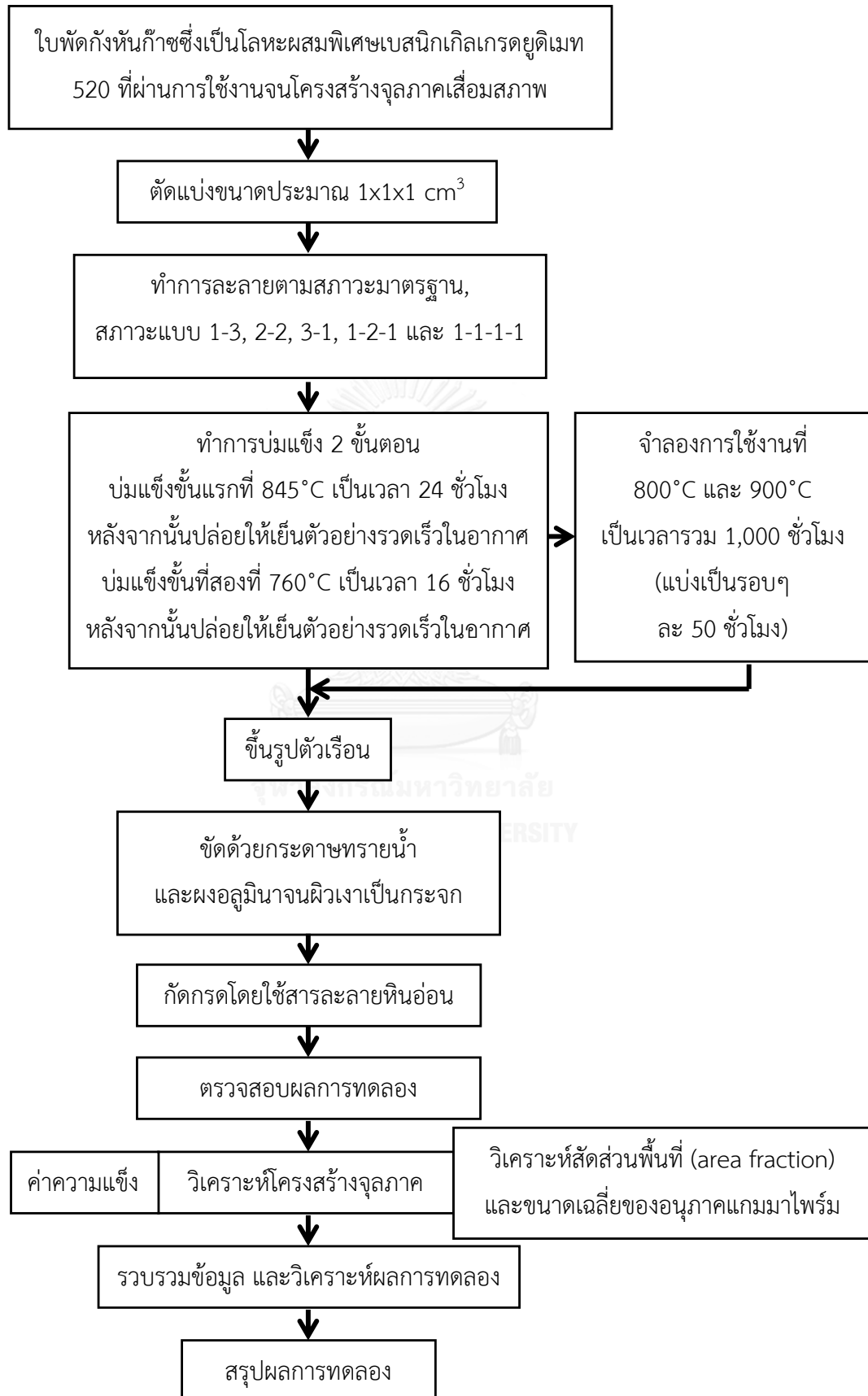
การรายงานผลเพื่อให้เข้าใจได้ง่ายจึงกำหนดการเรียกชื่อสภาวะการทดลองต่างๆโดยให้อุณหภูมิลดลงถึง  $T$  °C ซึ่งมีค่าแตกต่างกัน 3 อุณหภูมิคือ 840, 800 และ 760 องศาเซลเซียส แทนด้วย A, B และ C ตามลำดับเช่น ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมพิเศษเนื้อพ่นนิกเกิลเกรดยูติเมท 520 แบบสภาวะ 1-3 ทำโดยการนำชิ้นงานเผาที่อุณหภูมิ 1,125 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อครบ 1 ชั่วโมง ทำการตัดไฟเตาเผา รอจนอุณหภูมิลดลงถึง 760 องศาเซลเซียส หลังจากอุณหภูมิลดลงถึง 760 องศาเซลเซียส ทำการเปิดเตาเพื่อให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นกลับไปถึง 1,125 องศาเซลเซียส เผาชิ้นงานที่อุณหภูมินี้ต่อไปอีก 3 ชั่วโมง นำชิ้นงานออกมาจากเตาเผาปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ และทำการบ่มแข็ง 2 ขั้นตอน โดยบ่มแข็งขั้นแรกที่อุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในอากาศ บ่มแข็งขั้นที่สองที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในอากาศจะถูกเรียกว่า “สภาวะ C 1-3” เป็นต้น

3.2.3 นำชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนในแต่ละสภาวะการทดลอง มาสภาวะละ 3 ชิ้นงาน และชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการทำกรรมวิธีทางความร้อน 3 ชิ้นงานมาทำการขึ้นรูปตัวเรือน (mounting) เพื่อให้ง่ายต่อการขัดชิ้นงาน

3.2.4 นำชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนในแต่ละสภาวะการทดลองมาสภาวะละ 3 ชิ้นงาน ไปเผาเพื่อจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง โดยแบ่งเป็นรอบๆละ 50 ชั่วโมง จำนวน 20 รอบ เมื่อครบกำหนดเวลา 1,000 ชั่วโมง แล้วนำชิ้นงานทั้งหมดไปขึ้นรูปตัวเรือนเพื่อให้ง่ายต่อการขัดชิ้นงาน

- 3.2.5 ชัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายน้ำเบอร์ 50, 80, 120, 200, 500, 800, 1000, 1200, 2000 และ  
ขัดด้วยผงอลูมินาจนได้ผิวเงาเป็นกระจก
- 3.2.6 นำกรดไฮโดรคลอริก 50 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 50 มิลลิลิตร และน้ำ  
กลั่น 50 มิลลิลิตร ได้เป็นสารละลายหินอ่อน (marble etchant) เพื่อใช้ในการกัดกรด
- 3.2.7 นำชิ้นงานไปกัดกรดโดยใช้สารละลายหินอ่อนเป็นเวลา 5-10 วินาที แล้วล้างชิ้นงานด้วยน้ำกลั่น  
และตามด้วยเอทานอล จากนั้นเป่าให้แห้งเพื่อให้เห็นโครงสร้างที่ชัดเจนยิ่งขึ้น
- 3.2.8 ทำการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคที่พื้นผิวชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง
- 3.2.9 ทำการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคที่พื้นผิวชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด  
(Scanning Electron Microscope) เพื่อดูโครงสร้างจุลภาพ และถ่ายภาพ
- 3.2.10 วิเคราะห์สัดส่วนพื้นที่ (Area fraction) และขนาดของอนุภาคแกมมาไพร์มโดยเฉลี่ย  
(Average area of particle) โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ภาพ (Image Analysis)
- 3.2.11 วัดค่าความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์
- 3.2.12 วิเคราะห์ส่วนประกอบของธาตุต่างๆของชิ้นงานที่ได้รับมาโดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ส่วนผสม  
ทางเคมี (Spectroscopy)
- 3.2.13 รวบรวมข้อมูล และวิเคราะห์ผลการทดลอง
- 3.2.14 สรุปผลการทดลอง

## แผนผังสรุปกระบวนการทดลอง







## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการอภิปราย

#### 4.1 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมพิเศษเกรดยูติเมท 520 ที่ได้รับ

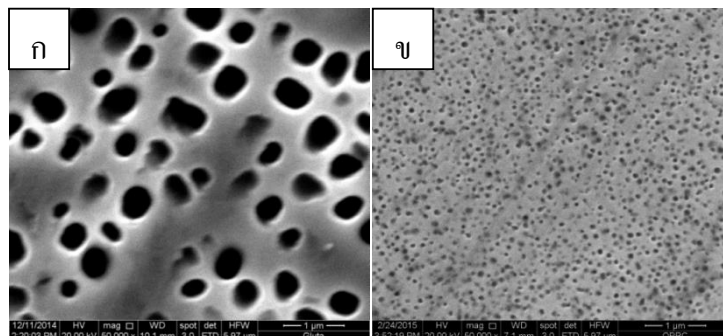
นำชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรดยูติเมท 520 ที่ได้รับไปทำการวิเคราะห์ส่วนประกอบของธาตุต่างๆ โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีพบว่ามีส่วนประกอบของธาตุต่างๆดังตารางที่ 4.1

#### ตารางที่ 4.1 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมพิเศษเกรดยูติเมท 520 ที่ใช้ในการทดลอง

ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมพิเศษเกรดยูติเมท 520 (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)											
Ni	Cr	Co	Mo	Ti	Al	W	Fe	Si	Mn	B	C
Bal	18.39	9.53	5.69	2.77	2.06	0.84	0.12	0.03	0.02	0.004	0.002

#### 4.2 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ได้รับ (As-Received microstructure)

ชิ้นงานเป็นชิ้นส่วนของใบพัดภายในเครื่องจักรกังหันก๊าซที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้า ซึ่งเป็นวัสดุโลหะผสมพิเศษชนิดเนื้อพื้นนิเกิลเกรดยูติเมท 520 ที่ผ่านการใช้งานมาแล้วประมาณ 50,000 ชั่วโมง โดยโครงสร้างของชิ้นงานที่ได้รับแสดงในรูปที่ 4.1(ก) ซึ่งมีอนุภาคแกมมาไพร์มขนาดใหญ่มากเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบมาตรฐานเพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคมาแล้วดังรูปที่ 4.1(ข) แกมมาไพร์มของชิ้นงานที่ได้รับมีขนาดประมาณพื้นที่เฉลี่ย 0.1511 ตารางไมครอน และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าอยู่ที่ประมาณ 27.34 โดยมีลักษณะเป็นคล้ายทรงกลมรีซึ่งเกิดจากการรวมตัวกันของอนุภาคแกมมาไพร์ม และการโตขึ้นของอนุภาคแกมมาไพร์มซึ่งแสดงให้เห็นถึงโครงสร้างจุลภาคที่เกิดการเสื่อมสภาพหลังจากการใช้งานนั่นเอง



รูปที่ 4.1 (ก) โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ได้รับ (กำลังขยาย 50,000 เท่า)

(ข) โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบมาตรฐาน (กำลังขยาย 50,000 เท่า)

### 4.3 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาค สภาวะแบบต่างๆ

#### 4.3.1 ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะมาตรฐาน

โครงสร้างจุลภาคสุดท้ายของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรดยูดีเมท 520 แบบสภาวะมาตรฐานแสดงดังรูปที่ 4.1(ข) ซึ่งพบว่าโครงสร้างจุลภาคที่ได้มีการตกตะกอนของแกมมาไพร์มซึ่งมีขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วชิ้นงานโดยขนาดพื้นที่เฉลี่ยของแกมมาไพร์มที่วัดได้มีขนาดประมาณ 0.0035 ตารางไมครอน และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าอยู่ที่ประมาณ 18.97 ซึ่งสภาวะมาตรฐานเป็นสภาวะที่มีการทำละลายเป็นระยะเวลานาน และต่อเนื่องที่สุดซึ่งเพียงพอที่จะสามารถละลายอนุภาคแกมมาไพร์มขนาดใหญ่ที่มีอยู่ซึ่งเกิดจากการเชื่อมสภาพโครงสร้างของชิ้นงานหลังจากการใช้งานได้หมด

#### 4.3.2 ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ 1-3

##### 4.2.2.ก. ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ A 1-3

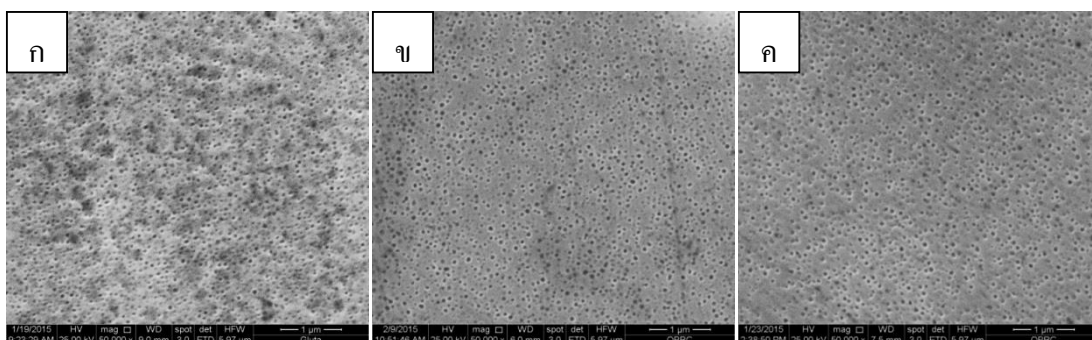
โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ A 1-3 แสดงดังรูปที่ 4.2(ก) ซึ่งพบว่าโครงสร้างจุลภาคที่ได้มีการตกตะกอนของแกมมาไพร์มซึ่งมีขนาดเล็กโดยขนาดพื้นที่เฉลี่ยของแกมมาไพร์มที่วัดได้มีขนาดประมาณ 0.0018 ตารางไมครอน และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าอยู่ที่ประมาณ 17.47

##### 4.3.2.ข. ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ B 1-3

โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ B 1-3 แสดงดังรูปที่ 4.2(ข) ซึ่งพบว่าโครงสร้างจุลภาคที่ได้มีการตกตะกอนของแกมมาไพร์มซึ่งมีขนาดเล็กโดยขนาดพื้นที่เฉลี่ยของแกมมาไพร์มที่วัดได้มีขนาดประมาณ 0.0021 ตารางไมครอน และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าอยู่ที่ประมาณ 18.37

##### 4.3.2.ค. ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ C 1-3

โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ C 1-3 แสดงดังรูปที่ 4.2(ค) ซึ่งพบว่าโครงสร้างจุลภาคที่ได้มีการตกตะกอนของแกมมาไพร์มซึ่งมีขนาดเล็กโดยขนาดพื้นที่เฉลี่ยของแกมมาไพร์มที่วัดได้มีขนาดประมาณ 0.0023 ตารางไมครอน และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าอยู่ที่ประมาณ 19.72



รูปที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ (ก) A 1-3 (ข) B 1-3 และ (ค) C 1-3 (กำลังขยาย 50,000 เท่า)

สภาวะที่ทำการทดลองนี้มีการลดลงของอุณหภูมิระหว่างการทำละลาย 1 ครั้ง โดยลดอุณหภูมิขณะการทำละลายผ่านไปแล้ว 1 ชั่วโมง ลงมาที่อุณหภูมิ 840, 800 และ 760 องศาเซลเซียส (สภาวะ A, B และ C ตามลำดับ) ซึ่งระยะเวลาในการทำละลายเหลืออีก 3 ชั่วโมงนั้นเพียงพอที่จะละลายอนุภาคแกมมาไพร์มขนาดใหญ่ที่มีอยู่ซึ่งเกิดจากการเสื่อมสภาพโครงสร้างของชิ้นงานหลังการใช้งาน และที่เกิดการตกตะกอนใหม่ระหว่างการลดลง และเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิระหว่างการทำละลายได้หมด โดยอนุภาคแกมมาไพร์มที่ได้มีขนาด และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าอยู่ที่ประมาณใกล้เคียงกันแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยซึ่งเป็นผลจากการลดอุณหภูมิขณะการทำละลายเนื่องจากการลดอุณหภูมิลงมาที่อุณหภูมิต่ำยิ่งใช้เวลานานเช่นเดียวกับเมื่อให้ความร้อนเพื่อให้อุณหภูมิลบสู่อุณหภูมิในการทำละลายอีกครั้ง เมื่อใช้เวลามากขึ้นอนุภาคแกมมาไพร์มมีเวลาในการแพร่เกิดการโตขึ้นทำให้อนุภาคแกมมาไพร์มมีขนาดใหญ่ขึ้น ดังนั้นอนุภาคแกมมาไพร์มของสภาวะ A 1-3 มีขนาดเล็กที่สุด ส่วนสภาวะ B 1-3 มีขนาดใหญ่กว่าสภาวะ A 1-3 และสภาวะ C 1-3 มีขนาดใหญ่ที่สุดเมื่อเทียบกับสภาวะทั้งหมดในหัวข้อ 4.3.2 ซึ่งร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นก็สอดคล้องเช่นเดียวกับเหตุผลข้างต้นทำให้สภาวะ A 1-3, B 1-3 และ C 1-3 มีค่าร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามลำดับอีกทั้งมีการกระจายตัวของเฟสแกมมาไพร์มอย่างสม่ำเสมอซึ่งจากภาพที่ได้สามารถแสดงให้เห็นว่าอนุภาคแกมมาไพร์มชนิดละเอียดเกิดขึ้นได้จากการละลายอนุภาคแกมมาไพร์มขนาดใหญ่ลงสู่เนื้อพื้นแกมมาและเมื่อนำชิ้นงานไปผ่านการบ่มแข็งปฐมนุญที่อุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และบ่มแข็งทุติยภูมิที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง จึงเกิดการตกตะกอนของอนุภาคแกมมาไพร์มชนิดละเอียดออกมาอีกครั้งอย่างสม่ำเสมอและมีขนาดใกล้เคียงกันนั่นเอง

#### 4.3.3 ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ 2-2

##### 4.3.3.ก. ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ A2-2

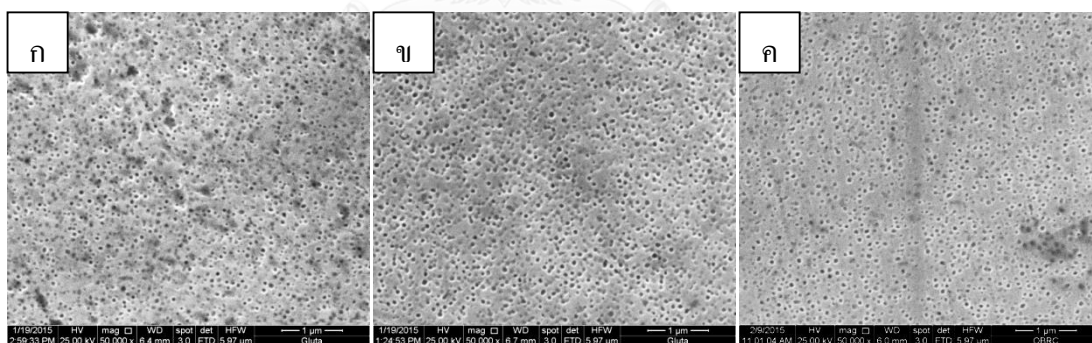
โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ A 2-2 แสดงดังรูปที่ 4.3(ก) ซึ่งพบว่าโครงสร้างจุลภาคที่ได้มีการตกตะกอนของอนุภาคแกมมาไพร์มซึ่งมีขนาดเล็กโดยขนาดพื้นที่เฉลี่ยของแกมมาไพร์มที่วัดได้มีขนาดประมาณ 0.0021 ตารางไมครอน และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าอยู่ที่ประมาณ 16.88

##### 4.3.3.ข. ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ B 2-2

โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ B 2-2 แสดงดังรูปที่ 4.3(ข) ซึ่งพบว่าโครงสร้างจุลภาคที่ได้มีการตกตะกอนของอนุภาคแกมมาไพร์มซึ่งมีขนาดเล็กโดยขนาดพื้นที่เฉลี่ยของแกมมาไพร์มที่วัดได้มีขนาดประมาณ 0.0027 ตารางไมครอน และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าอยู่ที่ประมาณ 19.19

##### 4.3.3.ค. ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ C 2-2

โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ C 2-2 แสดงดังรูปที่ 4.3(ค) ซึ่งพบว่าโครงสร้างจุลภาคที่ได้มีการตกตะกอนของอนุภาคแกมมาไพร์มซึ่งมีขนาดเล็กโดยขนาดพื้นที่เฉลี่ยของแกมมาไพร์มที่วัดได้มีขนาดประมาณ 0.0033 ตารางไมครอน และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าอยู่ที่ประมาณ 20.46



รูปที่4.3 โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ (ก) A 2-2 (ข) B 2-2 และ (ค) C 2-2 (กำลังขยาย 50,000 เท่า)

สภาวะที่ทำการทดลองนี้มีการลดลงของอุณหภูมิระหว่างการทำละลาย 1 ครั้ง โดยลดอุณหภูมิขณะการทำละลายผ่านไปแล้ว 2 ชั่วโมง ลงมาที่อุณหภูมิ 840, 800 และ 760 องศาเซลเซียส (สภาวะ A, B และ C ตามลำดับ) ซึ่งหลังจากการลดอุณหภูมิระยะเวลาในการทำละลายเหลืออีก 2 ชั่วโมง สรุปได้ว่าการลดลงของอุณหภูมิขณะการทำละลายในรูปแบบดังกล่าวมีการทำละลายที่มีระยะเวลาเพียงพอที่จะทำละลายอนุภาคแกมมาไพร์มขนาดใหญ่ที่มีอยู่ซึ่งเกิดจากการเชื่อมสภาพโครงสร้างของชิ้นงานหลังจากการใช้งาน และที่เกิดการตกตะกอนใหม่ระหว่างการลดลง และเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิระหว่างการทำละลายได้หมดโดยอนุภาคแกมมาไพร์มที่ได้มีขนาด และร้อยละพื้นที่ของ

อนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าที่ประมาณใกล้เคียงกันโดยสอดคล้องกับหัวข้อ 4.3.2 กล่าวได้ว่าอนุภาคแกมมาไพร์ม และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นของสภาวะ A 2-2, B 2-2 และ C 2-2 มีขนาดและร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นค่อยๆเพิ่มขึ้นตามลำดับอีกทั้งมีการกระจายตัวของเฟสแกมมาไพร์มอย่างสม่ำเสมออย่างที่ได้อธิบายไป

#### 4.3.4 ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ 3-1

##### 4.3.4.ก. ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ A 3-1

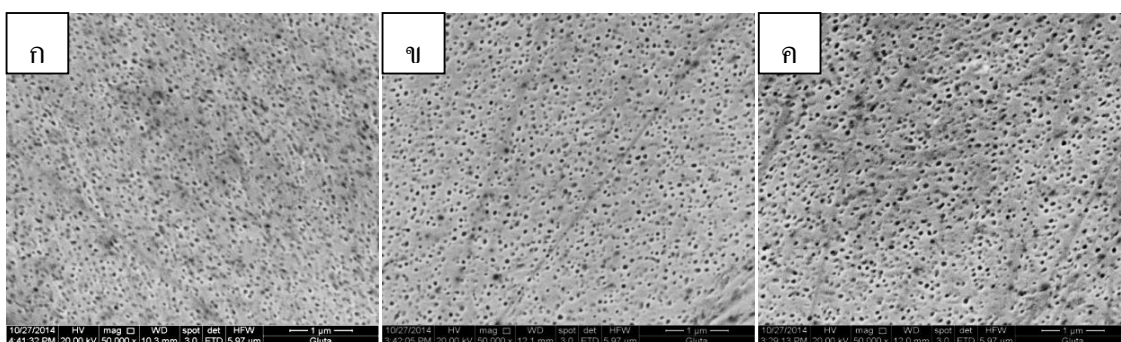
โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ A 3-1 แสดงดังรูปที่ 4.4(ก) ซึ่งพบว่าโครงสร้างจุลภาคที่ได้มีการตกตะกอนของอนุภาคแกมมาไพร์มซึ่งมีขนาดเล็กโดยขนาดพื้นที่เฉลี่ยของแกมมาไพร์มที่วัดได้มีขนาดประมาณ 0.0019 ตารางไมครอน และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าอยู่ที่ประมาณ 18.99

##### 4.3.4.ข. ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ B 3-1

โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ B 3-1 แสดงดังรูปที่ 4.4(ข) ซึ่งพบว่าโครงสร้างจุลภาคที่ได้มีการตกตะกอนของอนุภาคแกมมาไพร์มซึ่งมีขนาดเล็กโดยขนาดพื้นที่เฉลี่ยของแกมมาไพร์มที่วัดได้มีขนาดประมาณ 0.0025 ตารางไมครอน และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าอยู่ที่ประมาณ 21.73

##### 4.3.4.ค. ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ C 3-1

โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ C 3-1 แสดงดังรูปที่ 4.4(ค) ซึ่งพบว่าโครงสร้างจุลภาคที่ได้มีการตกตะกอนของอนุภาคแกมมาไพร์มซึ่งมีขนาดเล็กโดยขนาดพื้นที่เฉลี่ยของแกมมาไพร์มที่วัดได้มีขนาดประมาณ 0.0030 ตารางไมครอน และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าอยู่ที่ประมาณ 25.69



รูปที่ 4.4 โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ (ก) A 3-1 (ข) B 3-1 และ (ค) C 3-1 (กำลังขยาย 50,000 เท่า)

สภาวะที่ทำการทดลองซึ่งมีการลดลงของอุณหภูมิระหว่างการทำละลาย 1 ครั้ง โดยลดอุณหภูมิขณะการทำละลายผ่านไปแล้ว 3 ชั่วโมง ลงมาที่อุณหภูมิ 840, 800 และ 760 องศาเซลเซียส

(สภาวะ A, B และ C ตามลำดับ) ซึ่งระยะเวลาในการทำละลายเหลืออีก 1 ชั่วโมง สรุปได้ว่าการลดลงของอุณหภูมิขณะการทำละลายในรูปแบบดังกล่าวมีการทำละลายที่มีระยะเวลาเพียงพอที่จะละลายอนุภาคแกมมาไพรมขนาดใหญ่ที่มีอยู่ซึ่งเกิดจากการเชื่อมสภาพโครงสร้างของชิ้นงานหลังจากการใช้งาน และที่ตกตะกอนออกมาใหม่ในช่วงที่มีการลดลง และเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิผ่านช่วงอุณหภูมิของการตกตะกอนของเฟสแกมมาไพรมได้หมด โดยอนุภาคแกมมาไพรมที่ได้มีขนาด และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพรมต่อเนื้อพื้นมีค่าอยู่ที่ประมาณใกล้เคียงกันโดยสอดคล้องกับหัวข้อ 4.3.2 และ 4.3.3 กล่าวได้ว่าอนุภาคแกมมาไพรม และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพรมต่อเนื้อพื้นของสภาวะ A 3-1, B 3-1 และ C 3-1 มีขนาดและร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพรมต่อเนื้อพื้นค่อยๆเพิ่มขึ้นตามลำดับอีกทั้งมีการกระจายตัวของเฟสแกมมาไพรมอย่างสม่ำเสมอ

เมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ 3-1 กับสภาวะ 1-3 พบว่าสภาวะ 3-1 มีแกมมาไพรมขนาดใหญ่กว่าสภาวะ 1-3 เล็กน้อยทุกสภาวะการทดลองเช่นเดียวกับร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพรมต่อเนื้อพื้นที่มีค่ามากกว่าเล็กน้อยทุกสภาวะการทดลองอาจเป็นผลจากการที่สภาวะ 3-1 มีการลดลงและเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมะหว่างการทำละลาย ซึ่งเหลือระยะเวลาในการทำละลายต่ออีกเพียง 1 ชั่วโมง ทำให้การละลายไม่สมบูรณ์ดีเมื่อเทียบกับสภาวะ 1-3 ที่เหลือระยะเวลาในการทำละลายต่ออีก 3 ชั่วโมง หลังมีการลดลงและเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมะหว่างการทำละลาย

#### 4.3.5 ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ 1-2-1

##### 4.3.5.ก. ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ A 1-2-1

โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ A 1-2-1 แสดงดังรูปที่ 4.5(ก) ซึ่งพบว่าโครงสร้างจุลภาคที่ได้มีการตกตะกอนของอนุภาคแกมมาไพรมซึ่งมีขนาดเล็กโดยขนาดพื้นที่เฉลี่ยของแกมมาไพรมที่วัดได้มีขนาดประมาณ 0.0027 ตารางไมครอน และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพรมต่อเนื้อพื้นมีค่าอยู่ที่ประมาณ 21.24

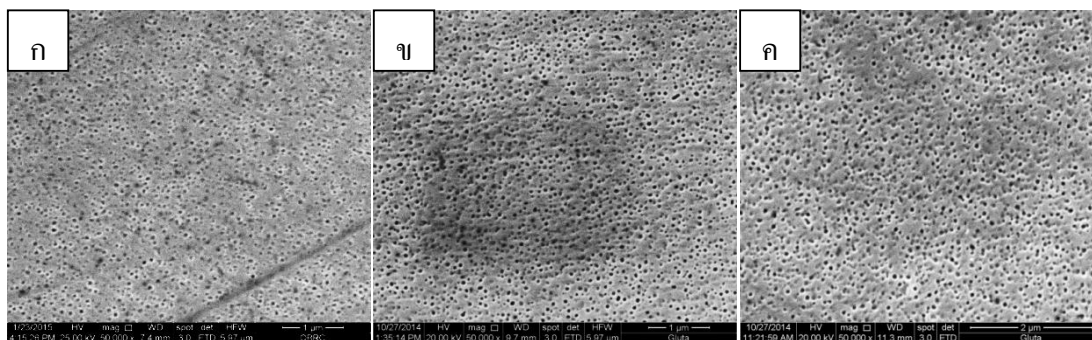
##### 4.3.5.ข. ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ B 1-2-1

โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ B 1-2-1 แสดงดังรูปที่ 4.5(ข) ซึ่งพบว่าโครงสร้างจุลภาคที่ได้มีการตกตะกอนของอนุภาคแกมมาไพรมซึ่งมีขนาดเล็กโดยขนาดพื้นที่เฉลี่ยของแกมมาไพรมที่วัดได้มีขนาดประมาณ 0.0029 ตารางไมครอน และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพรมต่อเนื้อพื้นมีค่าอยู่ที่ประมาณ 23.26

##### 4.3.5.ค. ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ C 1-2-1

โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ C 1-2-1 แสดงดังรูปที่ 4.5(ค) ซึ่งพบว่าโครงสร้างจุลภาคที่ได้มีการตกตะกอนของอนุภาคแกมมาไพรมซึ่งมีขนาดเล็กโดยขนาดพื้นที่เฉลี่ยของแกมมาไพรมที่วัดได้มี

ขนาดประมาณ 0.0034 ตารางไมครอน และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าอยู่ที่ประมาณ 25.01



รูปที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ (ก) A 1-2-1 (ข) B 1-2-1 และ (ค) C 1-2-1 (กำลังขยาย 50,000 เท่า)

สภาวะที่ทำการทดลองนี้มีการลดลงของอุณหภูมิระหว่างการทำละลายถึง 2 ครั้ง การลดลงและเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิขณะการทำละลายในรูปแบบดังกล่าวยังคงมีการทำละลายที่มีระยะเวลาเพียงพอที่จะละลายอนุภาคแกมมาไพร์มขนาดใหญ่ที่มีอยู่ซึ่งเกิดจากการเสื่อมสภาพโครงสร้างของชิ้นงานหลังจากการใช้งานได้หมด และที่ตกตะกอนออกมาใหม่ในช่วงที่มีการลดลงของอุณหภูมิ รวมถึงที่ตกตะกอนในช่วงที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นผ่านช่วงอุณหภูมิของการตกตะกอนของเฟสแกมมาไพร์มระหว่างทำละลายได้หมด โดยอนุภาคแกมมาไพร์มที่ได้มีขนาด และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าอยู่ที่ประมาณใกล้เคียงกันอีกทั้งมีการกระจายตัวของเฟสแกมมาไพร์มอย่างสม่ำเสมอซึ่งผลที่ได้รับนี้มีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกับหัวข้อหัวข้อ 4.3.2, 4.3.3 และ 4.3.4 สรุปได้ว่าอนุภาคแกมมาไพร์ม และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นของสภาวะ A 1-2-1, B 1-2-1 และ C 1-2-1 มีขนาดและร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามลำดับ

#### 4.3.6 ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ 1-1-1-1

##### 4.3.6.ก. ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ A 1-1-1-1

โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ A 1-1-1-1 แสดงดังรูปที่ 4.6(ก) ซึ่งพบว่าโครงสร้างจุลภาคที่ได้มีการตกตะกอนของอนุภาคแกมมาไพร์มซึ่งมีขนาดเล็กโดยขนาดพื้นที่เฉลี่ยของแกมมาไพร์มที่วัดได้มีขนาดประมาณ 0.0029 ตารางไมครอน และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าอยู่ที่ประมาณ 21.34

##### 4.3.6.ข. ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ B 1-1-1-1

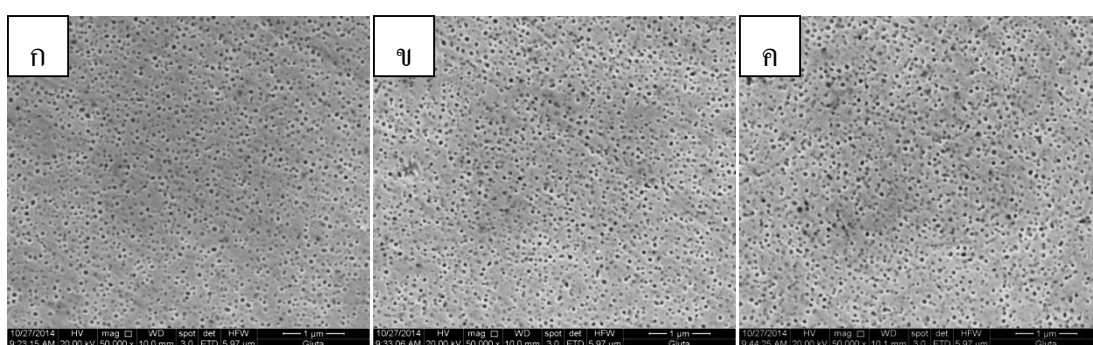
โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ B 1-1-1-1 แสดงดังรูปที่ 4.6(ข) ซึ่งพบว่าโครงสร้างจุลภาคที่ได้มีการตกตะกอนของอนุภาคแกมมาไพร์มซึ่งมีขนาดเล็กโดยขนาดพื้นที่เฉลี่ยของแกมมาไพร์มที่วัดได้มี



ขนาดประมาณ 0.0033 ตารางไมครอน และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าอยู่ที่ประมาณ 24.60

#### 4.3.6.ค. ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ C 1-1-1-1

โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ C 1-1-1-1 แสดงดังรูปที่ 4.6(ค) ซึ่งพบว่าโครงสร้างจุลภาคที่ได้มีการตกตะกอนของอนุภาคแกมมาไพร์มซึ่งมีขนาดเล็กโดยขนาดพื้นที่เฉลี่ยของแกมมาไพร์มที่วัดได้มีขนาดประมาณ 0.0034 ตารางไมครอน และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าอยู่ที่ประมาณ 25.24

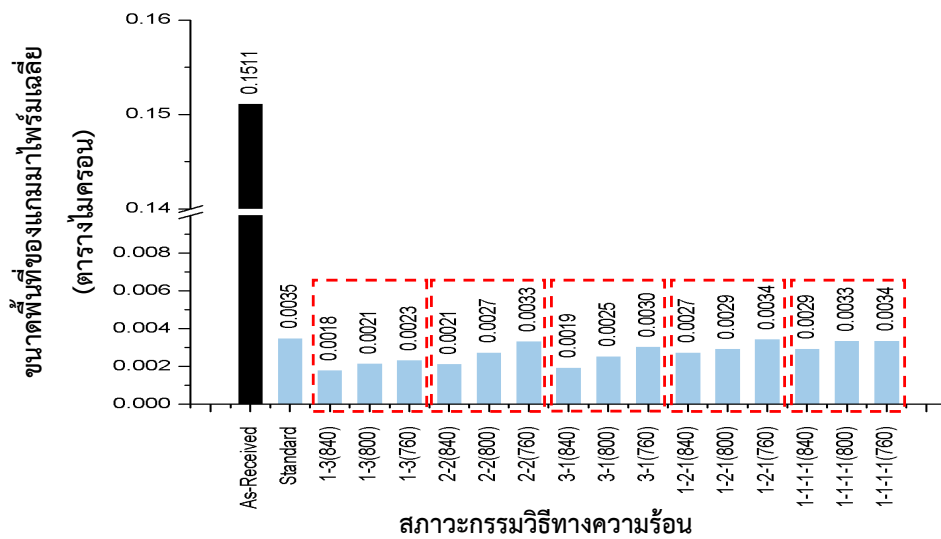


รูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ (ก) A 1-1-1-1 (ข) B 1-1-1-1 และ (ค) C 1-1-1-1  
(กำลังขยาย 50,000 เท่า)

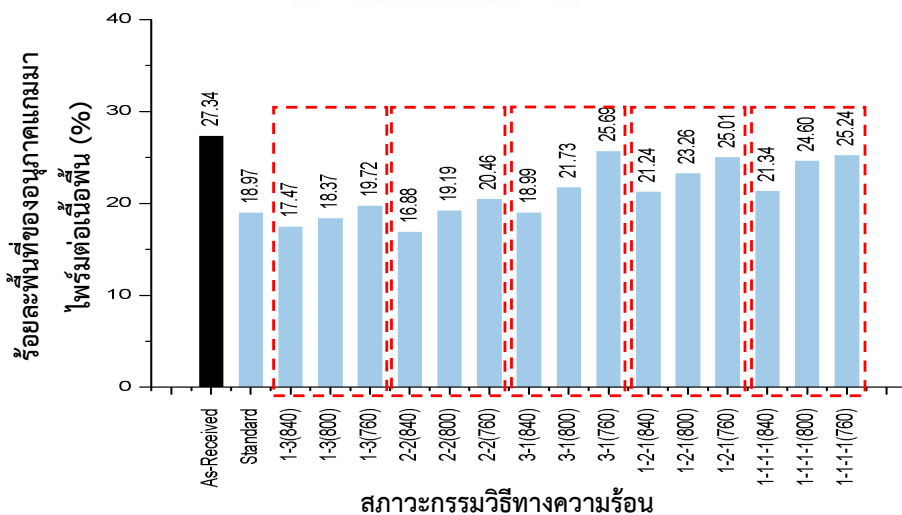
ผลที่ได้รับจากการชิ้นงานที่ผ่านการทดลองกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ 1-1-1-1 นั้น สอดคล้องกับหัวข้อหัวข้อ 4.3.2, 4.3.3, 4.3.4 และ 4.3.5 โดยอนุภาคแกมมาไพร์ม และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นของสภาวะ A 1-1-1-1, B 1-1-1-1 และ C 1-1-1-1 มีขนาดและร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นค่อยๆเพิ่มขึ้นตามลำดับถึงแม้การทดลองจะมีการลดลงของอุณหภูมิระหว่างการทำให้ละลายถึง 3 ครั้ง โดยมีการทำให้อุณหภูมิลดลงเมื่อทำการละลายไปทุกๆ 1 ชั่วโมง การลดลงของอุณหภูมิขณะการทำละลายในรูปแบบดังกล่าวยังคงสามารถที่จะละลายอนุภาคแกมมาไพร์มขนาดใหญ่ที่มีอยู่ซึ่งเกิดจากการเสื่อมสภาพโครงสร้างของชิ้นงานหลังจากการใช้งาน และที่ตกตะกอนออกมาใหม่ในช่วงที่มีการลดลงของอุณหภูมิ รวมถึงที่ตกตะกอนในช่วงที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นผ่านช่วงอุณหภูมิของการตกตะกอนของเฟสแกมมาไพร์มได้หมด

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังจากการทำกรรมวิธีทางความร้อนรูปแบบต่างๆพบว่าอนุภาคแกมมาไพร์มมีขนาด และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าอยู่ที่ประมาณใกล้เคียงกันซึ่งแสดงให้เห็นว่าทุกสภาวะที่ได้ทำการทดลองดังที่กล่าวมาแล้วนั้นสามารถละลายอนุภาคแกมมาไพร์มขนาดใหญ่ที่มีอยู่เนื่องจากการเสื่อมสภาพโครงสร้างของชิ้นงานและที่เกิดการตกตะกอนใหม่ระหว่างการลดลง และเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิระหว่างการทำให้ละลายได้หมด ซึ่งจาก

การศึกษาจากข้อมูลที่ได้ส่วนใหญ่พบแนวโน้มว่าเมื่อการลดลงของอุณหภูมิทำให้ต้องใช้เวลาเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกันกับเมื่อให้ความร้อนเพื่อให้อุณหภูมิกลับสู่อุณหภูมิในการทำละลายอีกครั้ง ดังนั้นจากการทดลอง ยังมีการลดลงของอุณหภูมิระหว่างการทำละลายลงมาเรื่อยๆ ใช้เวลามากซึ่งส่งผลทำให้อุณหภูมิของอนุภาคแกมมาไพร์มที่ได้มีขนาดใหญ่กว่า และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่ามากกว่าดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ อีกทั้งยังมีการลดลงของอุณหภูมิระหว่างการทำละลายมาเรื่อยๆ ทำให้อนุภาคแกมมาไพร์มมีขนาดใหญ่ขึ้น



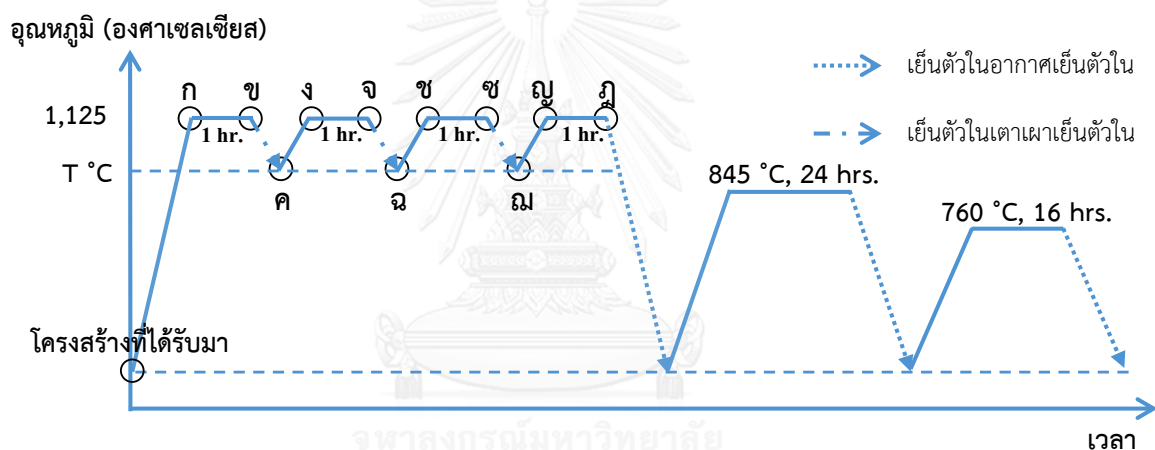
รูปที่ 4.7 ขนาดโดยเฉลี่ยของอนุภาคแกมมาไพร์มของชิ้นงานหลังการทำกรรมวิธีทางความร้อน



รูปที่ 4.8 ร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นของชิ้นงานหลังการทำกรรมวิธีทางความร้อน

#### 4.4 โครงสร้างจุลภาคระหว่างการทำละลายของการทดลองแบบสภาวะ 1-1-1-1

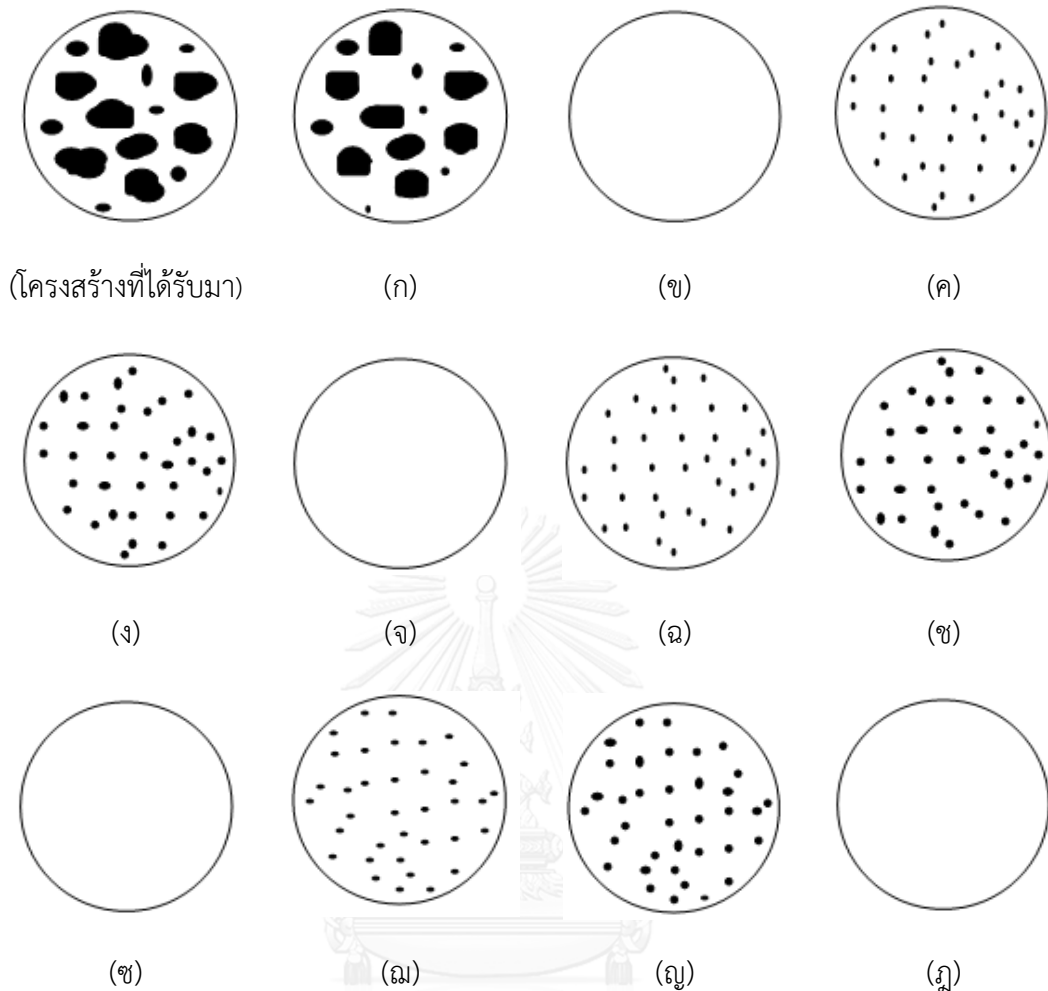
โครงสร้างจุลภาคที่คาดว่าจะเกิดขึ้นของชิ้นงานระหว่างผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ 1-1-1-1 โดยมีการเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละช่วงเวลาและแต่ละสภาวะของการลดลงของอุณหภูมิระหว่างการทำละลายของการทดลองแบบสภาวะ 1-1-1-1 ซึ่งการทดลองแบบสภาวะ 1-1-1-1 มีการลดลงของอุณหภูมิระหว่างทำละลายถึง 3 ครั้ง ดังรูปที่ 4.9 โดยมีการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่สภาวะต่างๆดังรูปที่ 4.10 ซึ่งจากภาพโครงสร้างจุลภาคที่ได้รับดังรูปที่ 4.6 พบว่าโครงสร้างจุลภาคสุดท้ายที่ได้รับแถมมาไพรม์มีขนาดเดี่ยวใกล้เคียงกัน และมีการกระจายตัวที่ดีสม่ำเสมอซึ่งแสดงให้เห็นว่าทุกๆการละลาย 1 ชั่วโมงนั้นเพียงพอที่จะละลายอนุภาคแถมมาไพรม์ขนาดใหญ่ที่มีอยู่ซึ่งเกิดจากการเชื่อมสภาพโครงสร้างของชิ้นงานหลังจากการใช้งาน และที่เกิดการตกตะกอนใหม่ระหว่างการลดลง และเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิระหว่างการทำละลายได้หมด



รูปที่ 4.9 รูปแบบกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของยูติเมท 520 แบบ 1-1-1-1

ขั้นตอนกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ 1-1-1-1 แสดงดังรูปที่ 4.9 ส่วนโครงสร้างจุลภาคที่มีการเปลี่ยนแปลงไปนั้นแสดงในรูปที่ 4.10 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ได้รับมานั้นเกิดการเชื่อมสภาพ แถมมาไพรม์ที่มีขนาดใหญ่เนื่องจากเกิดการรวมโตขึ้น และเกิดการรวมตัวกันมากที่สุด และเมื่อให้ความร้อนจากอุณหภูมิห้องไปยังอุณหภูมิทำละลาย 1,125 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.9(ก) คาดว่าอนุภาคแถมมาไพรม์ขนาดใหญ่ที่มีอยู่ในโครงสร้างจากชิ้นงานที่ได้รับมานั้นมีขนาดเล็กลงเล็กน้อยดังรูปที่ 4.10(ก) และเมื่อชิ้นงานผ่านการทำละลายที่ 1,125 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ดังรูปที่ 4.9(ข) คาดว่าแถมมาไพรม์ขนาดใหญ่ได้ละลายลงสู่เนื้อพื้นเกือบสมบูรณ์เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคสุดท้ายที่เราได้รับหลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคแบบสภาวะ 1-1-1-1 พบว่าอนุภาคแถมมาไพรม์มีขนาดเล็กเป็นขนาดใกล้เคียงกันมาก และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอซึ่งแสดงให้เห็นว่าทุกๆ 1 ชั่วโมงนั้นเพียงพอที่จะละลายอนุภาคแถมมาไพรม์ขนาดใหญ่ที่มีอยู่ซึ่งเกิดจากการเชื่อมสภาพโครงสร้างของชิ้นงานหลังจากการใช้งานได้หมด แต่

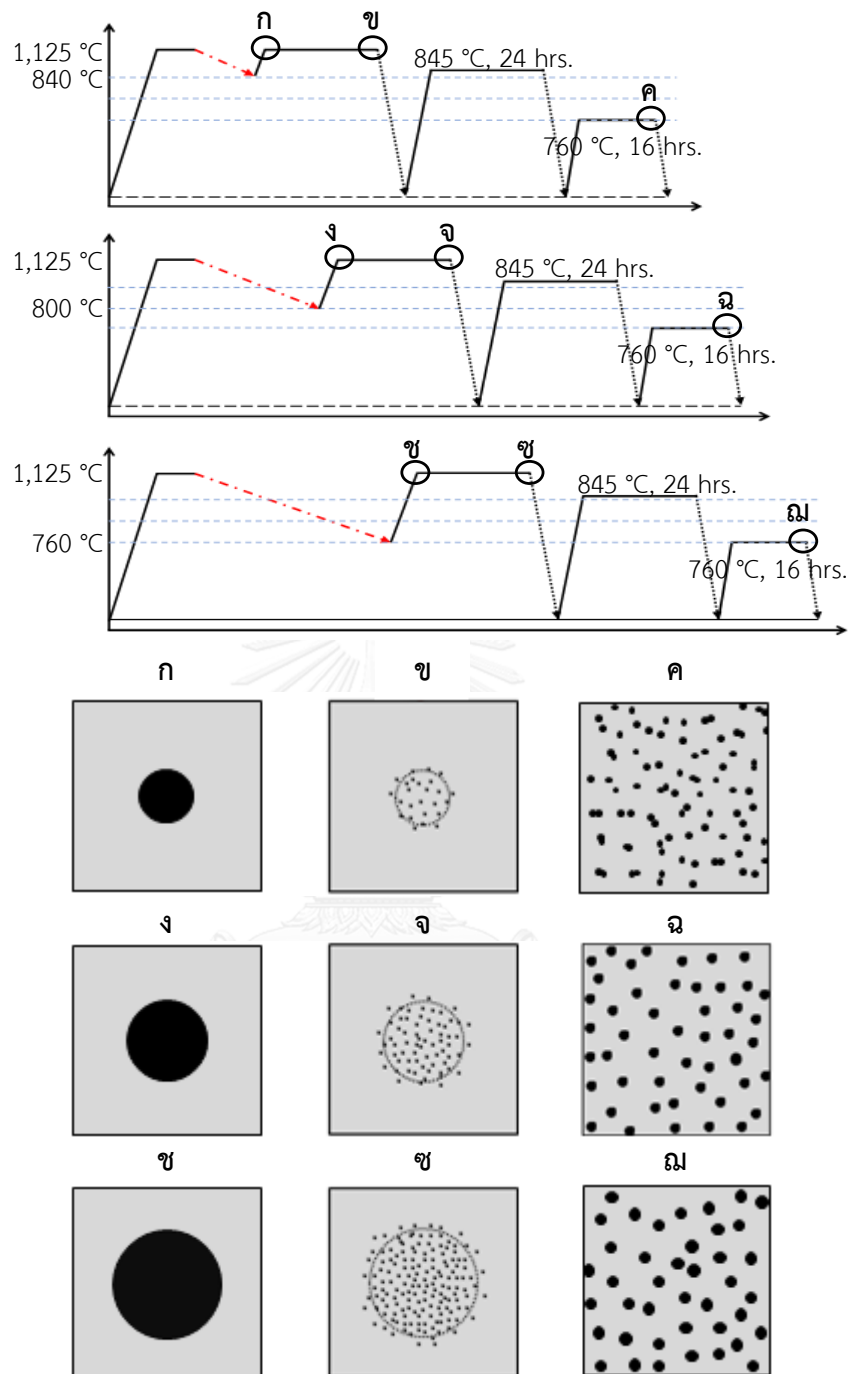
เมื่อเกิดการลดลงของอุณหภูมิระหว่างการทำให้ละลายลงมาที่  $T$  °C ซึ่งมี 3 อุณหภูมิด้วยกันคือ 840, 800 และ 760 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.9(ค) คาดว่าโครงสร้างจะมีลักษณะดังรูปที่ 4.10(ค) โดยมีการตกตะกอนของอนุภาคแกมมาไพร์มออกมาใหม่เนื่องจากการลดลงของอุณหภูมิผ่านช่วงการตกตะกอนโดยอนุภาคแกมมาไพร์มมีขนาดเล็กๆ กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และเมื่อมีการให้ความร้อนกลับไปยังอุณหภูมิการทำละลายที่ 1,125 องศาเซลเซียสอีกครั้งดังรูปที่ 4.9(ง) คาดว่าโครงสร้างจุลภาคมีลักษณะดังรูปที่ 4.10(ง) โดยแกมมาไพร์มมีขนาดใหญ่ขึ้นจากรูป 4.10(ค) เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิผ่านช่วงการตกตะกอนอีกครั้งหนึ่งส่งผลทำให้แกมมาไพร์มเกิดการโตขึ้นนั่นเอง แต่เมื่อค้ำไว้ที่อุณหภูมิการทำละลาย 1,125 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ดังรูปที่ 4.9(จ) คาดว่าแกมมาไพร์มที่ตกตะกอนระหว่างการลดลง และเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจระหว่างการทำให้ละลายนั้นสลายลงสู่เนื้อพื้นได้เกือบสมบูรณ์ดังรูปที่ 4.10(จ) และเมื่อเกิดการลดลงของอุณหภูมิจระหว่างการทำให้ละลายลงมาที่  $T$  °C อีกครั้งดังแสดงในรูปที่ 4.9(ฉ) คาดว่าโครงสร้างจะมีลักษณะดังรูปที่ 4.10(ฉ) โดยมีการตกตะกอนของอนุภาคแกมมาไพร์ม ออกมาใหม่เนื่องจากการลดลงของอุณหภูมิผ่านช่วงการตกตะกอนโดยอนุภาคแกมมาไพร์มมีขนาดเล็กๆ กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และเมื่อมีการให้ความร้อนกลับไปยังอุณหภูมิการทำละลายที่ 1,125 องศาเซลเซียสอีกครั้งดังรูปที่ 4.9(ช) เช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.10(ง) โดยคาดว่าโครงสร้างจุลภาคมีลักษณะดังรูปที่ 4.10(ช) โดยแกมมาไพร์มมีขนาดใหญ่ขึ้นจากรูป 4.10(ฉ) เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิผ่านช่วงการตกตะกอนอีกครั้งหนึ่งส่งผลทำให้แกมมาไพร์มเกิดการโตขึ้นนั่นเอง แต่เมื่อค้ำไว้ที่อุณหภูมิการทำละลาย 1,125 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ดังรูปที่ 4.9(ซ) เช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.9(จ) โดยคาดว่าแกมมาไพร์มที่ตกตะกอนระหว่างการลดลง และเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจระหว่างการทำให้ละลายนั้นสลายลงสู่เนื้อพื้นได้เกือบสมบูรณ์ดังรูปที่ 4.10(ซ) และจะวนเกิดการตกตะกอนของแกมมาไพร์มระหว่างการลดลง และเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจระหว่างการทำให้ละลายแล้วสลายลงสู่เนื้อพื้นเกือบสมบูรณ์เมื่อผ่านการละลายที่อุณหภูมิ 1,125 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำให้เมื่อนำชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีการทำให้ละลายไปทำการบ่มแข็งแข็ง 2 ขั้นตอน ตามลำดับแล้วโครงสร้างจุลภาคสุดท้ายของชิ้นงานที่ได้รับมีลักษณะดังรูปที่ 4.6 ซึ่งอนุภาคแกมมาไพร์มในโครงสร้างจุลภาคสุดท้ายมีขนาดเดียวใกล้เคียงกัน และมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ



รูปที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคระหว่างการทำละลายของกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของยูดีเมท 520 แบบ 1-1-1-1

#### 4.5 ผลของระดับอุณหภูมิที่ลดลงระหว่างการทำละลายต่อขนาดของอนุภาคภาคแกมมาไพร์ม

การศึกษาครั้งนี้มีการศึกษาผลต่างของระดับการลดลงของอุณหภูมิระหว่างการทำละลายโดยอุณหภูมิที่ใช้ศึกษามี 3 อุณหภูมิด้วยกันคือ 840, 800 และ 760 องศาเซลเซียส (สภาวะ A, B และ C ตามลำดับ) ดังรูปที่ 4.11 ซึ่งส่งผลต่อขนาดของอนุภาคแกมมาไพร์มที่ตกตะกอนอยู่ในโครงสร้างจุลภาคสุดท้ายโดยการลดลงของอุณหภูมินั้นยิ่งลดลงมาต่ำยิ่งจะทำให้ขนาดของอนุภาคแกมมาไพร์มมีขนาดค่อยๆใหญ่ขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากขณะที่อุณหภูมิลดลงระหว่างการทำละลายนั้นอุณหภูมิจะค่อยๆลดลงอย่างช้าๆผ่านช่วงอุณหภูมิการตกตะกอนของแกมมาไพร์มทำให้แกมมาไพร์มมีขนาดค่อยๆใหญ่ขึ้นดังรูปที่ 4.11(ก), (ง) และ(ข) ตามลำดับ และเมื่อให้ความร้อนกลับไปยังอุณหภูมิทำละลายที่ 1,125 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงเป็นอย่างน้อยทำให้แกมมาไพร์มทั้งหมดสลายลงสู่เนื้อพื้น



รูปที่ 4.11 ผลของการลดลงของอุณหภูมิระหว่างการทำละลายต่อขนาดอนุภาคแกมมาไพร์ม

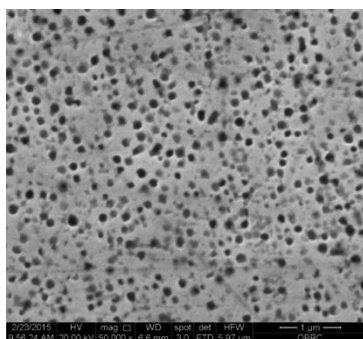
การที่อนุภาคแกมมาไพร์มขนาดใหญ่กว่าละลายลงสู่เนื้อพื้นนั้นจะทำให้บริเวณที่อนุภาคแกมมาไพร์มเคยอยู่เดิมนั้นหนาแน่นไปด้วยธาตุที่จับตัวรวมกันเป็นแกมมาไพร์ม นั่นก็คือ ธาตุ อะลูมิเนียม, ไทเทเนียม และนิกเกิลมากกว่าบริเวณที่มีเคยมีอนุภาคแกมมาไพร์มขนาดเล็กอยู่เดิม ดังรูปที่ 4.11 (ข), (จ) และ(ช) โดยที่คาดว่า (ข) จะมีปริมาณธาตุที่จับตัวรวมกันเป็นแกมมาไพร์มน้อยที่สุด และ(จ) มีปริมาณธาตุดังกล่าวมากขึ้นส่วน (ช) มีปริมาณธาตุดังกล่าวมากที่สุดตามขนาดอนุภาค

แกมมาไพร์มที่เกิดขึ้นระหว่างการลดลง และเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิระหว่างการทำละลายนั่นเองโดยเมื่อนำไปทำการบ่มแข็ง 2 ขั้นตอนตามลำดับ จึงทำให้ชิ้นงานที่มีการกระจายตัวของธาตุที่จับตัวรวมกันเป็นแกมมาไพร์มซึ่งกระจายอยู่ใกล้กันมากกว่า และมีปริมาณหนาแน่นมากกว่าหลังจากกรรมวิธีการละลายนั้นเมื่อนำไปทำการบ่มแข็งต่อจึงทำให้เกิดการรวมตัวกันเป็นอนุภาคแกมมาไพร์มที่ได้มีขนาดใหญ่กว่าชิ้นงานที่มีธาตุที่จับตัวรวมกันเป็นแกมมาไพร์มซึ่งกระจายอยู่ห่างกันมากกว่า และมีปริมาณหนาแน่นน้อยกว่าซึ่งจากรูปที่ 4.11 จะพบว่าขนาดของอนุภาคแกมมาไพร์มนั้นค่อยๆเพิ่มขึ้นตามระดับการลดลงของอุณหภูมิระหว่างการทำละลายที่เราใช้ศึกษา กล่าวคือ การลดลงของอุณหภูมิระหว่างการทำละลายลงมาที่ 840 องศาเซลเซียส (สภาวะ A) มีขนาดอนุภาคแกมมาไพร์มเล็กที่สุด และขนาดของอนุภาคแกมมาไพร์มมีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่อการลดลงของอุณหภูมิระหว่างการทำละลายลงมาที่ 800 องศาเซลเซียส (สภาวะ B) และ 760 องศาเซลเซียส (สภาวะ C) ตามลำดับ

#### 4.6 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนและทำการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง

##### 4.6.1 ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะมาตรฐาน

ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะมาตรฐานหลังจำลองการใช้งานที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.12 ซึ่งพบว่าอนุภาคแกมมาไพร์มมีขนาดโตขึ้นจากสภาวะในหัวข้อ 4.3.1 โดยมีขนาดพื้นที่เฉลี่ยของแกมมาไพร์มที่วัดได้มีขนาด 0.0094 ตารางไมครอน ซึ่งโตขึ้น 170.47% และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยอยู่ที่ประมาณ 22.83 การให้ความร้อนแก่ชิ้นงานที่อุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลาอันส่งผลให้การแพร่เกิดขึ้นจึงเกิดการรวมตัวกันของอนุภาคแกมมาไพร์มขึ้นส่งผลให้อนุภาคแกมมาไพร์มนั้นมีขนาดอนุภาคที่โตขึ้นนั่นเอง



รูปที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบมาตรฐานหลังผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง (กำลังขยาย 50,000 เท่า)

#### 4.6.2 ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ 1-3

##### 4.6.2.ก. ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ A 1-3

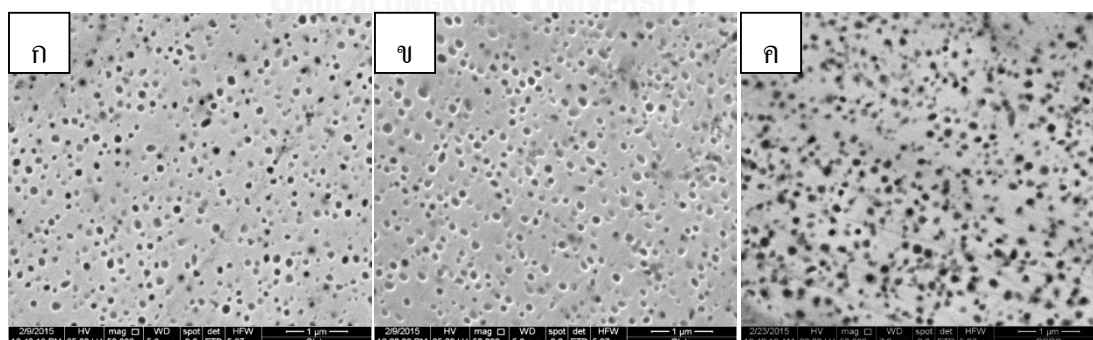
ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ A 1-3 หลังจำลองการใช้งานที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.13(ก) ซึ่งพบว่าอนุภาคแกมมาไพร์มมีขนาดโตขึ้นจากสภาวะในหัวข้อ 4.3.2.ก โดยมีขนาดพื้นที่เฉลี่ยของแกมมาไพร์มที่วัดได้มีขนาด 0.0053 ตารางไมครอน และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าอยู่ที่ประมาณ 23.85

##### 4.6.2.ข. ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ B 1-3

ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ B 1-3 หลังจำลองการใช้งานที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.13(ข) ซึ่งพบว่าอนุภาคแกมมาไพร์มมีขนาดโตขึ้นจากสภาวะในหัวข้อ 4.3.2.ข โดยมีขนาดพื้นที่เฉลี่ยของแกมมาไพร์มที่วัดได้มีขนาด 0.0062 ตารางไมครอน และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าอยู่ที่ประมาณ 24.94

##### 4.6.2.ค. ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ C 1-3

ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ C 1-3 หลังจำลองการใช้งานที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.13(ค) ซึ่งพบว่าอนุภาคแกมมาไพร์มมีขนาดโตขึ้นจากสภาวะในหัวข้อ 4.3.2.ค โดยมีขนาดพื้นที่เฉลี่ยของแกมมาไพร์มที่วัดได้มีขนาด 0.0096 ตารางไมครอน และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าอยู่ที่ประมาณ 26.03



รูปที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ (ก) A 1-3 (ข) B 1-3 และ (ค) C 1-3 หลังผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง (กำลังขยาย 50,000 เท่า)

ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ A 1-3, B 1-3 และ C 1-3 หลังจำลองการใช้งานที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง พบว่าอนุภาคแกมมาไพร์มมีขนาดใหญ่ขึ้นโดย



สภาวะ A 1-3 และ B 1-3 แกมมาไพร์มมีขนาดโตขึ้นเฉลี่ย 0.0058 ตารางไมครอน และโตขึ้นจากหัวข้อ 4.3.2 ในช่วงที่ใกล้เคียงกันโดยเฉลี่ยคิดเป็น 193.13% อีกทั้งร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าประมาณเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกันโดยเพิ่มจากเดิมเล็กน้อยส่วนสภาวะ C 1-3 มีการโตขึ้นมากกว่าสภาวะ A 1-3 และ B 1-3 อย่างมากซึ่งอาจเป็นผลจากการลดลงของอุณหภูมิระหว่างการทำละลายลงมามากที่สุดโดยมีขนาดแกมมาไพร์มเฉลี่ย 0.0096 ตารางไมครอน และการโตขึ้นคิดเป็น 314.33% จากหัวข้อ 4.3.2 ร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นของสภาวะ A 1-3, B 1-3 และ C 1-3 มีขนาดและร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นยังคงค่อยๆเพิ่มขึ้นตามลำดับซึ่งเป็นผลจากโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคแบบสภาวะ 1-3 ในขั้นต้นก่อนนำมาจำลองการใช้งานนั่นเอง

#### 4.6.3 ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ 2-2

##### 4.6.3.ก. ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ A 2-2

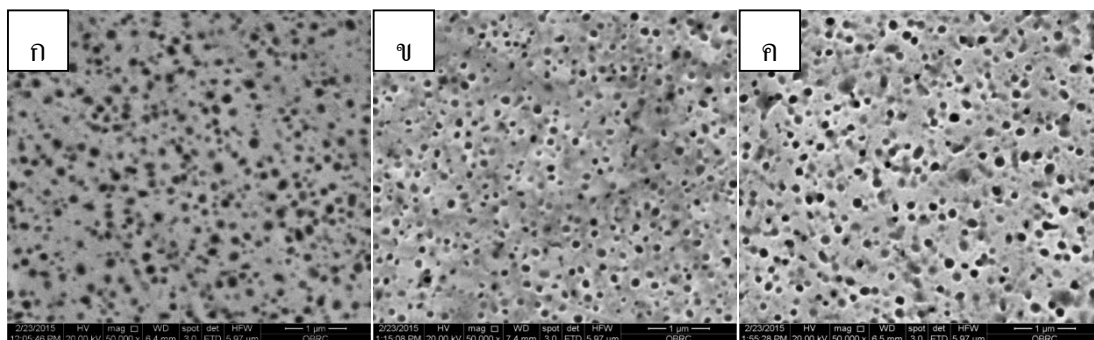
ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ A 2-2 หลังจำลองการใช้งานที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.14(ก) ซึ่งพบว่าอนุภาคแกมมาไพร์มมีขนาดโตขึ้นจากสภาวะในหัวข้อ 4.3.3.ก โดยมีขนาดพื้นที่เฉลี่ยของแกมมาไพร์มที่วัดได้มีขนาด 0.0081 ตารางไมครอน และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าอยู่ที่ประมาณ 22.83

##### 4.6.3.ข. ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ B 2-2

ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ B 2-2 หลังจำลองการใช้งานที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.14(ข) ซึ่งพบว่าอนุภาคแกมมาไพร์มมีขนาดโตขึ้นจากสภาวะในหัวข้อ 4.3.3.ข โดยมีขนาดพื้นที่เฉลี่ยของแกมมาไพร์มที่วัดได้มีขนาด 0.0093 ตารางไมครอน และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าอยู่ที่ประมาณ 23.07

##### 4.6.3.ค. ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ C 2-2

ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ C 2-2 หลังจำลองการใช้งานที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.14(ค) ซึ่งพบว่าอนุภาคแกมมาไพร์มมีขนาดโตขึ้นจากสภาวะในหัวข้อ 4.3.3.ค โดยมีขนาดพื้นที่เฉลี่ยของแกมมาไพร์มที่วัดได้มีขนาด 0.0113 ตารางไมครอน และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าอยู่ที่ประมาณ 23.78



**รูปที่ 4.14** โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ (ก) A 2-2 (ข) B 2-2 และ (ค) C 2-2 หลังผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง (กำลังขยาย 50,000 เท่า)

ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ A 2-2, B 2-2 และ C 2-2 หลังจำลองการใช้งานที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง พบว่าอนุภาคแกมมาไพร์มมีขนาดใหญ่ขึ้นโดยมีขนาดเฉลี่ย 0.0096 ตารางไมครอน และโตขึ้นจากหัวข้อ 4.3.3 ในช่วงที่เท่าๆกันโดยเฉลี่ยคิดเป็น 254.82% อีกทั้งร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าประมาณเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกันโดยเพิ่มจากเดิมเล็กน้อยซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับหัวข้อ 4.3.3 คือขนาดอนุภาคแกมมาไพร์ม และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นของสภาวะ A 2-2, B 2-2 และ C 2-2 หลังจำลองการใช้งานที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง มีขนาดและร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นยังคงค่อยๆเพิ่มขึ้นตามลำดับซึ่งเป็นผลจากโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคแบบสภาวะ 2-2 ในขั้นต้นก่อนนำมาจำลองการใช้งานนั่นเอง

#### 4.6.4 ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ 3-1

##### 4.6.4.ก. ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ A 3-1

ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ A 3-1 หลังจำลองการใช้งานที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.15(ก) ซึ่งพบว่าอนุภาคแกมมาไพร์มมีขนาดโตขึ้นจากสภาวะในหัวข้อ 4.3.4.ก โดยมีขนาดพื้นที่เฉลี่ยของแกมมาไพร์มที่วัดได้มีขนาด 0.0058 ตารางไมครอน และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าอยู่ที่ประมาณ 23.06

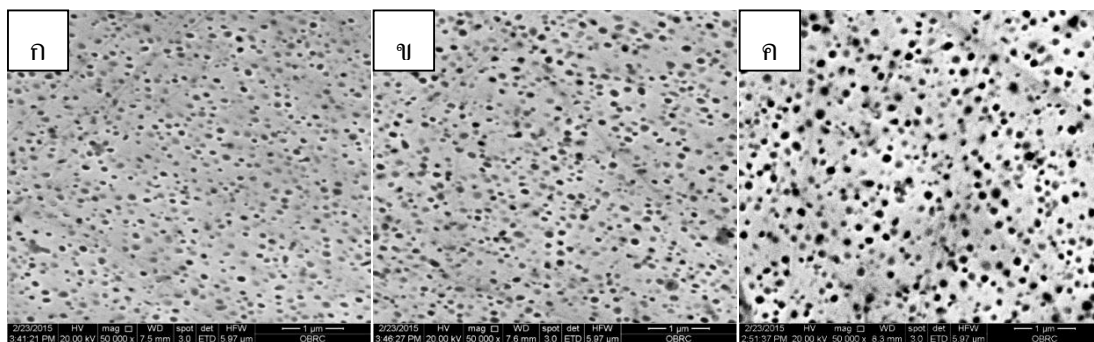
##### 4.6.4.ข. ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ B 3-1

ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ B 3-1 หลังจำลองการใช้งานที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.15(ข) ซึ่งพบว่าอนุภาคแกมมาไพร์มมีขนาดโตขึ้นจากสภาวะในหัวข้อ 4.3.4.ข โดยมีขนาดพื้นที่เฉลี่ยของแกมมาไพร์มที่วัดได้

มีขนาด 0.0065 ตารางไมครอน และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าอยู่ที่ประมาณ 23.79

#### 4.6.4.ค. ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ C 3-1

ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ C 3-1 หลังจำลองการใช้งานที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.15(ค) ซึ่งพบว่าอนุภาคแกมมาไพร์มมีขนาดโตขึ้นจากสภาวะในหัวข้อ 4.3.4.ค โดยมีขนาดพื้นที่เฉลี่ยของแกมมาไพร์มที่วัดได้มีขนาด 0.0074 ตารางไมครอน และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าอยู่ที่ประมาณ 26.73



รูปที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ (ก) A 3-1 (ข) B 3-1 และ (ค) C 3-1 หลังผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง (กำลังขยาย 50,000 เท่า)

ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ A 3-1, B 3-1 และ C 3-1 หลังจำลองการใช้งานที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง พบว่าอนุภาคแกมมาไพร์มมีขนาดใหญ่ขึ้นโดยมีขนาดเฉลี่ย 0.0066 ตารางไมครอน และโตขึ้นจากหัวข้อ 4.3.4 โดยค่าใกล้เคียงกันโดยอัตราการโตขึ้นเฉลี่ยคิดเป็น 62.06% อีกทั้งร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าประมาณเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกันโดยเพิ่มจากเดิมเล็กน้อยซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับหัวข้อ 4.3.4 คือขนาดอนุภาคแกมมาไพร์ม และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นของสภาวะ A 3-1, B 3-1 และ C 3-1 หลังจำลองการใช้งานที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง มีขนาดและร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นยังคงค่อยๆเพิ่มขึ้นตามลำดับ

#### 4.6.5 ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ 1-2-1

##### 4.6.5.ก. ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ A 1-2-1

ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ A 1-2-1 หลังจำลองการใช้งานที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.16(ก) ซึ่งพบว่าอนุภาคแกมมาไพร์มมีขนาดโตขึ้นจากสภาวะในหัวข้อ 4.3.5.ก โดยมีขนาดพื้นที่เฉลี่ยของแกมมาไพร์มที่วัดได้

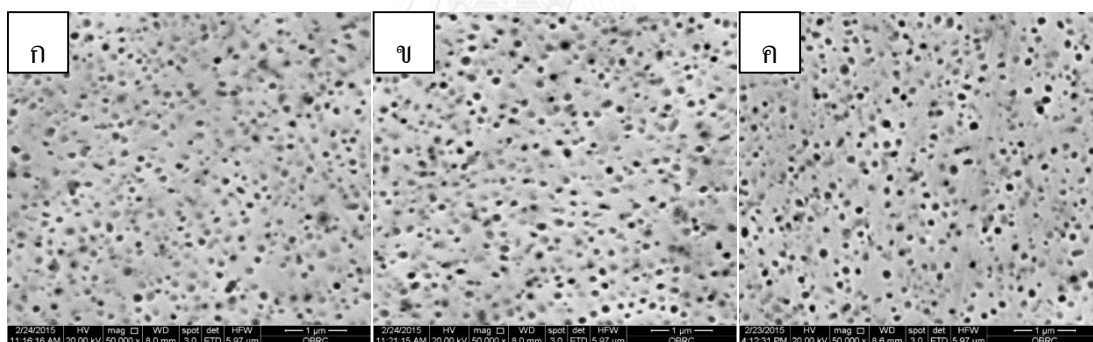
มีขนาด 0.0057 ตารางไมครอน และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าอยู่ที่ประมาณ 25.06

#### 4.6.5.ข. ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ B 1-2-1

ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ B 1-2-1 หลังจำลองการใช้งานที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.16(ข) ซึ่งพบว่าอนุภาคแกมมาไพร์มมีขนาดโตขึ้นจากสภาวะในหัวข้อ 4.3.5.ข โดยมีขนาดพื้นที่เฉลี่ยของแกมมาไพร์มที่วัดได้มีขนาด 0.0082 ตารางไมครอน และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าอยู่ที่ประมาณ 27.09

#### 4.6.5.ค. ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ C 1-2-1

ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ C 1-2-1 หลังจำลองการใช้งานที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.16(ค) ซึ่งพบว่าอนุภาคแกมมาไพร์มมีขนาดโตขึ้นจากสภาวะในหัวข้อ 4.3.5.ค โดยมีขนาดพื้นที่เฉลี่ยของแกมมาไพร์มที่วัดได้มีขนาด 0.0087 ตารางไมครอน และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าอยู่ที่ประมาณ 26.41



รูปที่ 4.16 โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ (ก) A 1-2-1 (ข) B 1-2-1 และ (ค) C 1-2-1 หลังผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง (กำลังขยาย 50,000 เท่า)

ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ A 1-2-1, B 1-2-1 และ C 1-2-1 หลังจำลองการใช้งานที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง พบว่าอนุภาคแกมมาไพร์มมีขนาดใหญ่ขึ้นโดยมีขนาดเฉลี่ย 0.0075 ตารางไมครอน และโตขึ้นจากเดิมอยู่ในช่วงที่เท่าๆกันโดยเฉลี่ยคิดเป็น 64.16% อีกทั้งร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าประมาณเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกันโดยเพิ่มจากเดิมเล็กน้อยซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับหัวข้อ 4.3.5 คือขนาดอนุภาคแกมมาไพร์มของสภาวะ A 1-2-1, B 1-2-1 และ C 1-2-1 หลังจำลองการใช้งานที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง มีขนาดค่อยๆเพิ่มขึ้นตามลำดับ

#### 4.6.6 ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ 1-1-1-1

##### 4.6.6.ก. ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ A 1-1-1-1

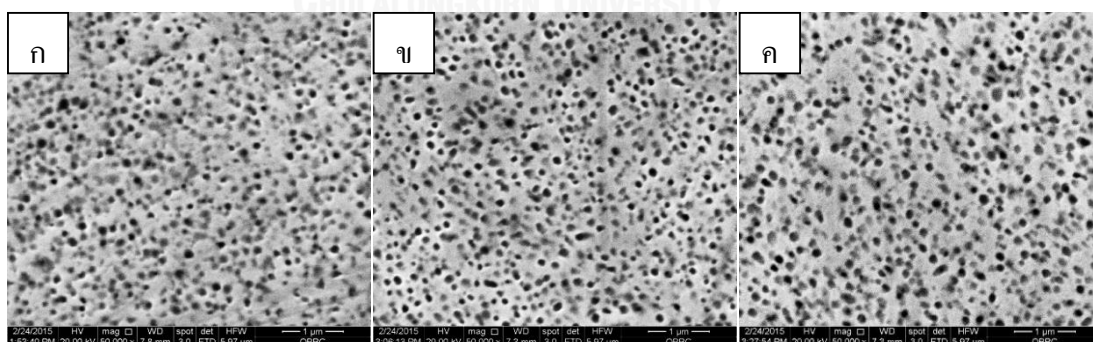
ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ A 1-1-1-1 หลังจำลองการใช้งานที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.17(ก) ซึ่งพบว่าอนุภาคแกมมาไพร์มมีขนาดโตขึ้นจากสภาวะในหัวข้อ 4.3.6.ก และเริ่มมีการรวมตัวกันของอนุภาคแกมมาไพร์ม โดยมีขนาดพื้นที่เฉลี่ยของแกมมาไพร์มที่วัดได้มีขนาด 0.0124 ตารางไมครอน และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าอยู่ที่ประมาณ 27.97

##### 4.6.6.ข. ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ B 1-1-1-1

ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ B 1-1-1-1 หลังจำลองการใช้งานที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.17(ข) ซึ่งพบว่าอนุภาคแกมมาไพร์มมีขนาดโตขึ้นจากสภาวะในหัวข้อ 4.3.6.ข และเริ่มมีการรวมตัวกันของอนุภาคแกมมาไพร์ม โดยมีขนาดพื้นที่เฉลี่ยของแกมมาไพร์มที่วัดได้มีขนาด 0.0143 ตารางไมครอน และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าอยู่ที่ประมาณ 29.39

##### 4.6.6.ค. ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ C 1-1-1-1

ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ C 1-1-1-1 หลังจำลองการใช้งานที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.17(ค) ซึ่งพบว่าอนุภาคแกมมาไพร์มมีขนาดโตขึ้นจากสภาวะในหัวข้อ 4.3.6.ค และเริ่มมีการรวมตัวกันของอนุภาคแกมมาไพร์ม โดยมีขนาดพื้นที่เฉลี่ยของแกมมาไพร์มที่วัดได้มีขนาด 0.0148 ตารางไมครอน และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าอยู่ที่ประมาณ 30.56

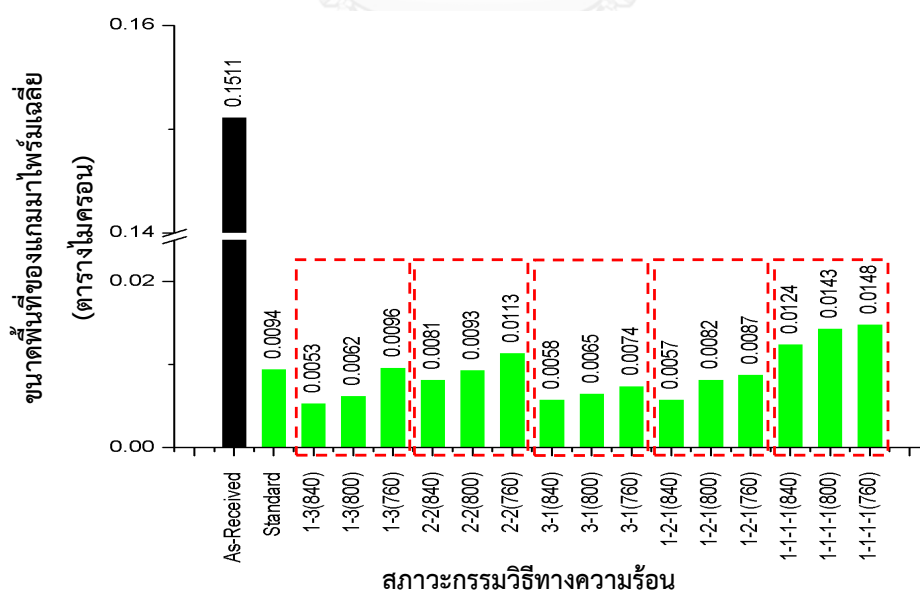


รูปที่ 4.17 โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ (ก) A 1-1-1-1 (ข) B 1-1-1-1 และ (ค) C 1-1-1-1 หลังผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง (กำลังขยาย 50,000 เท่า)

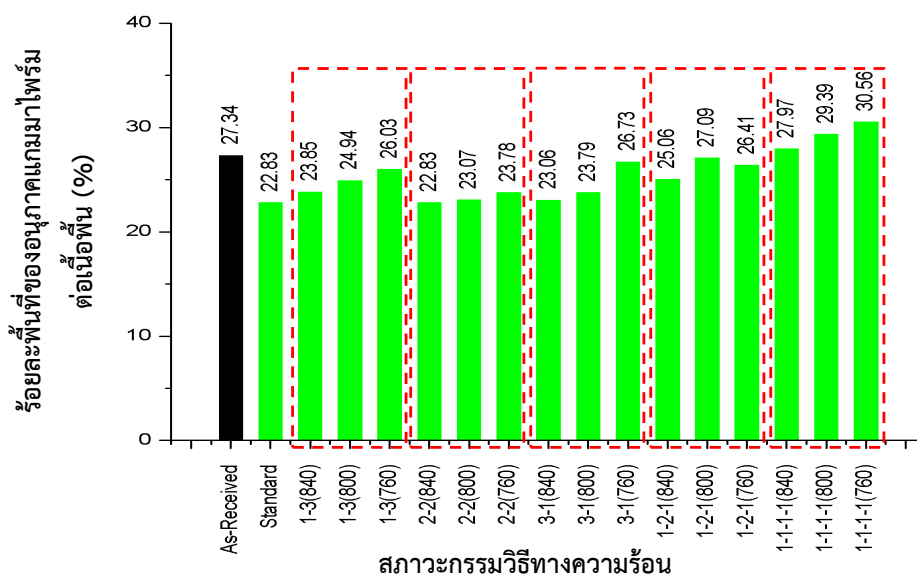
ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ A 1-1-1-1, B 1-1-1-1 และ C 1-1-1-1 หลังจำลองการใช้งานที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง พบว่าอนุภาคแกมมาไพร์มมี

ขนาดใหญ่ขึ้นและมีการรวมตัวกันของอนุภาคแกมมาไพร์มโดยมีขนาดเฉลี่ย 0.0138 ตารางไมครอน และโตขึ้นจากเดิมอยู่ในช่วงที่เท่าๆกันโดยเฉลี่ยคิดเป็น 76.81% อีกทั้งร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าประมาณเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกันโดยเพิ่มจากเดิมเล็กน้อยซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับหัวข้อ 4.2.6 คือขนาดอนุภาคแกมมาไพร์ม และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นของสภาวะ A 1-1-1-1, B 1-1-1-1 และ C 1-1-1-1 หลังจำลองการใช้งานที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง มีขนาดและร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นยังคงค่อยๆเพิ่มขึ้นตามลำดับ อีกทั้งชิ้นงานผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ 1-1-1-1 มาก่อนทำการจำลองการใช้งานซึ่งสภาวะ 1-1-1-1 มีการลดลงของอนุภาคระหว่างการทำละลายมากที่สุดถึง 3 ครั้ง ยิ่งทำให้อนุภาคแกมมาไพร์มมีการโตขึ้นอย่างมากเมื่อเทียบกับสภาวะที่ใช้ในการทดลองอื่นๆทั้งหมด

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบหลังผ่านการจำลองการใช้งานที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง พบว่าอนุภาคแกมมาไพร์มยังคงมีขนาด และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าประมาณใกล้เคียงกันซึ่งยืนยันได้ว่าทุกสภาวะการทดลองในกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคนั้นเพียงพอที่จะสามารถละลายอนุภาคแกมมาไพร์มขนาดใหญ่ที่มีอยู่ซึ่งเกิดจากการเสื่อมสภาพของโครงสร้างชิ้นงานหลังการใช้งานได้จึงทำให้แกมมาไพร์มที่โตขึ้นนั้นมีการโตขึ้นที่ใกล้เคียงกัน และมีร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าประมาณเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกันโดยเพิ่มจากเดิมเพียงเล็กน้อยซึ่งดูได้จากรูปที่ 4.18 และ 4.19 ตามลำดับ



รูปที่ 4.18 ขนาดโดยเฉลี่ยของอนุภาคแกมมาไพร์มของชิ้นงานหลังผ่านการจำลองการใช้งานที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง



รูปที่ 4.19 ร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพรม์ต่อเนื้อพินของชิ้นงานหลังผ่านการจำลองการใช้งานที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง

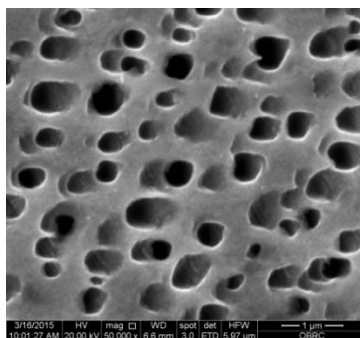
การลดอุณหภูมิระหว่างขั้นตอนการทำละลายในการทำกรรมวิธีทางความร้อนนั้นได้ส่งผลต่อขนาดอนุภาคแกมมาไพรม์โดยสถานะที่มีการลดอุณหภูมิลงมามากจะส่งผลให้แกมมาไพรม์มีขนาดใหญ่กว่าสถานะที่มีการลดอุณหภูมิลงมาน้อยเนื่องจากสถานะที่มีการลดอุณหภูมิลงมากจะใช้เวลาในการทำละลายนานขึ้นส่งผลการแพร่เกิดขึ้นได้นานขึ้นจนเกิดการรวมตัวเป็นอนุภาคแกมมาไพรม์ขนาดใหญ่ขึ้นตามเวลาที่มากขึ้น เมื่อนำมาทำการจำลองการใช้งานที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง ทำให้แกมมาไพรม์มีขนาดใหญ่ขึ้นโดยแนวโน้มยังมีลักษณะเช่นเดียวกับหัวข้อ 4.3 กล่าวคือ สภาวะ A, B และ C จะมีขนาดอนุภาคแกมมาไพรม์ค่อยๆใหญ่ขึ้นเล็กน้อยตามลำดับ

#### 4.7 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนและทำการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง

##### 4.7.1 ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะมาตรฐาน

ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะมาตรฐานหลังจำลองการใช้งานที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.20 ซึ่งพบว่าอนุภาคแกมมาไพรม์มีขนาดโตขึ้นอย่างมากจากสถานะในหัวข้อ 4.3.1 โดยมีการรวมตัวกันของอนุภาคแกมมาไพรม์เกิดขึ้นโดยมีขนาดพื้นที่เฉลี่ยของแกมมาไพรม์ที่วัดได้มีขนาด 0.1579 ตารางไมครอน ซึ่งโตขึ้น 7861.32% และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพรม์ต่อเนื้อพินมีค่ามากขึ้นโดยมีค่าประมาณ 32.56 จากการทดลองพบว่าสภาวะมาตรฐานหลังจำลองการใช้งานที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง มีการโตขึ้นสูงสุดเมื่อเทียบกับสภาวะทดลองอื่นๆรวมถึงมีขนาดใหญ่ใกล้เคียงกับอนุภาค

แกมมาไพร์มขนาดใหญ่ในชิ้นงานที่ได้รับมาซึ่งเกิดจากการเสื่อมสภาพโครงสร้างของชิ้นงานหลังจากการใช้งาน



**รูปที่ 4.20** โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบมาตรฐานหลังผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง (กำลังขยาย 50,000 เท่า)

#### 4.7.2 ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ 1-3

##### 4.7.2.ก. ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ A 1-3

ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ A 1-3 หลังจำลองการใช้งานที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.21(ก) ซึ่งพบว่าอนุภาคแกมมาไพร์มมีขนาดโตขึ้นจากสภาวะในหัวข้อ 4.3.2.ก โดยมีขนาดพื้นที่เฉลี่ยของแกมมาไพร์มที่วัดได้มีขนาด 0.0492 ตารางไมครอน และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าอยู่ที่ประมาณ 26.54

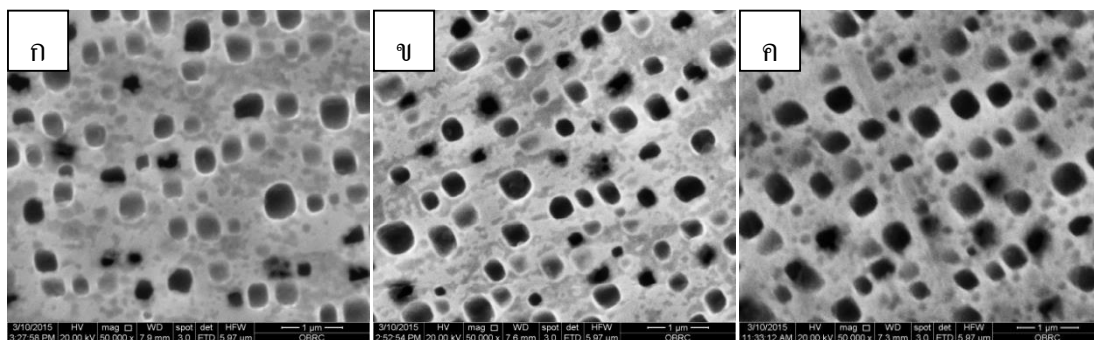
##### 4.7.2.ข. ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ B 1-3

ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ B 1-3 หลังจำลองการใช้งานที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.21(ข) ซึ่งพบว่าอนุภาคแกมมาไพร์มมีขนาดโตขึ้นจากสภาวะในหัวข้อ 4.3.2.ข โดยมีขนาดพื้นที่เฉลี่ยของแกมมาไพร์มที่วัดได้มีขนาด 0.0522 ตารางไมครอน และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าอยู่ที่ประมาณ 26.77

##### 4.7.2.ค. ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ C 1-3

ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ C 1-3 หลังจำลองการใช้งานที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.21(ค) ซึ่งพบว่าอนุภาคแกมมาไพร์มมีขนาดโตขึ้นจากสภาวะในหัวข้อ 4.3.2.ค โดยมีขนาดพื้นที่เฉลี่ยของแกมมาไพร์มที่วัดได้มีขนาด 0.0650 ตารางไมครอน และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าอยู่ที่ประมาณ 27.65





**รูปที่ 4.21** โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ (ก) A 1-3 (ข) B 1-3 และ (ค) C 1-3 หลังผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง (กำลังขยาย 50,000 เท่า)

ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ A 1-3, B 1-3 และ C 1-3 หลังจำลองการใช้งานที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง พบว่าอนุภาคแกมมาไพร์มมีขนาดใหญ่ขึ้นอย่างมากโดยมีการรวมตัวกันของอนุภาคแกมมาไพร์มเกิดขึ้นซึ่งมีขนาดเฉลี่ย 0.0555 ตารางไมครอน และโตขึ้นอย่างมากจากหัวข้อ 4.3.2 โดยมีอัตราการโตขึ้นอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกันโดยเฉลี่ยคิดเป็น 2,565.07% อีกทั้งร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าประมาณเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกัน โดยเพิ่มจากเดิมโดยมีค่ามากกว่าหลังจำลองการใช้งานที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง เล็กน้อยอีกทั้งขนาดอนุภาคแกมมาไพร์ม และความหนาแน่นเฉลี่ยต่อพื้นที่ของเฟสแกมมาไพร์มของสภาวะ A 1-3, B 1-3 และ C 1-3 มีขนาดและร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นยังคงค่อยๆเพิ่มขึ้นตามลำดับ

#### 4.7.3 ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ 2-2

##### 4.7.3.ก. ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ A 2-2

ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ A 2-2 หลังจำลองการใช้งานที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.22(ก) ซึ่งพบว่าอนุภาคแกมมาไพร์มมีขนาดโตขึ้นจากสภาวะในหัวข้อ 4.3.3.ก โดยมีขนาดพื้นที่เฉลี่ยของแกมมาไพร์มที่วัดได้มีขนาด 0.0463 ตารางไมครอน และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าอยู่ที่ประมาณ 23.07

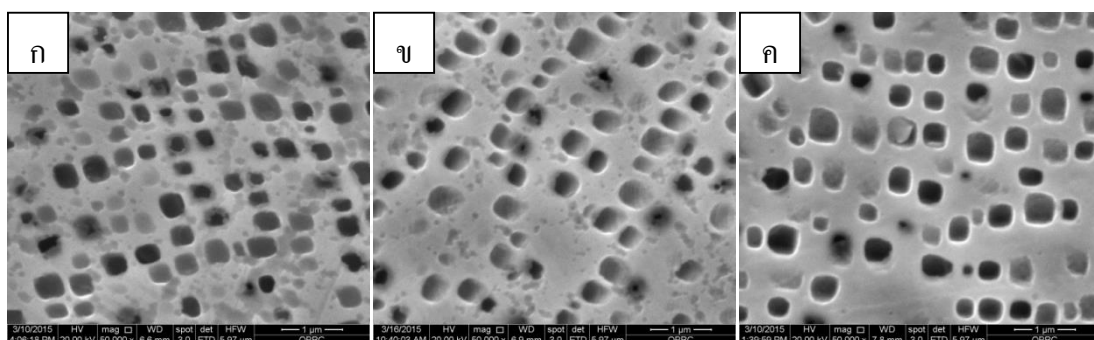
##### 4.7.3.ข. ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ B 2-2

ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ B 2-2 หลังจำลองการใช้งานที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.22(ข) ซึ่งพบว่าอนุภาคแกมมาไพร์มมีขนาดโตขึ้นจากสภาวะในหัวข้อ 4.3.3.ข โดยมีขนาดพื้นที่เฉลี่ยของแกมมาไพร์มที่วัดได้

มีขนาด 0.0637 ตารางไมครอน และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าอยู่ที่ประมาณ 23.34

#### 4.7.3.ค. ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ C 2-2

ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ C 2-2 หลังจำลองการใช้งานที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.22(ค) ซึ่งพบว่าอนุภาคแกมมาไพร์มมีขนาดโตขึ้นจากสภาวะในหัวข้อ 4.3.3.ค โดยมีขนาดพื้นที่เฉลี่ยของแกมมาไพร์มที่วัดได้มีขนาด 0.0835 ตารางไมครอน และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าอยู่ที่ประมาณ 25.39



รูปที่ 4.22 โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ (ก) A 2-2 (ข) B 2-2 และ (ค) C 2-2 หลังผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง (กำลังขยาย 50,000 เท่า)

ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ A 2-2, B 2-2 และ C 2-2 หลังจำลองการใช้งานที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง พบว่าอนุภาคแกมมาไพร์มมีขนาดใหญ่ขึ้นโดยมีขนาดเฉลี่ย 0.0645 ตารางไมครอน และโตขึ้นอย่างมากจากหัวข้อ 4.3.3 โดยมีอัตราการโตขึ้นอยู่ในช่วงที่เท่าๆกันโดยเฉลี่ยคิดเป็น 2,243.71% อีกทั้งร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าประมาณเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกันโดยเพิ่มจากเดิมโดยมีค่ามากกว่าหลังจำลองการใช้งานที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง เล็กน้อยซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับหัวข้อ 4.3.3 คือขนาดอนุภาคแกมมาไพร์ม และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นของสภาวะ A 2-2, B 2-2 และ C 2-2 หลังจำลองการใช้งานที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง มีขนาดและร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นยังคงค่อยๆเพิ่มขึ้นตามลำดับ

#### 4.7.4 ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ 3-1

##### 4.7.4.ก. ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ A 3-1

ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ A 3-1 หลังจำลองการใช้งานที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.23(ก) ซึ่งพบว่าอนุภาค

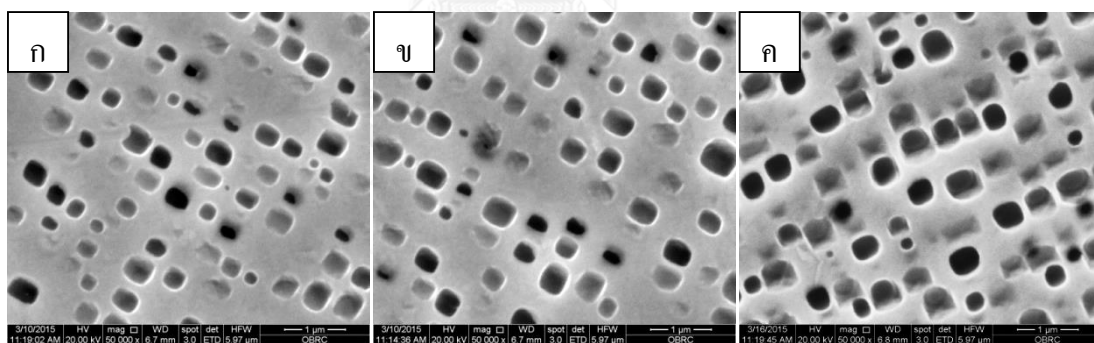
แกมมาไพร์มมีขนาดโตขึ้นจากสถานะในหัวข้อ 4.3.4.ก โดยมีขนาดพื้นที่เฉลี่ยของแกมมาไพร์มที่วัดได้มีขนาด 0.0557 ตารางไมครอน และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าอยู่ที่ประมาณ 23.26

#### 4.7.4.ข. ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ B 3-1

ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ B 3-1 หลังจำลองการใช้งานที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.23(ข) ซึ่งพบว่าอนุภาคแกมมาไพร์มมีขนาดโตขึ้นจากสถานะในหัวข้อ 4.3.4.ข โดยมีขนาดพื้นที่เฉลี่ยของแกมมาไพร์มที่วัดได้มีขนาด 0.0623 ตารางไมครอน และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าอยู่ที่ประมาณ 24.47

#### 4.7.4.ค. ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ C 3-1

ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ C 3-1 หลังจำลองการใช้งานที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.23(ค) ซึ่งพบว่าอนุภาคแกมมาไพร์มมีขนาดโตขึ้นจากสถานะในหัวข้อ 4.3.4.ค โดยมีขนาดพื้นที่เฉลี่ยของแกมมาไพร์มที่วัดได้มีขนาด 0.0861 ตารางไมครอน และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าอยู่ที่ประมาณ 30.18



รูปที่ 4.23 โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ (ก) A 3-1 (ข) B 3-1 และ (ค) C 3-1 หลังผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง (กำลังขยาย 50,000 เท่า)

ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ A 3-1, B 3-1 และ C 3-1 หลังจำลองการใช้งานที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง พบว่าอนุภาคแกมมาไพร์มมีขนาดใหญ่ขึ้นโดยมีขนาดเฉลี่ย 0.0670 ตารางไมครอน และโตขึ้นอย่างมากโดยมีการรวมตัวกันของอนุภาคแกมมาไพร์มเกิดขึ้นจากหัวข้อ 4.3.4 มีอัตราการโตขึ้นอยู่ในช่วงที่เท่าๆกันโดยเฉลี่ยคิดเป็น 2,549.53% อีกทั้งร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าประมาณเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกันโดยเพิ่มจากเดิมโดยมีค่ามากกว่าหลังจำลองการใช้งานที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมงเล็กน้อยซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับหัวข้อ 4.3.4 คือขนาดอนุภาคแกมมาไพร์ม และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อ

เนื้อพื้นของสภาวะ A 3-1, B 3-1 และ C 3-1 หลังจำลองการใช้งานที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง มีขนาดและร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นยังคงค่อยๆเพิ่มขึ้นตามลำดับ

#### 4.7.5 ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ 1-2-1

##### 4.7.5.ก. ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ A 1-2-1

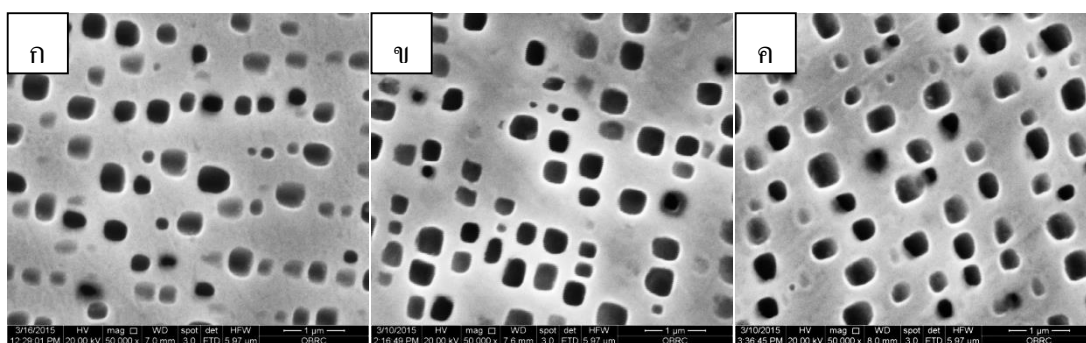
ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ A 1-2-1 หลังจำลองการใช้งานที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.24(ก) ซึ่งพบว่าอนุภาคแกมมาไพร์มมีขนาดโตขึ้นจากสภาวะในหัวข้อ 4.3.5.ก โดยมีขนาดพื้นที่เฉลี่ยของแกมมาไพร์มที่วัดได้มีขนาด 0.0461 ตารางไมครอน และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าอยู่ที่ประมาณ 25.23

##### 4.7.5.ข. ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ B 1-2-1

ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ B 1-2-1 หลังจำลองการใช้งานที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.24(ข) ซึ่งพบว่าอนุภาคแกมมาไพร์มมีขนาดโตขึ้นจากสภาวะในหัวข้อ 4.3.5.ข โดยมีขนาดพื้นที่เฉลี่ยของแกมมาไพร์มที่วัดได้มีขนาด 0.0679 ตารางไมครอน และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าอยู่ที่ประมาณ 27.26

##### 4.7.5.ค. ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ C 1-2-1

ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ C 1-2-1 หลังจำลองการใช้งานที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.24(ค) ซึ่งพบว่าอนุภาคแกมมาไพร์มมีขนาดโตขึ้นจากสภาวะในหัวข้อ 4.3.5.ค โดยมีขนาดพื้นที่เฉลี่ยของแกมมาไพร์มที่วัดได้มีขนาด 0.0735 ตารางไมครอน และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าอยู่ที่ประมาณ 30.93



รูปที่ 4.24 โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ (ก) A 1-2-1 (ข) B 1-2-1 และ (ค) C 1-2-1 หลังผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง (กำลังขยาย 50,000 เท่า)

ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ A 1-2-1, B 1-2-1 และ C 1-2-1 หลังจำลองการใช้งานที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง พบว่าอนุภาคแกมมาไพร์มมีขนาดใหญ่ขึ้นโดยมีขนาดเฉลี่ย 0.0625 ตารางไมครอน ซึ่งโตขึ้นจากเดิมอย่างมากโดยเกิดจากการรวมตัวกันของอนุภาคแกมมาไพร์มโดยโตขึ้นในช่วงที่เท่าๆกันโดยเฉลี่ยคิดเป็น 1,956.39% อีกทั้งร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าประมาณเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกันโดยเพิ่มจากเดิมเล็กน้อย และมีค่ามากกว่าหลังจำลองการใช้งานที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมงเล็กน้อยซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับหัวข้อ 4.3.5 คือขนาดอนุภาคแกมมาไพร์มของสภาวะ A 1-2-1, B 1-2-1 และ C 1-2-1 หลังจำลองการใช้งานที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมงมีขนาดค่อยๆเพิ่มขึ้นตามลำดับ

#### **4.7.6 ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ 1-1-1-1**

##### **4.7.6.ก. ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ A 1-1-1-1**

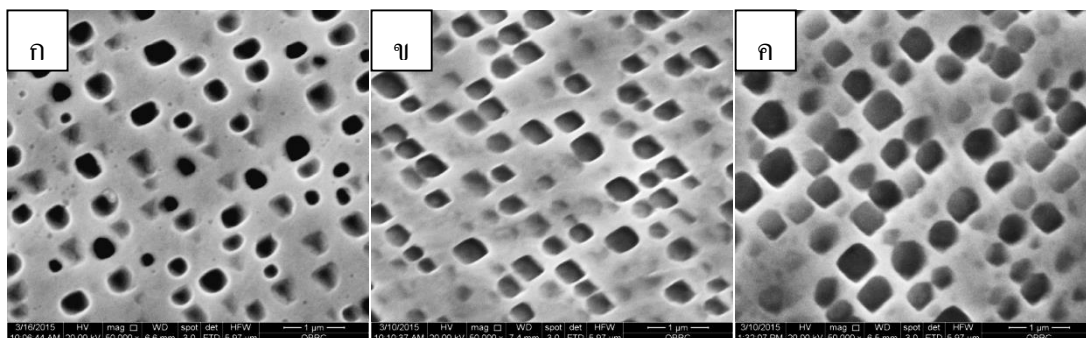
ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ A 1-1-1-1 หลังจำลองการใช้งานที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.25(ก) ซึ่งพบว่าอนุภาคแกมมาไพร์มมีขนาดโตขึ้นจากสภาวะในหัวข้อ 4.3.6.ก โดยมีขนาดพื้นที่เฉลี่ยของแกมมาไพร์มที่วัดได้มีขนาด 0.0614 ตารางไมครอน และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าอยู่ที่ประมาณ 27.61

##### **4.7.6.ข. ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ B 1-1-1-1**

ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ B 1-1-1-1 หลังจำลองการใช้งานที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.25(ข) ซึ่งพบว่าอนุภาคแกมมาไพร์มมีขนาดโตขึ้นจากสภาวะในหัวข้อ 4.3.6.ข โดยมีขนาดพื้นที่เฉลี่ยของแกมมาไพร์มที่วัดได้มีขนาด 0.0735 ตารางไมครอน และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าอยู่ที่ประมาณ 33.53

##### **4.7.6.ค. ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ C 1-1-1-1**

ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ C 1-1-1-1 หลังจำลองการใช้งานที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.25(ค) ซึ่งพบว่าอนุภาคแกมมาไพร์มมีขนาดโตขึ้นจากสภาวะในหัวข้อ 4.3.6.ค โดยมีขนาดพื้นที่เฉลี่ยของแกมมาไพร์มที่วัดได้มีขนาด 0.1162 ตารางไมครอน และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าอยู่ที่ประมาณ 40.35

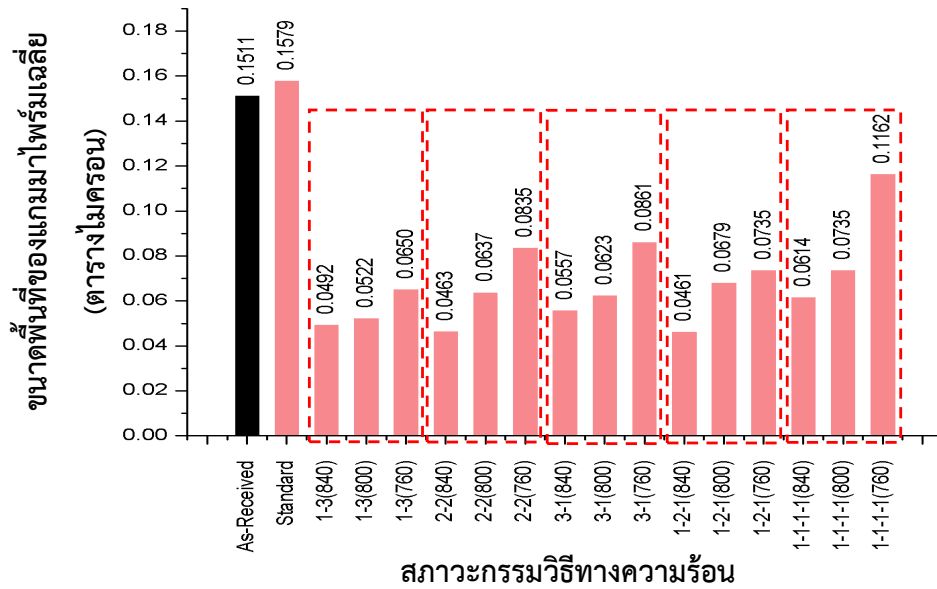


รูปที่ 4.25 โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ (ก) A 1-1-1-1 (ข) B 1-1-1-1 และ (ค) C 1-1-1-1 หลังผ่านการจำลองการ  
ใช้งานที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง (กำลังขยาย 50,000 เท่า)

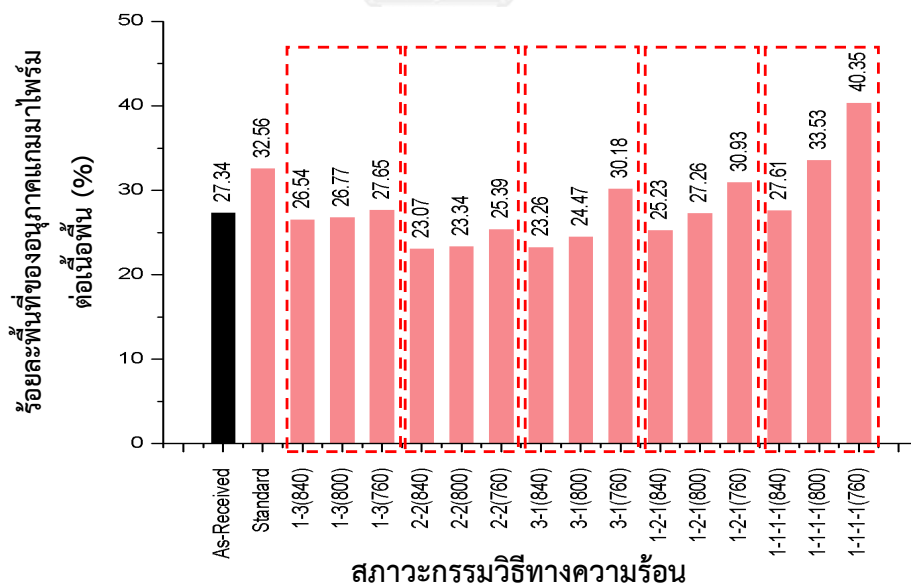
ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ A 1-1-1-1 และ B 1-1-1-1 หลังจำลองการ  
ใช้งานที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง พบว่าอนุภาคแกมมาไพร์มมีขนาดใหญ่ขึ้น  
อย่างมากจากเดิมซึ่งเกิดจากการรวมตัวกันของอนุภาคแกมมาไพร์มโดยมีขนาดเฉลี่ย 0.0675 ตาราง  
ไมครอน และโตขึ้นอยู่ในช่วงที่เท่าๆกันโดยเฉลี่ยคิดเป็น 2,051.18% แต่สภาวะ C 1-1-1-1 หลัง  
จำลองการใช้งานที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมงพบว่าอนุภาคแกมมาไพร์มมีขนาด  
ใหญ่ขึ้นอย่างมากเมื่อเทียบกับ 2 สภาวะที่กล่าวข้างต้นโดยมีขนาดเฉลี่ย 0.1162 ตารางไมครอน และ  
โตขึ้นจากเดิมโดยเฉลี่ยคิดเป็น 3,367.92% ซึ่งการโตที่แตกต่างจาก 2 สภาวะที่กล่าวข้างต้นนี้อาจเกิด  
จากผลของการลดอุณหภูมิในระหว่างขั้นตอนการทำละลายในการทำการกรรมวิธีทางความร้อนที่มีการลด  
อุณหภูมิลงมากที่สุด และใช้ระยะเวลาในการทำละลายนานสุดอีกทั้งยังมีการลดอุณหภูมิตั้งแต่ครั้ง  
ทำให้โครงสร้างที่ได้ไม่เสถียรเมื่อเจออุณหภูมิสูงที่ทำให้เกิดการแพร่ได้ง่ายจึงทำให้แกมมาไพร์มมีขนาดโต  
ขึ้นอย่างมากส่วนร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นของสภาวะ A 1-1-1-1, B 1-1-1-1  
และ C 1-1-1-1 หลังจำลองการใช้งานที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง มีร้อยละ  
พื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นยังคงค่อยๆเพิ่มขึ้นตามลำดับ

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบหลังผ่านการจำลองการใช้งานที่ 900 องศาเซลเซียส  
เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง พบว่าอนุภาคแกมมาไพร์มมีขนาดโตขึ้นจากเดิมอย่างมากเมื่อเทียบกับ  
โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาค  
และโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบหลังผ่านการจำลองการใช้งานที่ 800 องศาเซลเซียส เป็น  
เวลารวม 1,000 ชั่วโมง แต่ยังมีขนาดประมาณอยู่ในช่วงใกล้เคียงกันเช่นเดียวกับค่าร้อยละพื้นที่ของ  
อนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นซึ่งยืนยันได้ว่าทุกสภาวะการทดลองในกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อ  
ปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคนั้นเพียงพอที่จะสามารถละลายอนุภาคแกมมาไพร์มขนาดใหญ่ที่มีอยู่ซึ่งเกิด  
จากการเสื่อมสภาพของโครงสร้างชิ้นงานหลังการใช้งาน และรวมถึงที่ตกตะกอนระหว่างการลด และ

การเพิ่มของอุณหภูมิระหว่างการทำละลายได้จึงทำให้แกมมาไพรม์ที่โตขึ้นนั้นมีการโตขึ้นที่ใกล้เคียงกันและมีร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพรม์ต่อเนื้อพื้นมีค่าประมาณเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกันโดยดูได้จาก รูปที่ 4.26 และ 4.27 ตามลำดับ



รูปที่ 4.26 ขนาดโดยเฉลี่ยของอนุภาคแกมมาไพรม์ของชิ้นงานหลังผ่านการจำลองการใช้งานที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง



รูปที่ 4.27 ร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพรม์ต่อเนื้อพื้นของชิ้นงานหลังผ่านการจำลองการใช้งานที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง

นอกจากนี้โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบหลังผ่านการจำลองการใช้งานที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง ยังพบว่ามี การตกตะกอนของอนุภาคแกมมาไพรม์ออกมาใหม่

บ้างโดยจะเห็นได้จากรูปซึ่งส่วนใหญ่อนุภาคแกมมาไพรม์ที่ตกตะกอนมาใหม่จะมีขนาดเล็กกว่าอนุภาคแกมมาไพรม์ที่โตจากขั้นตอนกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาค หรืออาจเกิดจากการรวมตัวของอนุภาคแกมมาไพรม์ซึ่งมีขนาดเล็กหลายๆในโครงสร้างจุลภาคที่ได้จากขั้นตอนกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคซึ่งมองไม่เห็นในภาพที่ได้มารวมตัวกัน

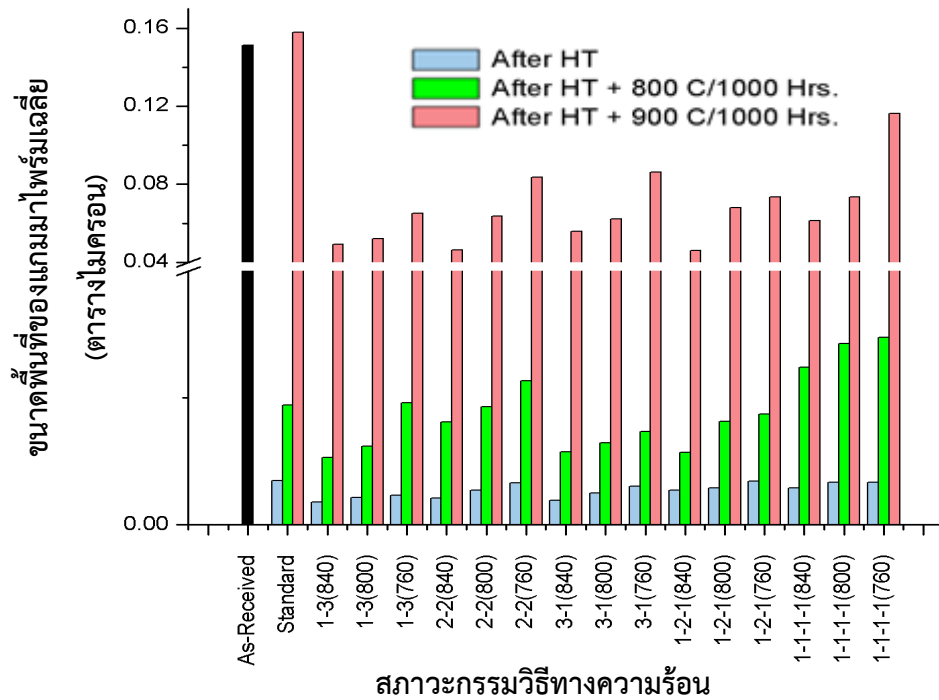
#### 4.8 อภิปรายผลของการทดลองต่อขนาด และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพรม์ต่อเนื้อพื้น

จากผลการทดลองทุกสภาวะที่ได้ทำการทดลองพบว่าการลดอุณหภูมิระหว่างการทำละลายตามสภาวะรูปแบบต่างๆนั้น สภาวะการทดลองที่มีการลดลงของอุณหภูมิลงมาระหว่างการทำละลายมากจะส่งผลทำให้อนุภาคแกมมาไพรม์มีขนาด และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพรม์ต่อเนื้อพื้นมีค่ามากกว่าการทดลองที่มีการลดลงของอุณหภูมิลงมาระหว่างการทำละลายน้อยเล็กน้อยเนื่องจากการที่มีการลดลงของอุณหภูมิทำให้ต้องใช้เวลาดำเนินการเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันกับเมื่อให้ความร้อนเพื่อให้อุณหภูมิกลับสู่อุณหภูมิในการทำละลายอีกครั้ง ดังนั้นยังมีการลดลงของอุณหภูมิระหว่างการทำละลายลงมากยิ่งใช้เวลามาก มีเวลาในการแพร่ ส่งผลทำให้อนุภาคแกมมาไพรม์ที่ได้มีขนาดใหญ่กว่า และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพรม์ต่อเนื้อพื้นมีค่ามากกว่า

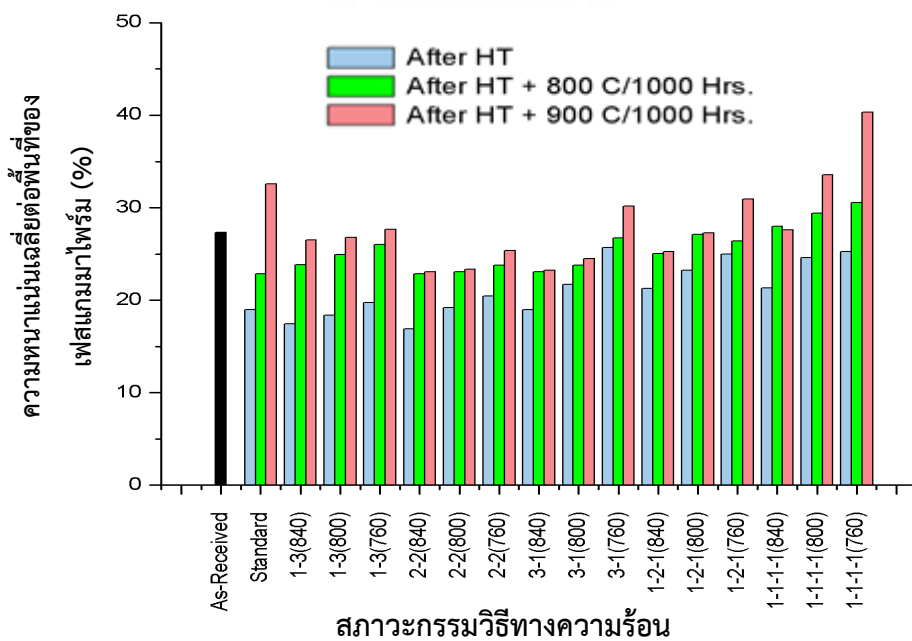
โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคสภาวะแบบต่างๆรวมถึงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนสภาวะแบบต่างๆแล้วทำการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง พบว่าอนุภาคแกมมาไพรม์ส่วนใหญ่มีขนาดใกล้เคียงกันขนาดเดียวในแต่ละสภาวะการทดลอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าทุกสภาวะที่ได้ทำการทดลองโดยผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคสภาวะแบบต่างๆนั้นสามารถละลายอนุภาคแกมมาไพรม์ขนาดใหญ่ที่มีอยู่เนื่องจากการเสื่อมสภาพโครงสร้างของชิ้นงาน และที่เกิดการตกตะกอนใหม่ระหว่างการลดลง และเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิระหว่างการทำละลายได้หมด และเมื่อนำไปทำการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมงต่อก็ส่งผลทำให้แกมมาไพรม์มีขนาดใหญ่ขึ้นซึ่งผลการทดลองที่ได้เป็นผลสอดคล้องจากโครงสร้างของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคสภาวะแบบต่างๆก่อนหน้าที่จะทำการจำลองการใช้งาน ส่วนของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนสภาวะแบบต่างๆแล้วทำการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมงนั้นแกมมาไพรม์มีขนาดโตขึ้นอย่างมากแบบใกล้เคียงกันและมีร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพรม์ต่อเนื้อพื้นมีค่าประมาณเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกัน และพบว่ามีการตกตะกอนของอนุภาคแกมมาไพรม์ ออกมาใหม่บ้างโดยจะเห็นได้จากรูปซึ่งส่วนใหญ่อนุภาคแกมมาไพรม์ที่ตกตะกอนมาใหม่จะมีขนาดเล็กกว่าอนุภาคแกมมาไพรม์ที่โตจากขั้นตอนกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาค หรืออาจเกิดจากการรวมตัวของอนุภาคแกมมาไพรม์ซึ่งมีขนาดเล็กหลายๆในโครงสร้างจุลภาคที่ได้จากขั้นตอน



กรรมวิธีทางความร้อนเพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคซึ่งมองไม่เห็นในภาพที่ได้มารวมตัวกันโดยสรุปได้ ดังรูปที่ 4.28 และ 4.29 ซึ่งแสดงขนาดโดยเฉลี่ยของอนุภาคแกมมาไพร์ม และร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นของชิ้นงานหลังผ่านการทดลองสภาวะต่างๆตามลำดับ



รูปที่ 4.28 ขนาดโดยเฉลี่ยของอนุภาคแกมมาไพร์มของชิ้นงานหลังผ่านการทดลองสภาวะต่างๆ

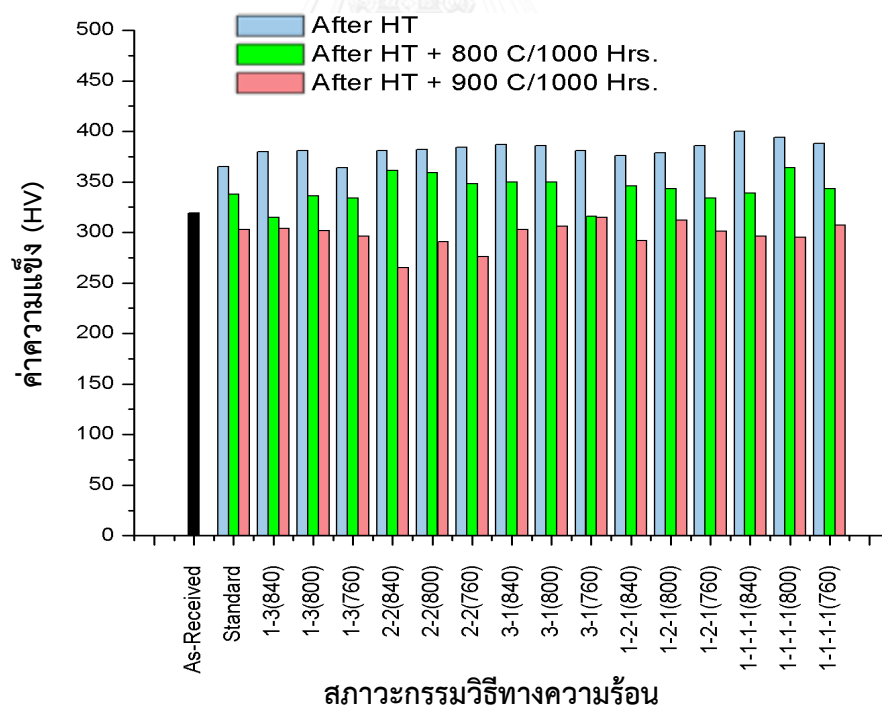


รูปที่ 4.29 ร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นของชิ้นงานหลังผ่านการทดลองสภาวะต่างๆ

ขนาดของอนุภาคแกมมาไพรม์หลังการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับหลังการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง ขนาดของอนุภาคแกมมาไพรม์หลังการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส มีขนาดใหญ่อย่างมากเมื่อเทียบกับหลังการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหากนำชิ้นงานไปงานจริงที่อุณหภูมิสูงกว่า 800 องศาเซลเซียส ให้ระวังการโตของอนุภาคแกมมาไพรม์เพราะเป็นช่วงอุณหภูมิที่มีอิทธิพลต่อการโตของอนุภาคแกมมาไพรม์อย่างมาก

#### 4.9 ความแข็ง

ความแข็งของชิ้นงานหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนรูปแบบต่างๆมีค่าความแข็งใกล้เคียงกัน เช่นเดียวกับกับค่าความแข็งของชิ้นงานหลังทำหลังจำลองการใช้งานที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง และค่าความแข็งของชิ้นงานหลังทำหลังจำลองการใช้งานที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง โดยมีค่าความแข็งเฉลี่ยอยู่ในช่วง 364 - 400 ไมโครวิกเกอร์, 315 - 364 ไมโครวิกเกอร์ และ 265 - 315 ไมโครวิกเกอร์ ตามลำดับดังรูปที่ 4.30



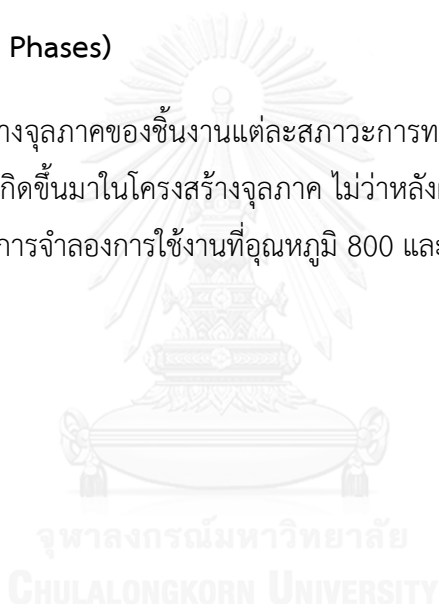
รูปที่ 4.30 ความแข็งโดยเฉลี่ยของชิ้นงานหลังจากการทดลองในสภาวะต่างๆ

ชิ้นงานในสภาวะต่างๆหลังการทำกรรมวิธีการทางความร้อนมีค่าความแข็งสูงสุดซึ่งมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 382 ไมโครวิกเกอร์ อีกทั้งยังมีค่ามากกว่าชิ้นงานที่ได้รับมาในตอนแรกซึ่งมีค่าความแข็งเฉลี่ยอยู่

ที่ 319 ไมโครวิกเกอร์ เนื่องจากโครงสร้างจุลภาคยังไม่เกิดการเชื่อมสภาพจากการใช้งาน อนุภาคแกมมาไพร์มมีขนาดเล็กกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และเมื่อนำชิ้นงานไปทำการจำลองการใช้งานที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคเกิดการรวมตัวกันของแกมมาไพร์ม ทำให้แกมมาไพร์มมีขนาดใหญ่ขึ้นจากเดิมส่งผลให้ค่าความแข็งลดลงโดยมีค่าความแข็งเฉลี่ย 342 ไมโครวิกเกอร์ เช่นเดียวกับชิ้นงานที่ผ่านการจำลองการใช้งานที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง แกมมาไพร์มเกิดการโต และมีการรวมตัวกันมีขนาดใหญ่ขึ้นอย่างมากยิ่งส่งผลทำให้ค่าความแข็งเฉลี่ยลดลงเหลือ 298 ไมโครวิกเกอร์ ซึ่งมีค่าต่ำที่สุดเนื่องจากโครงสร้างจุลภาคเกิดการเชื่อมสภาพสูงสุดแกมมาไพร์มเกิดการรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่ที่สุดเมื่อเทียบกับสภาวะที่กล่าวมาข้างต้น

#### 4.10 เฟสอันตราย (TCP Phases)

พิจารณาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานแต่ละสภาวะการทดลองด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงแล้วไม่พบเฟสที่เป็นอันตรายเกิดขึ้นมาในโครงสร้างจุลภาค ไม่ว่าจะหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนรูปแบบต่างๆ หรือแม้แต่ภายหลังจากจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส รวมเป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมงก็ตาม



## บทที่ 5

### สรุปผล และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผล

1. การลดลงของอุณหภูมิระหว่างขั้นตอนการทำละลายในการทำกรรมวิธีทางความร้อนนั้น ส่งผลต่อขนาดอนุภาคแกมมาไพร์มโดยสถานะที่มีการลดลงของอุณหภูมิมักจะส่งผลให้แกมมาไพร์มมีขนาดใหญ่กว่าสถานะที่มีการลดอุณหภูมิลงมาน้อยเล็กน้อย เนื่องจากสถานะที่มีการลดลงของอุณหภูมิลงมามากจะใช้เวลาในการลดอุณหภูมิลงในช่วงของการทำละลายนานขึ้นส่งผลให้การแพร่เพื่อให้เกิดการตกตะกอนของอนุภาคแกมมาไพร์มมากขึ้น หรือโตขึ้นได้นานขึ้น

2. การลดลงของอุณหภูมิระหว่างขั้นตอนการทำละลายในการทำกรรมวิธีทางความร้อนนั้น ส่งผลต่อค่าร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นโดยสถานะที่มีการลดลงของอุณหภูมิลงมามากจะใช้เวลาในการลดอุณหภูมิลงในช่วงของการทำละลายนานขึ้น ส่งผลทำให้มีค่าร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมากขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับสถานะที่มีการลดอุณหภูมิลงน้อยกว่า

3. ทุกสถานะการทดลอง ไม่ว่าจะมีการลดลงของอุณหภูมิกี่ครั้ง และ/หรือช่วงระยะเวลาในการทำละลายครั้งสุดท้ายจะมีมากน้อยแค่ไหนในการทดลองนี้สามารถละลายอนุภาคแกมมาไพร์มขนาดใหญ่ที่มีอยู่ซึ่งเกิดจากการเชื่อมสภาพโครงสร้างของชิ้นงานหลังจากการใช้งาน รวมถึงที่เกิดการตกตะกอนใหม่ระหว่างการลดลง และเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิระหว่างการทำละลายได้หมด

4. การลดลงของอุณหภูมิระหว่างการทำละลายหลายครั้งส่งผลต่อขนาดอนุภาคแกมมาไพร์ม และค่าร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นเล็กน้อย โดยยังมีการลดลงของอุณหภูมิระหว่างการทำละลายหลายครั้งยิ่งทำให้มีค่ามากขึ้นเล็กน้อย และเมื่อนำไปจำลองการใช้งานเมื่อรวมกับการลดลงของอุณหภูมิที่มากขึ้นระหว่างการทำละลายหลายครั้งส่งผลทำให้โครงสร้างไม่เสถียร โครงสร้างจุลภาคที่ได้รับหลังการจำลองการใช้งานมีการโตของอนุภาคแกมมาไพร์มมากกว่าสถานะที่มีการลดลงของอุณหภูมิระหว่างการทำละลายน้อยครั้ง

5. การจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่าส่งผลต่อขนาดอนุภาคแกมมาไพร์ม และค่าร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นสูงขึ้นเนื่องจากการจำลองสถานะที่อุณหภูมิสูงกว่าเป็นระยะเวลาสั้นส่งผลต่อการรวมตัวของอนุภาคแกมมาไพร์มให้มีขนาดโตขึ้นมากกว่า อีกทั้งอนุภาคแกมมาไพร์มสามารถเกิดการตกตะกอนใหม่ และเร่งอนุภาคแกมมาไพร์มให้โตขึ้นเพิ่มขึ้นจึงส่งผลทำให้ค่าร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพร์มต่อเนื้อพื้นมีค่าสูงขึ้น รวมถึงอุณหภูมิสูงทำให้ธาตุ อะลูมิเนียม และ ไทเทเนียมที่เหลืออยู่ในเนื้อพื้นรอบๆอนุภาคแกมมาไพร์มนั้นแพร่เข้ามารวมตัวกับอนุภาคแกมมาไพร์มที่ตกตะกอนอยู่แล้วได้ง่ายขึ้น

6. จากโครงสร้างจุลภาคสุดท้ายของทุกสภาวะการทดลองแสดงให้เห็นว่าทุกสภาวะการทดลองสามารถละลายอนุภาคแกมมาไพรมขนาดใหญ่ที่มีอยู่เนื่องจากการเสื่อมสภาพโครงสร้างของชิ้นงาน และที่เกิดการตกตะกอนใหม่ระหว่างการลดลง และเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิระหว่างการทำละลายได้หมด

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นระหว่างการทำการรวมการทางความร้อนรูปแบบสภาวะต่างๆโดยการทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วเพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นจริง
2. ศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการใช้อุณหภูมิในการทำละลายที่แตกต่างกัน
3. เพิ่มช่วงความแตกต่างของการลดลงของอุณหภูมิระหว่างการทำละลายเพื่อจะพบความแตกต่างของโครงสร้างทางจุลภาคที่ชัดเจนมากขึ้น
4. ทดสอบสมบัติทางกลอื่นๆเพิ่มเติมเพื่อทำการวิเคราะห์สมบัติทางกลนอกด้านอื่นๆ นอกเหนือจากค่าความแข็งของชิ้นงาน

## รายการอ้างอิง

- [1] ปัญญาวัชร ว่างยาว, เอกสารประกอบ TECHNICAL TRAINING, วิศวกรรมโลหะสำหรับใช้ที่อุณหภูมิสูง ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ, สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2548.
- [2] Sims, C.T. and Hagel, W.C., The Superalloys, John wiley & sons, New York, 1972.
- [3] Donachie, M.J. and Donachie, S.J., Superalloys II: A Technical Guide, ASM International, The United States of America, 2002.
- [4] Chandler, H.E., Heat Treater's Guide : Practices and Procedures for Nonferrous Alloys, ASM International, The United States of America, 1996, pp. 69-70.
- [5] Superalloy Udimet 520. แหล่งที่มา:  
<http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=7739>, 2013.
- [6] Reed, R.C., The Superalloys : Fundamentals and Applications, Cambridge university press, New York, 2008.
- [7] Kazempour-Liacy, H., Abouali, S. and Akbari-Garakani, M., *Failure analysis of a first stage gas turbine blade*, Engineering Failure Analysis, 18 (2011), pp. 517-522.
- [8] Nematzadeha, F., Akbarpoura, M.R., Kokabib, A.H. and Sadrnezhadb, S.K., *Structural changes of radial forging die surface during service under thermo - mechanical fatigue*, Materials Science and Engineering A 527, (2009), pp. 98-102.
- [9] Nematzadeha, F., Akbarpoura, M.R., Kokabib, A.H., Parvizi, S and Sadrnezhadb, S.K., *Effect of welding parameters on microstructure, mechanical properties and hot cracking phenomenon in Udimet 520 superalloy*, Materials and Design 36, (2012), pp. 94-99.
- [10] Moon, D. M. and Wall, F.J., High Temperature Alloys for Gas Turbines and Other Applications 1986, *The effect phase instability on the high temperature stress - rupture properties of representative nickel-base superalloys*, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland, (1986), pp. 115-133.
- [11] Xu, S., Dickson, J.I. and Koul, A.K., *Grain growth and carbide precipitation in superalloy, UDIMET 520*, Metallurgical and materials transaction A, Vol. 29A, (1998), pp. 2687-2693.

- [12] Promboopha, A., Polsilapa, S. and Wangyao, P., *Effect of temperature dropping during solution treatment during rejuvenation heat treatment on final microstructures in cast nickel base superalloys, grade Inconel-738*, Journal of Metals, Materials and Minerals, Vol.25(1), (2015), pp. 69-75.
- [13] ปิยภัทร วงศ์นวปรีชาชัย, ผลของกรรมวิธีละลายต่อโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมพิเศษ GTD-111, ปรินญานินพนธ์, ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.





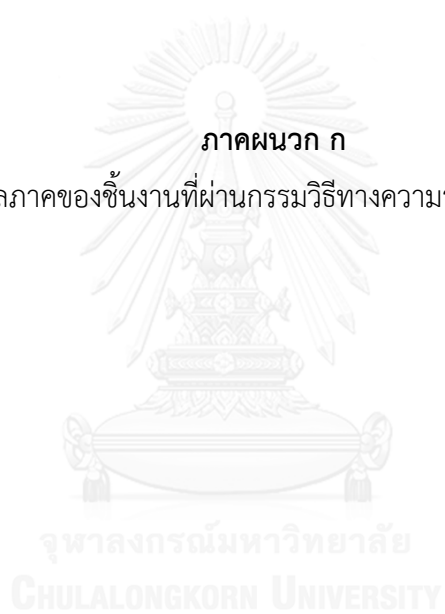
ภาคผนวก

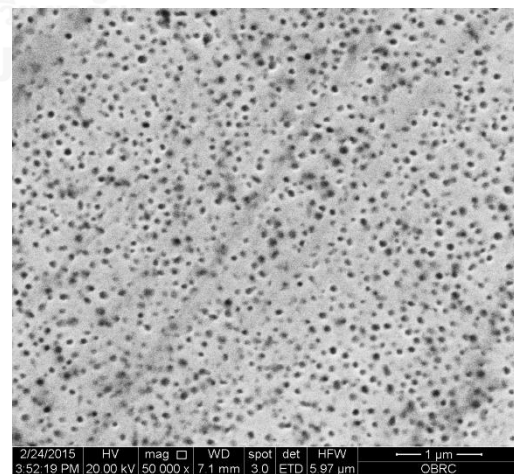
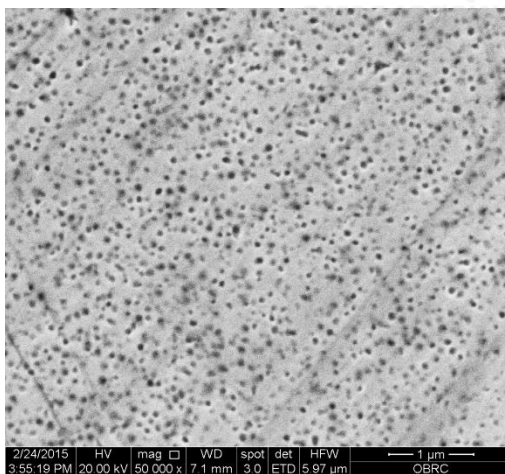
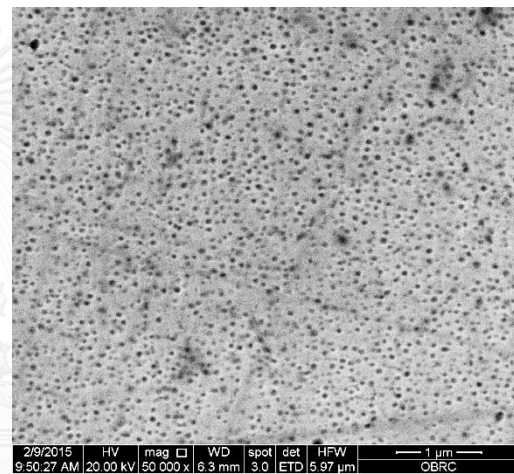
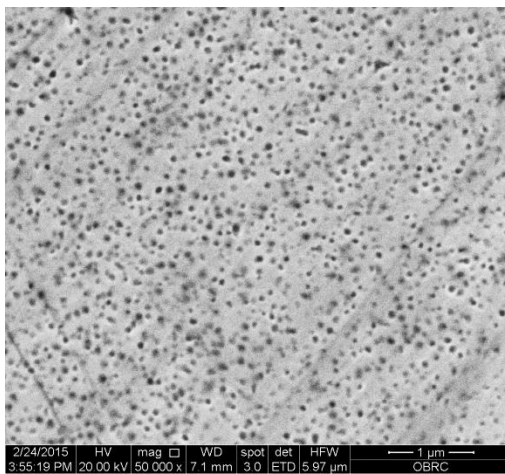
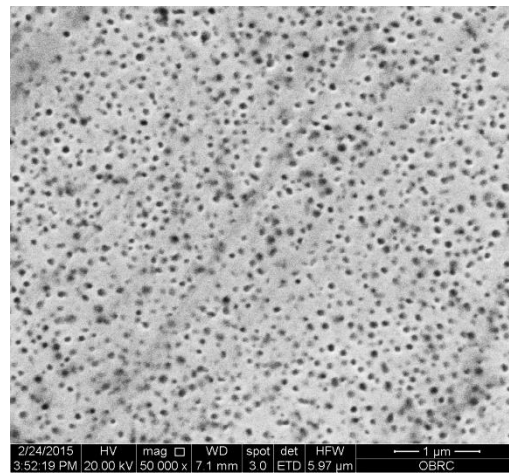
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



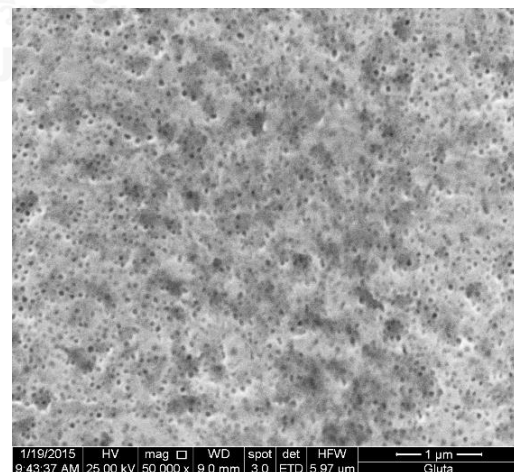
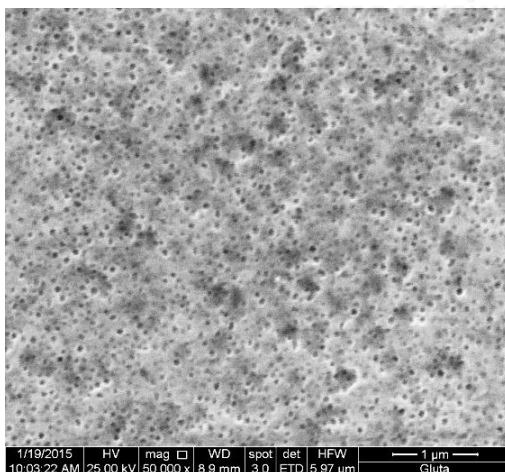
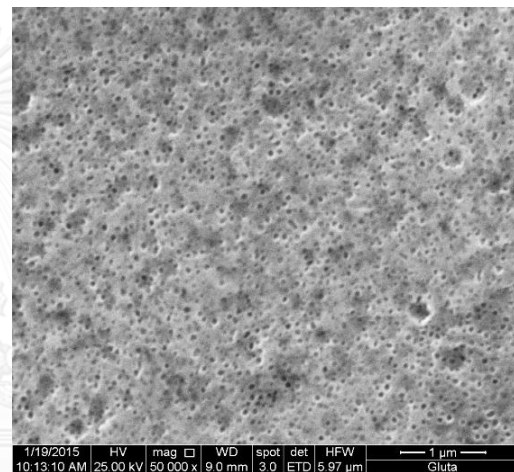
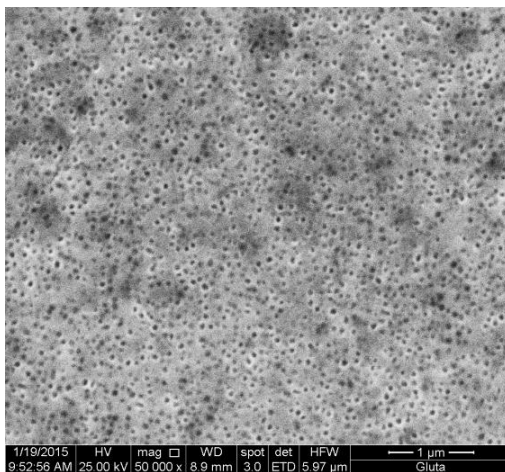
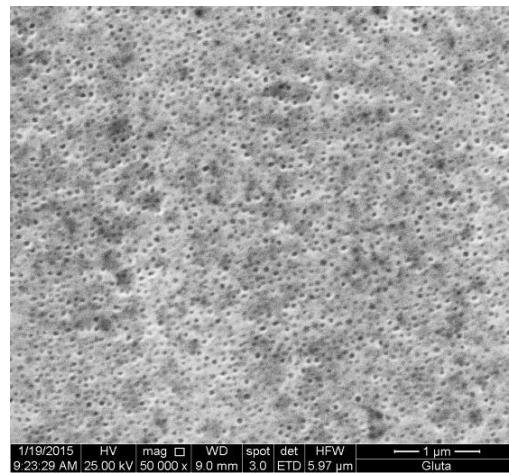
ภาคผนวก ก

(โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะต่างๆ)

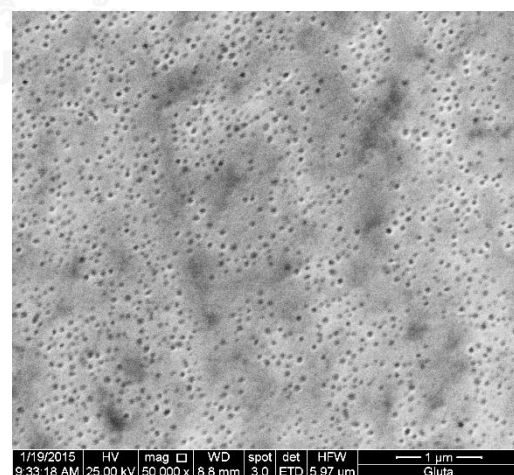
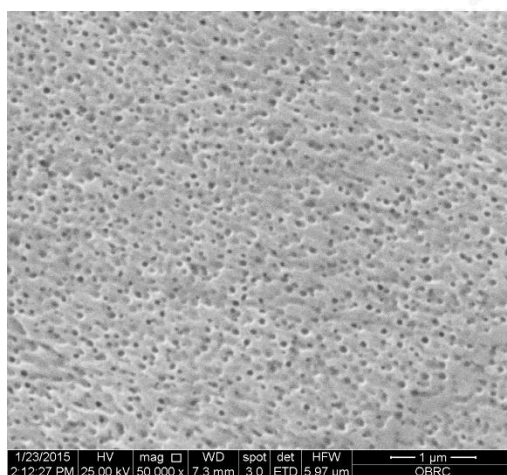
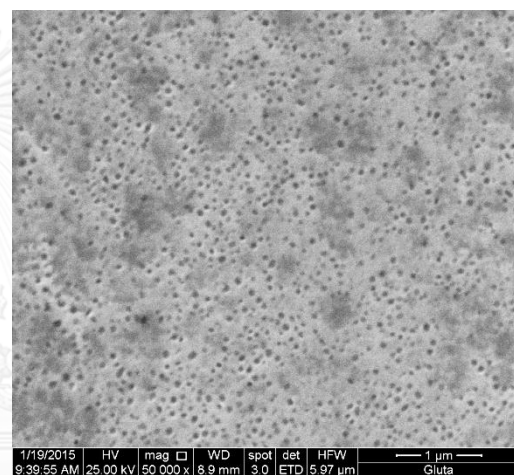
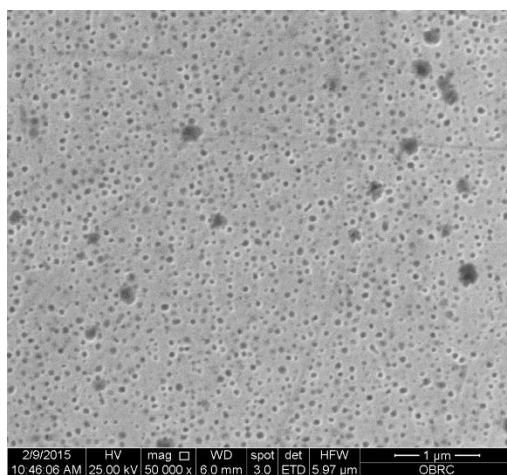
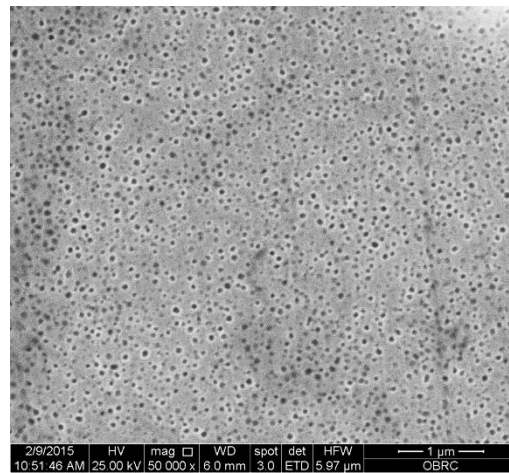




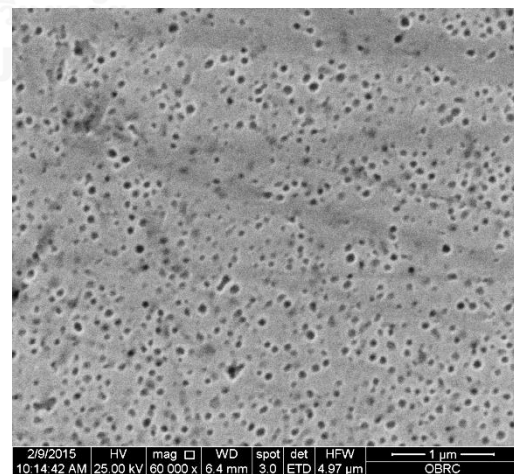
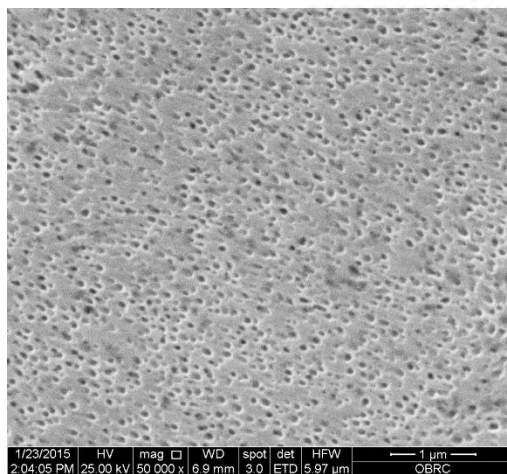
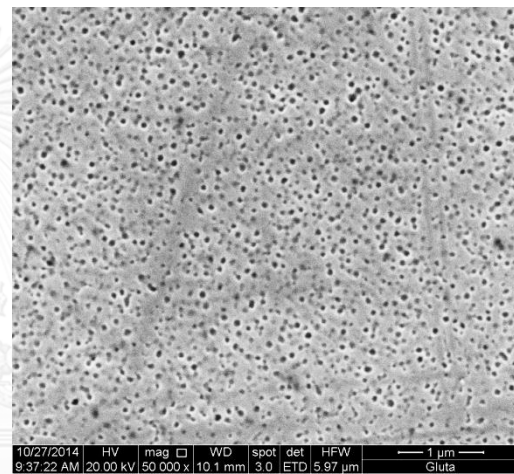
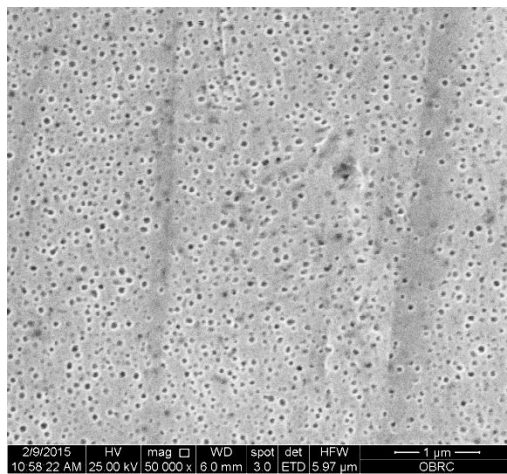
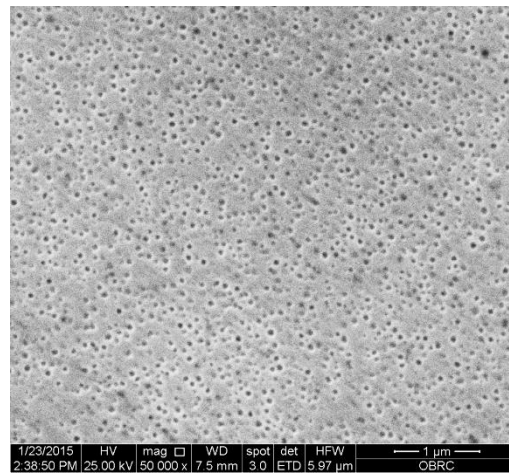
รูปที่ ก-1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะมาตรฐาน (กำลังขยาย 50,000 เท่า)



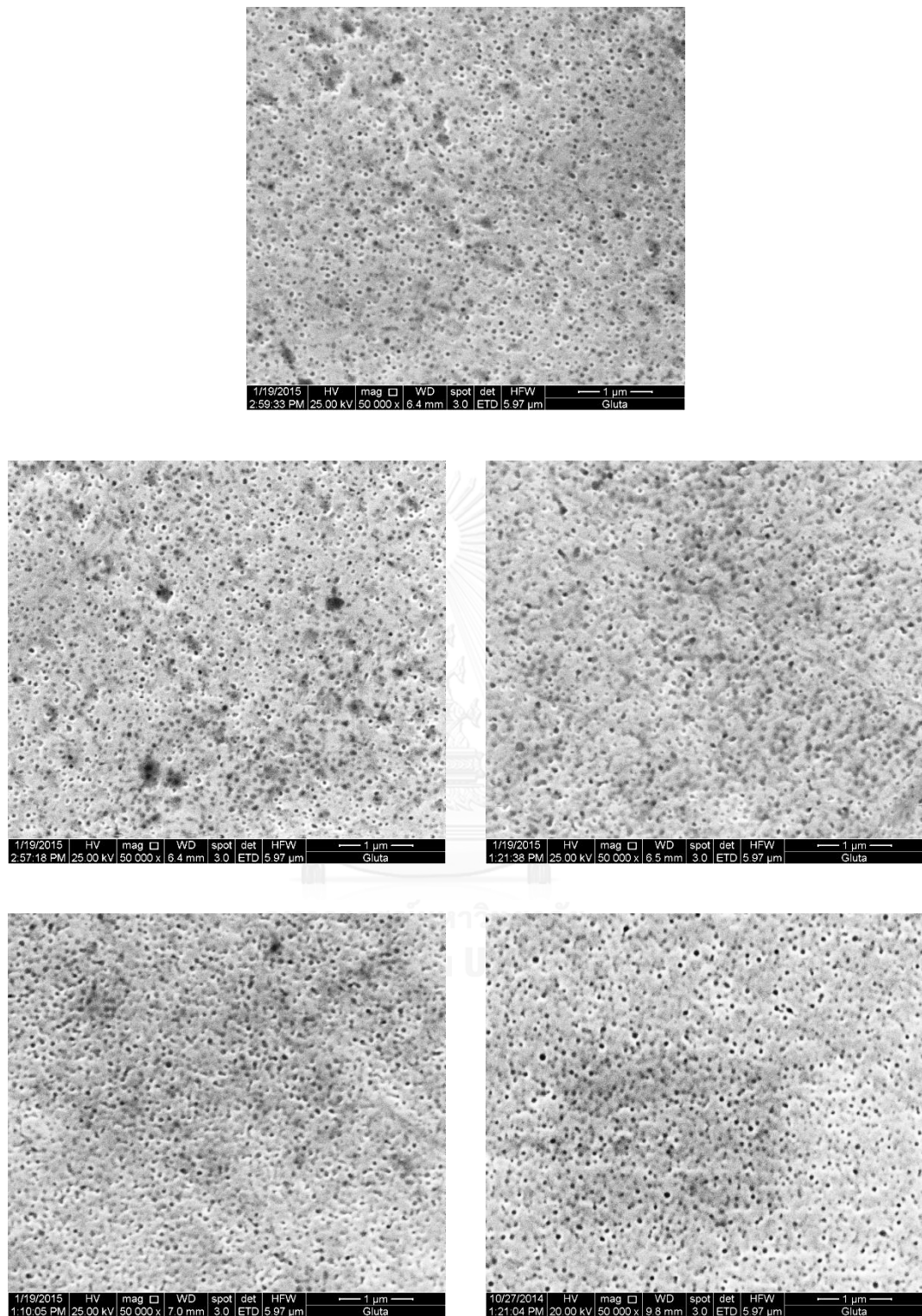
รูปที่ ก-2 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ A 1-3 (กำลังขยาย 50,000 เท่า)



รูปที่ ก-3 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ B 1-3 (กำลังขยาย 50,000 เท่า)

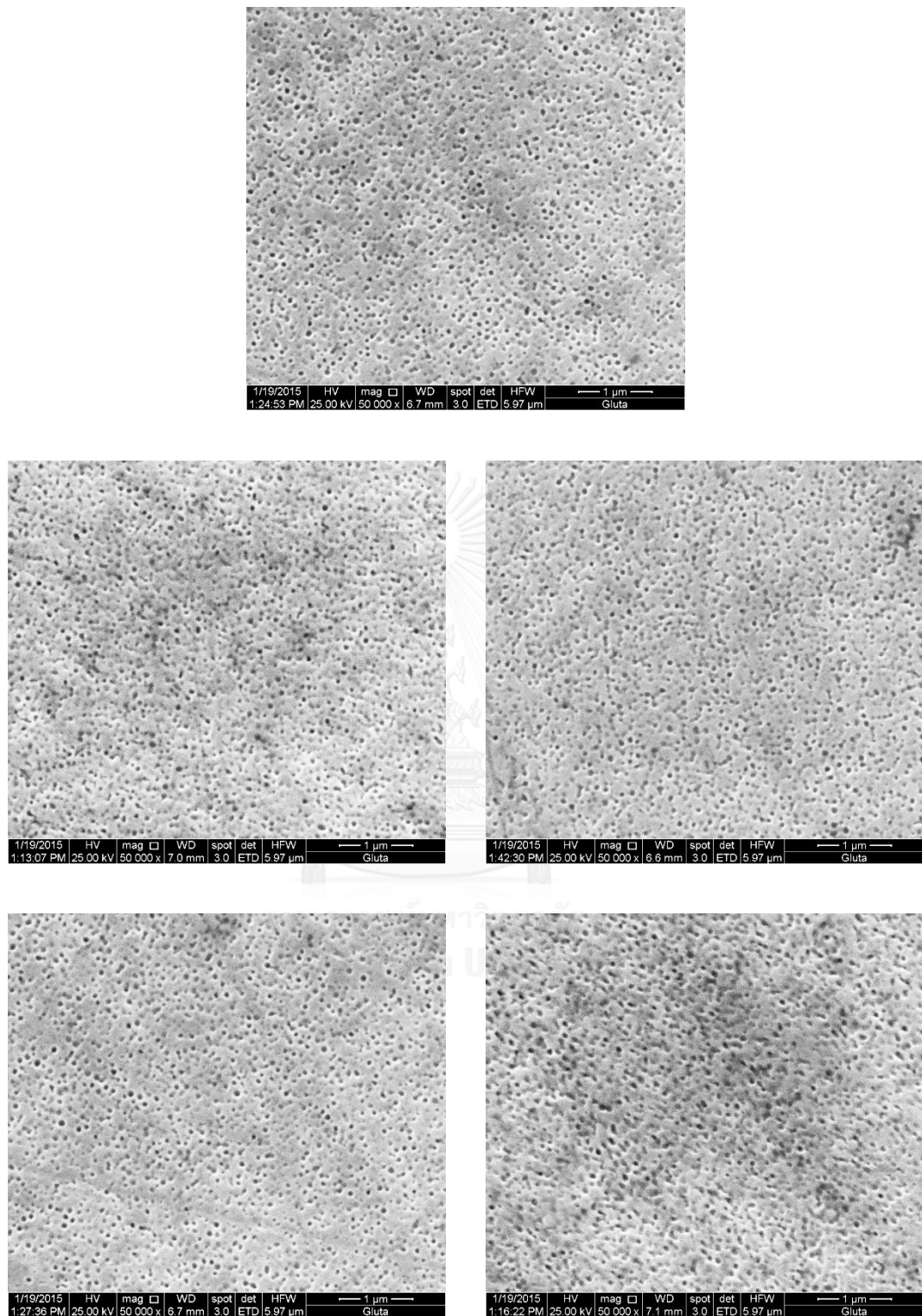


รูปที่ ก-4 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ C 1-3 (กำลังขยาย 50,000 เท่า)

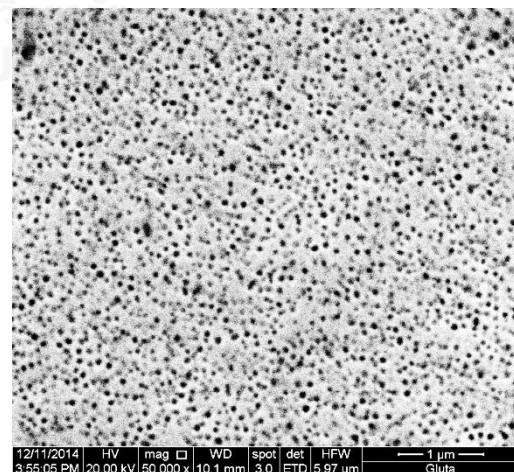
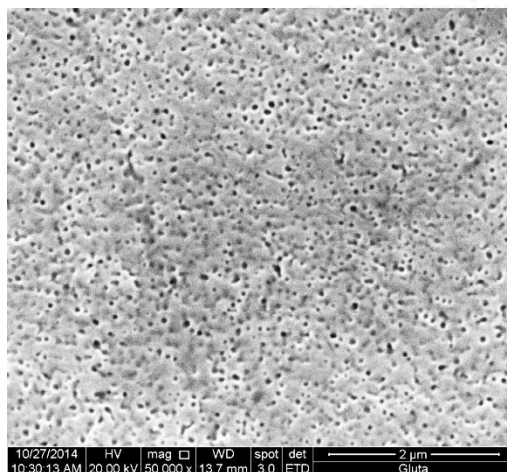
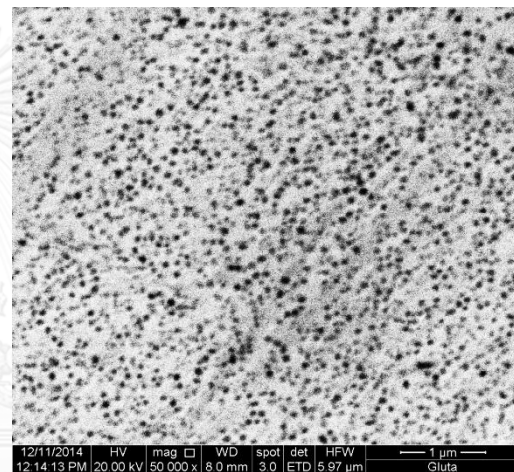
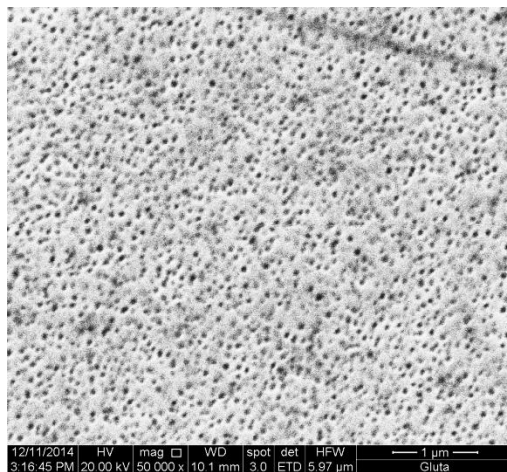
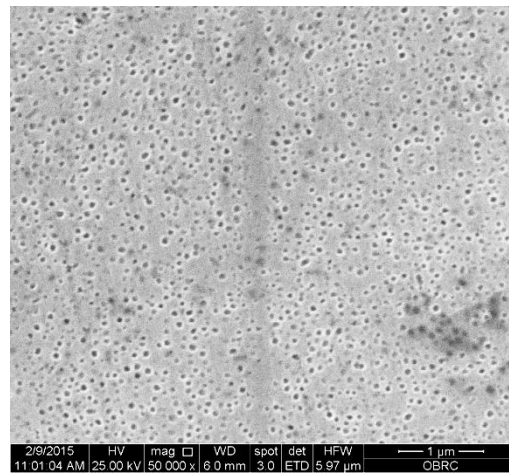


รูปที่ ก-5 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ A 2-2 (กำลังขยาย 50,000 เท่า)



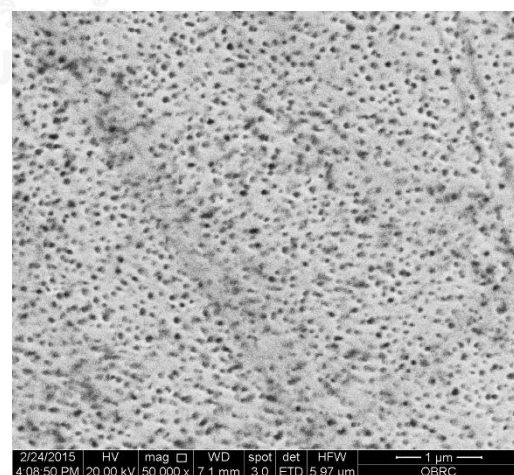
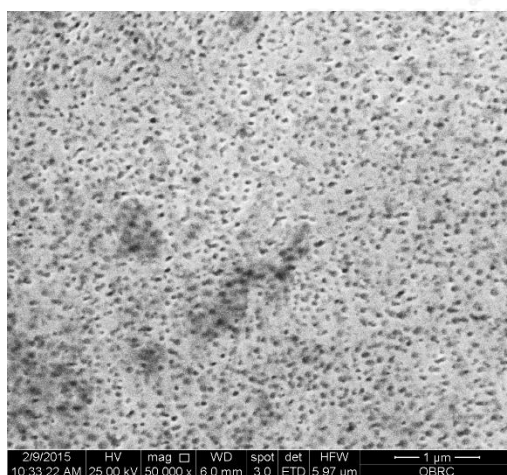
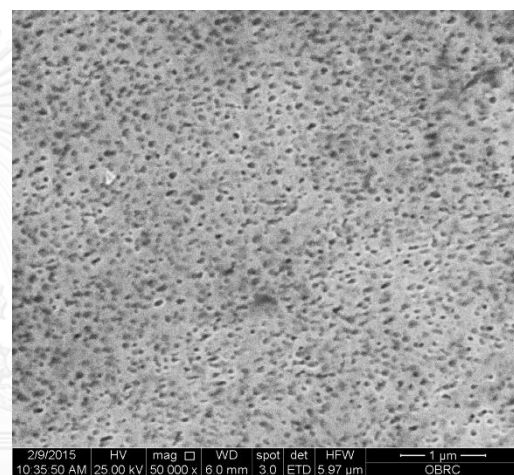
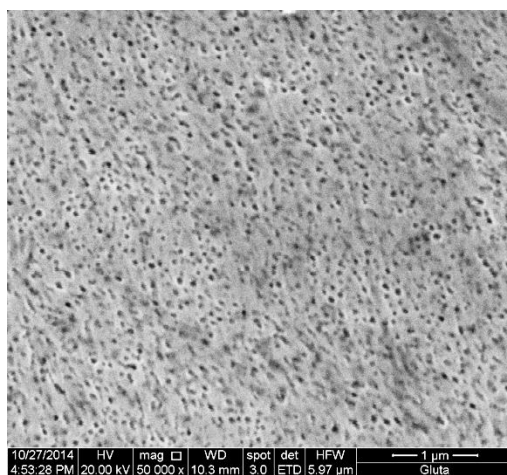
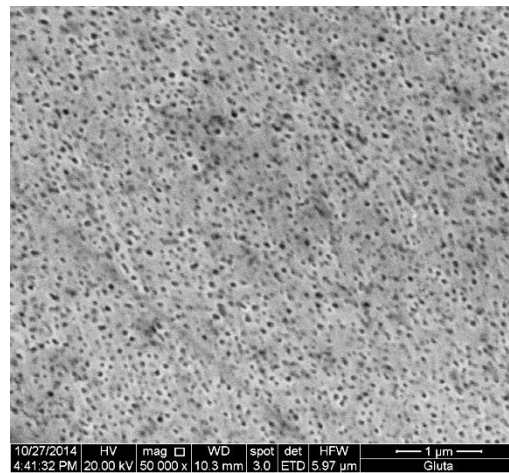


รูปที่ ก-6 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ B 2-2 (กำลังขยาย 50,000 เท่า)

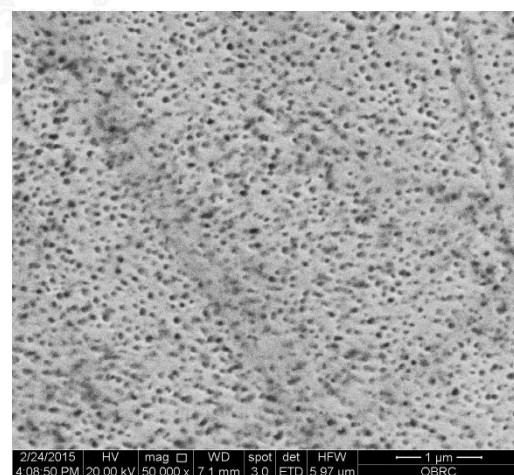
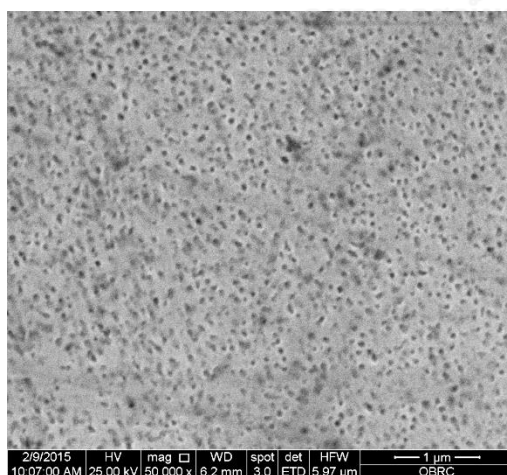
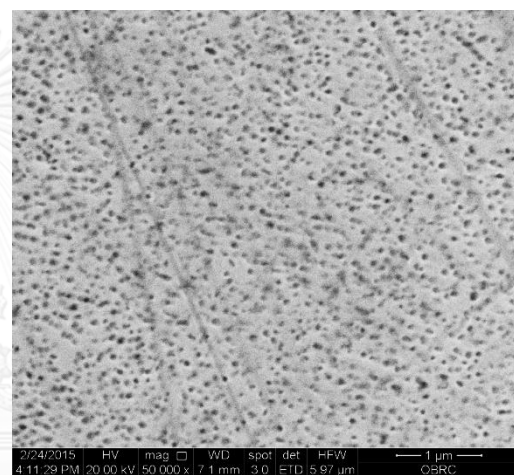
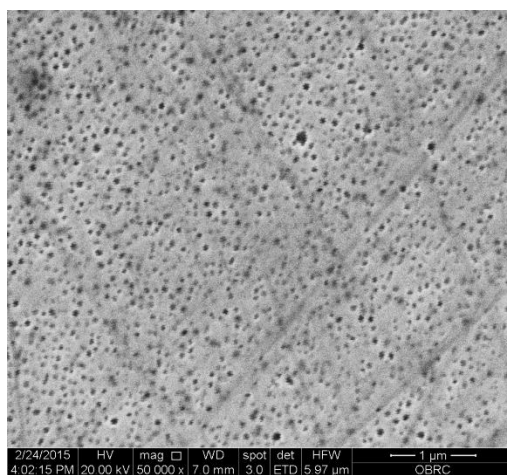
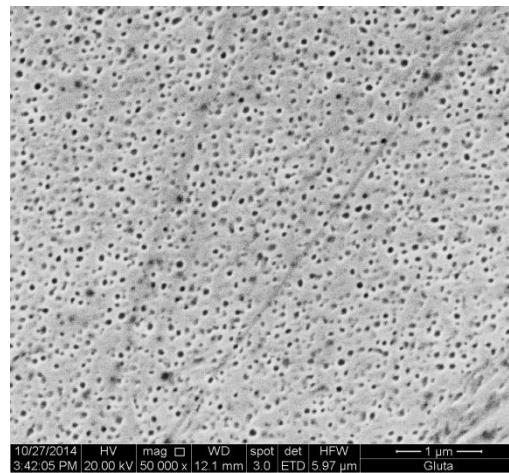


รูปที่ ก-7 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ C 2-2 (กำลังขยาย 50,000 เท่า)

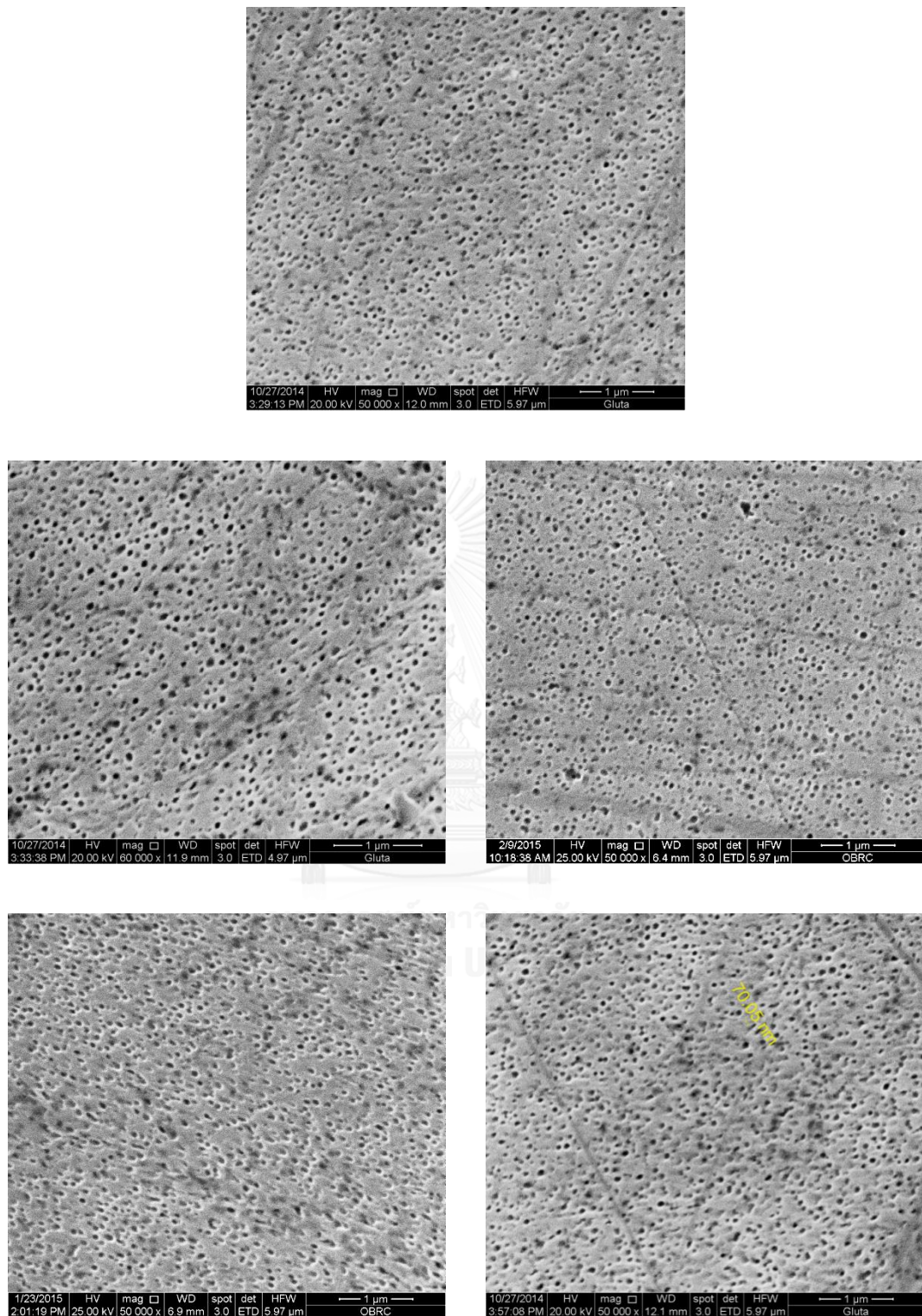




รูปที่ ก-8 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ A 3-1 (กำลังขยาย 50,000 เท่า)

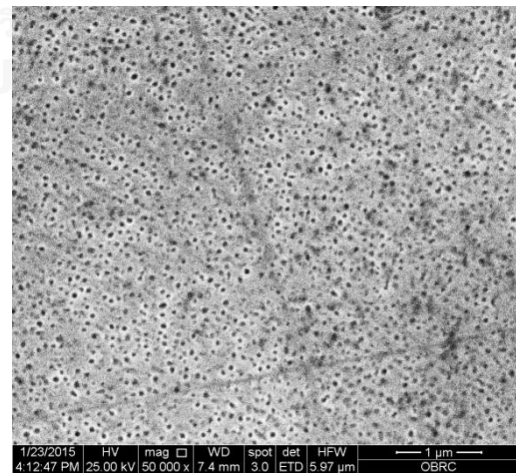
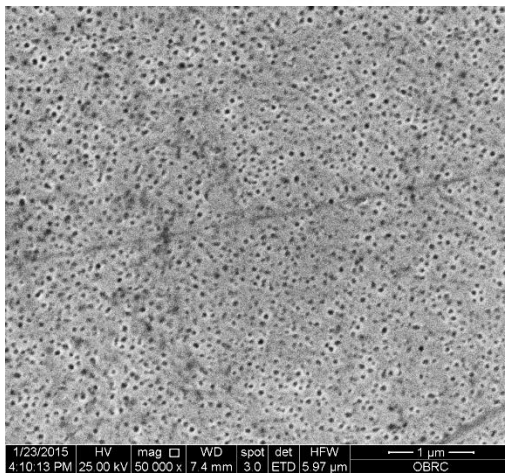
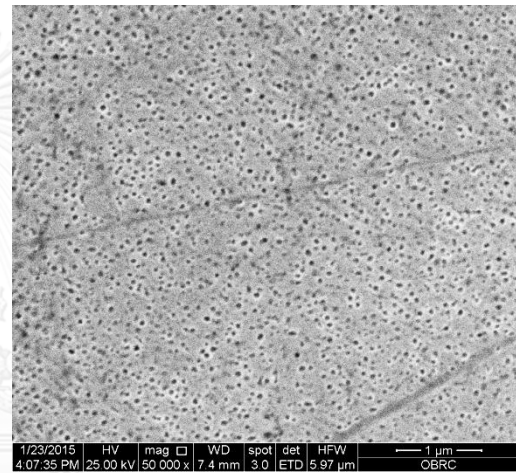
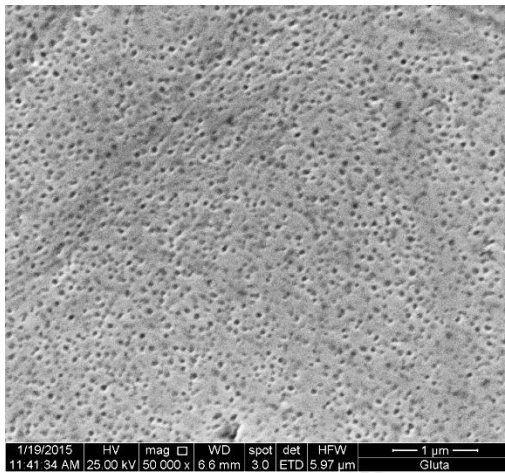
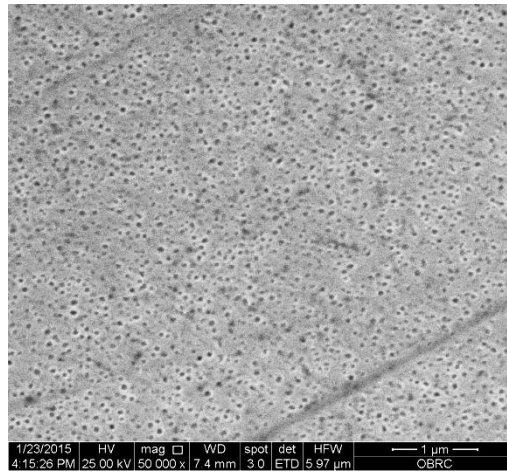


รูปที่ ก-9 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ B 3-1 (กำลังขยาย 50,000 เท่า)

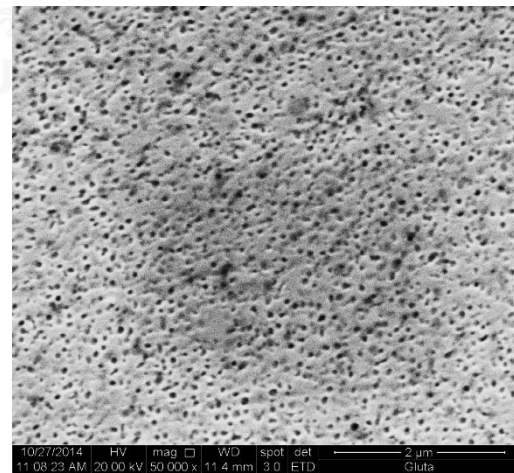
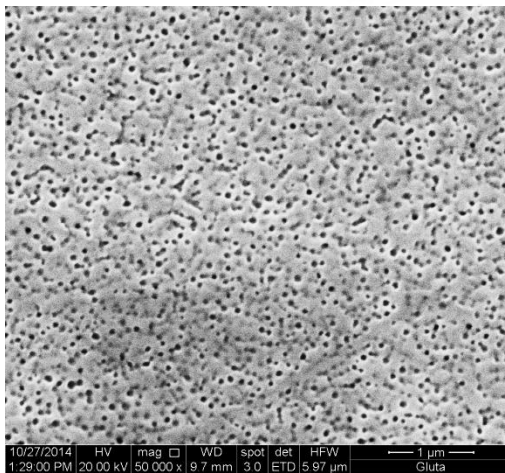
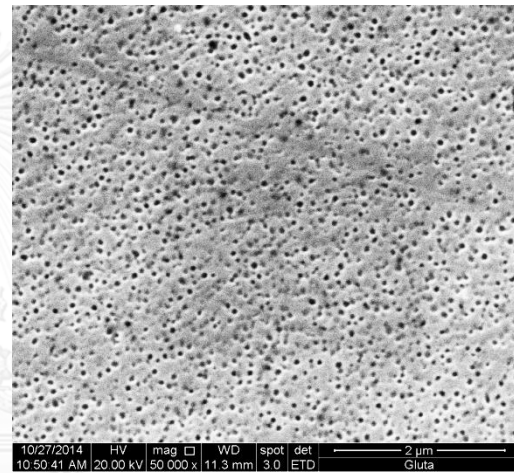
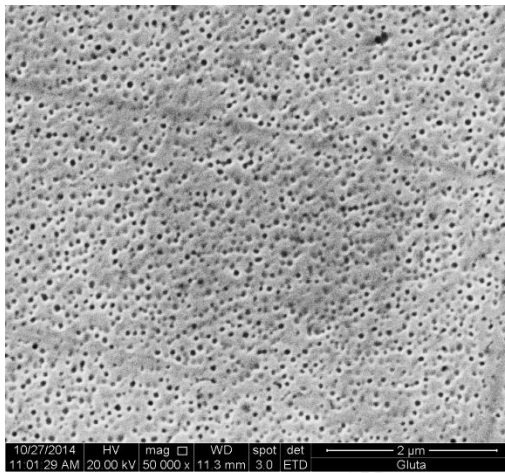
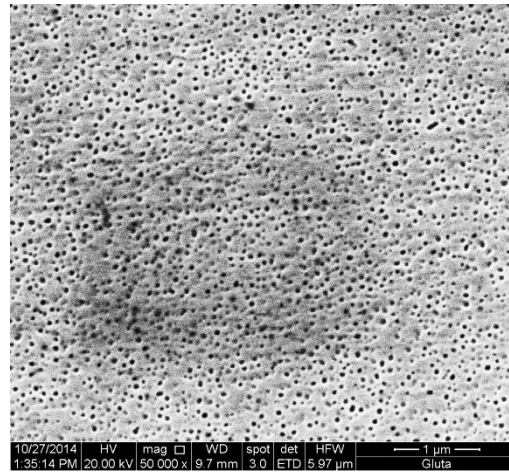


รูปที่ ก-10 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ C 3-1 (กำลังขยาย 50,000 เท่า)

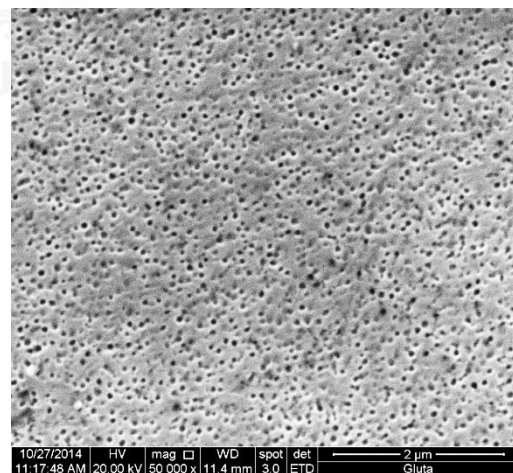
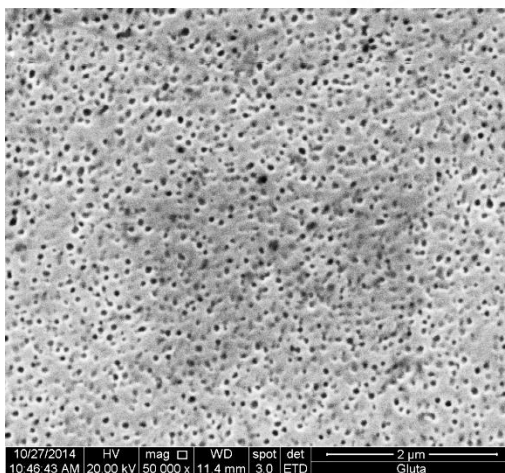
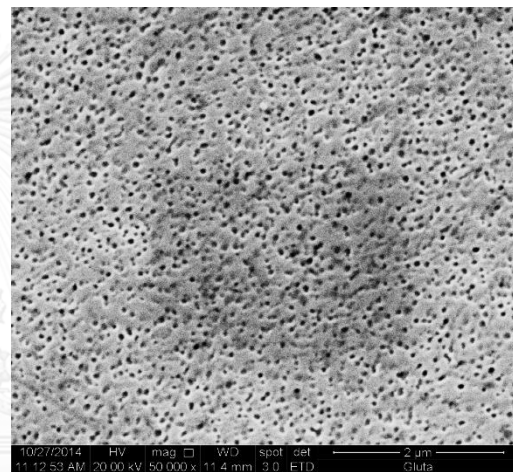
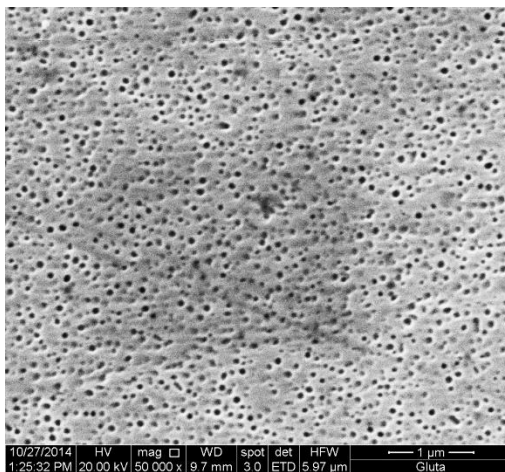
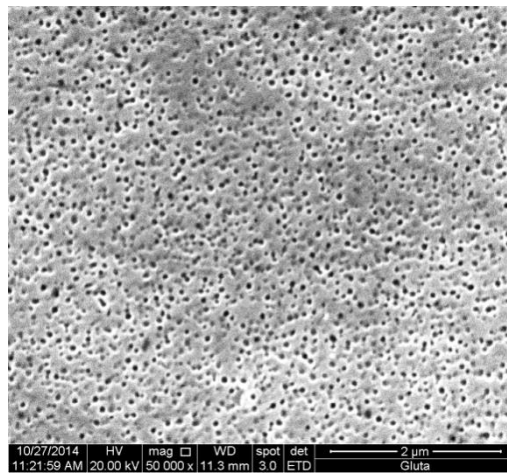




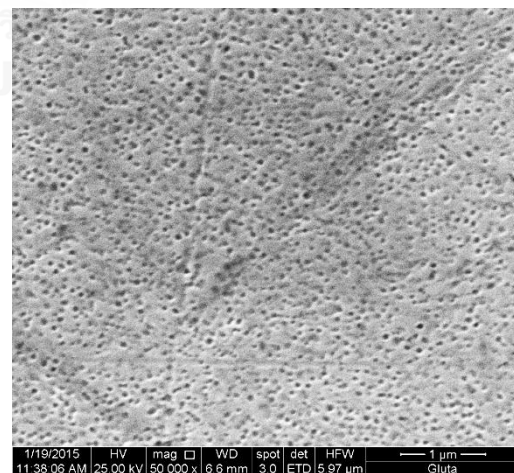
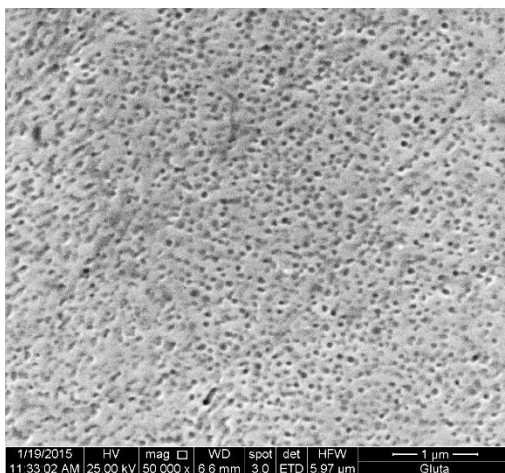
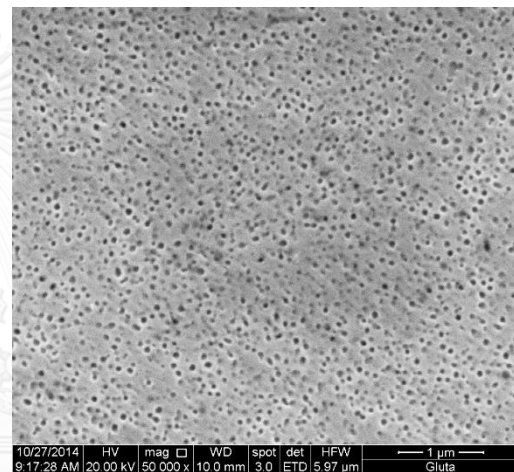
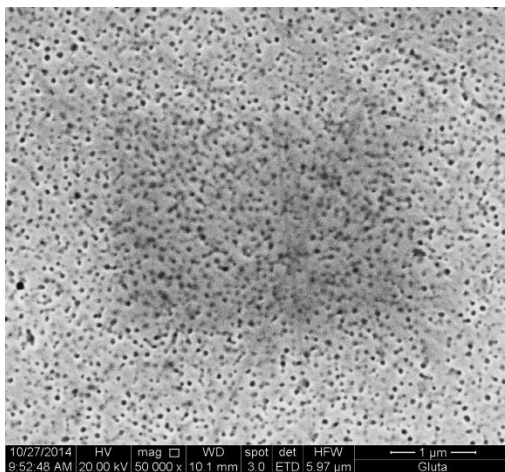
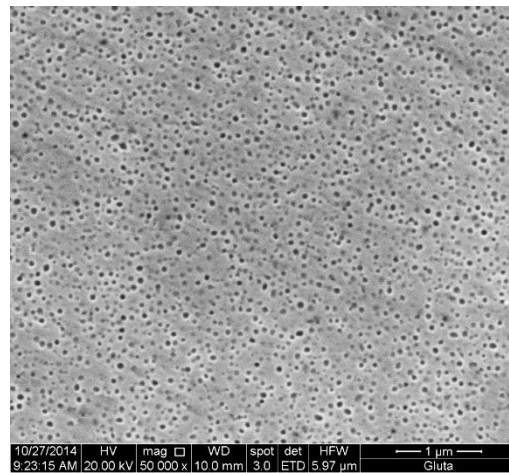
รูปที่ ก-11 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ A 1-2-1  
(กำลังขยาย 50,000 เท่า)



รูปที่ ก-12 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ B 1-2-1  
(กำลังขยาย 50,000 เท่า)

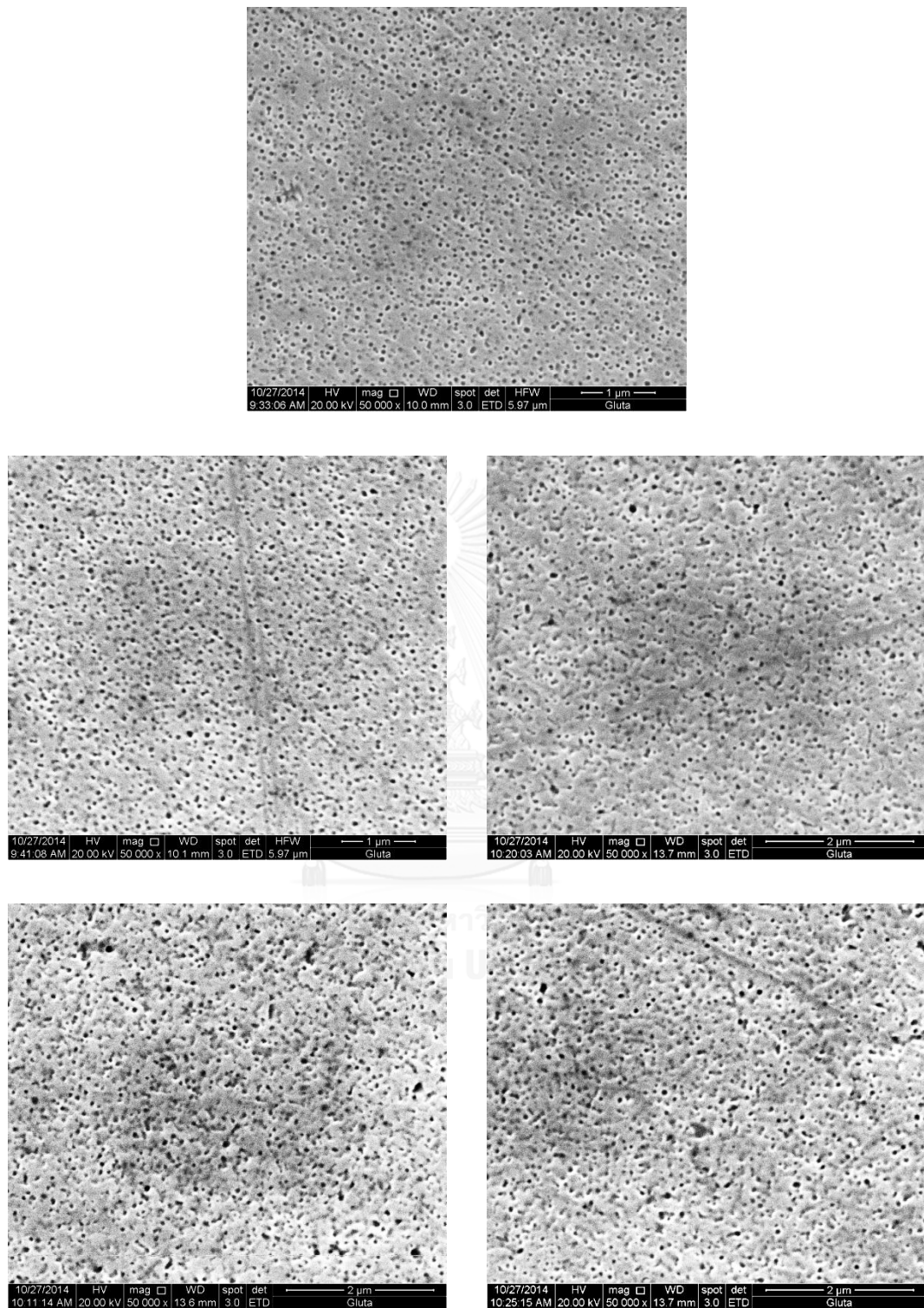


รูปที่ ก-13 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ C 1-2-1  
(กำลังขยาย 50,000 เท่า)



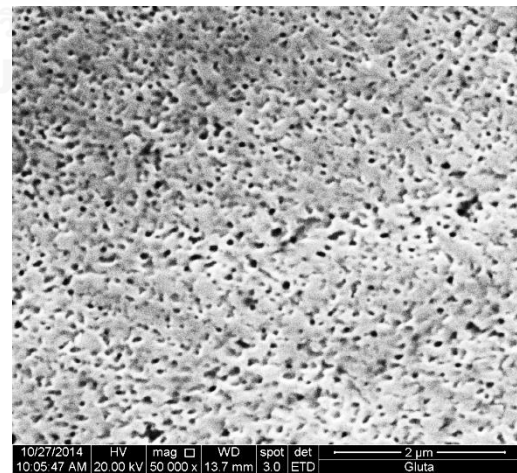
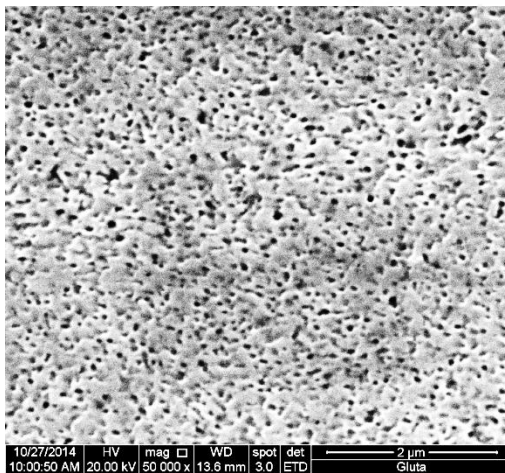
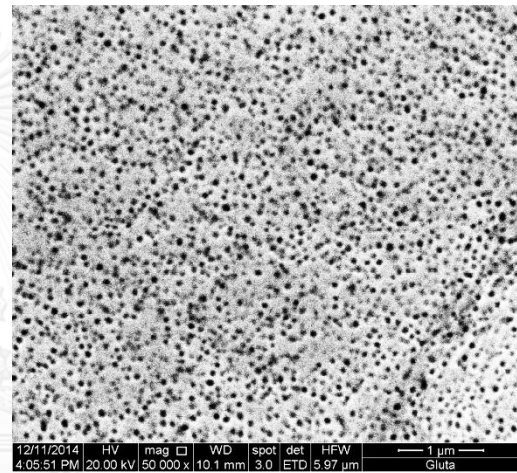
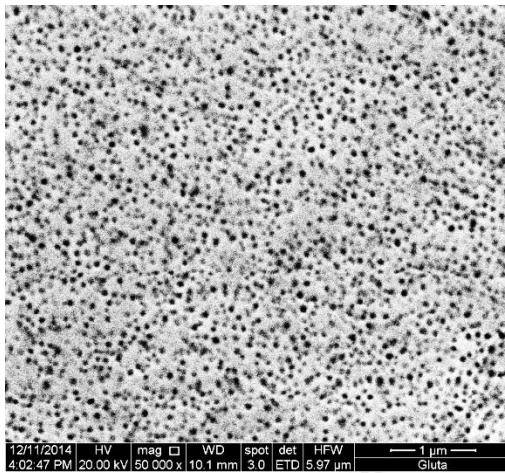
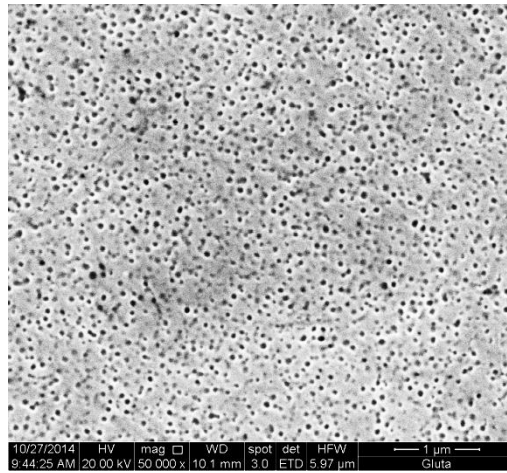
รูปที่ ก-14 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ A 1-1-1-1  
(กำลังขยาย 50,000 เท่า)



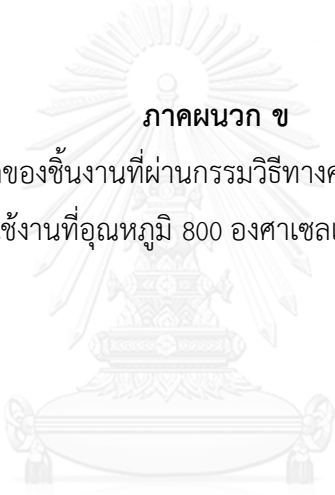


รูปที่ ก-15 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ B 1-1-1-1  
(กำลังขยาย 50,000 เท่า)





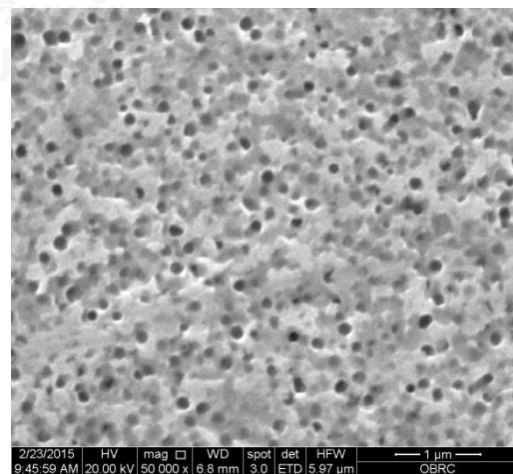
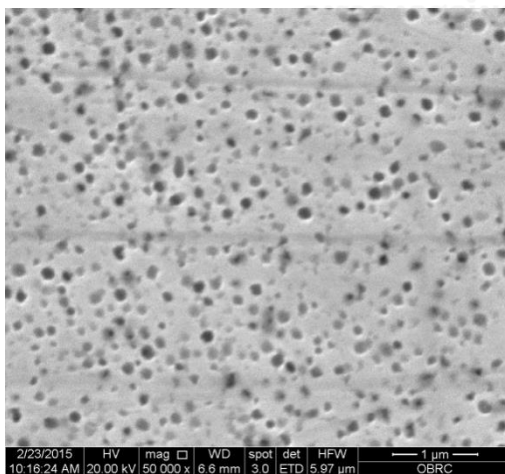
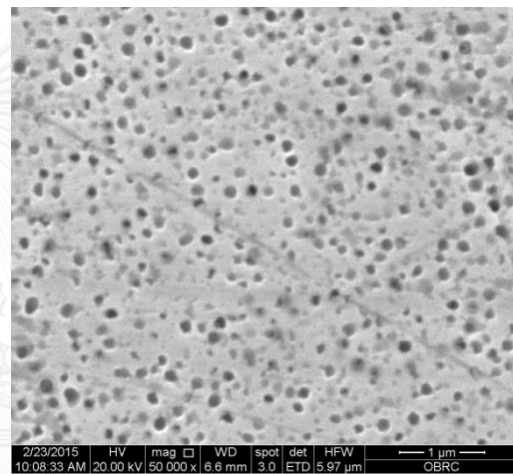
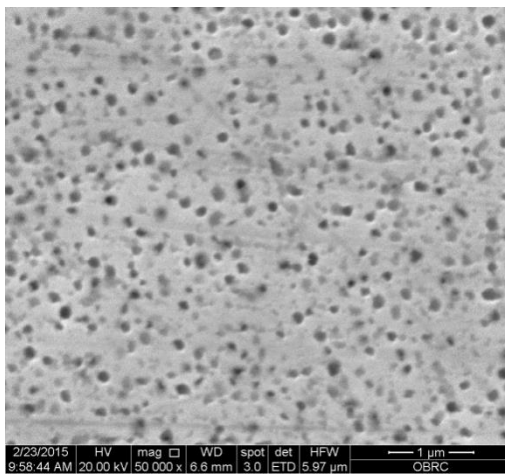
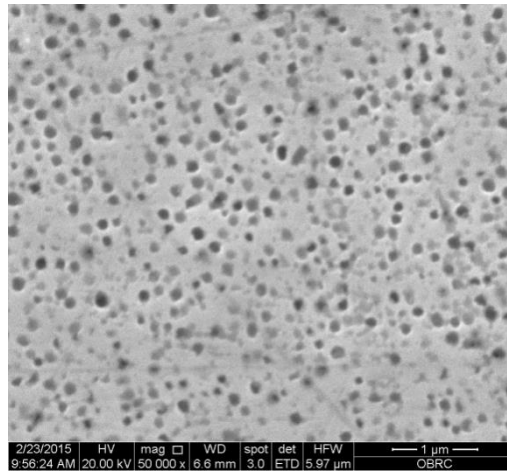
รูปที่ ก-16 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะ C 1-1-1-1  
(กำลังขยาย 50,000 เท่า)



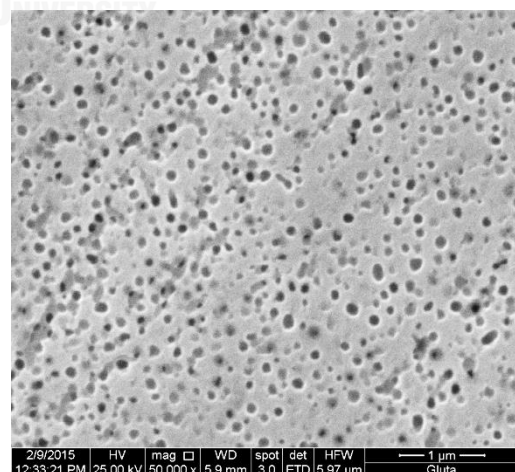
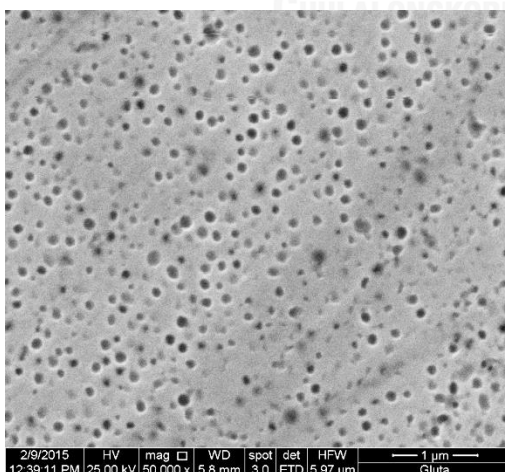
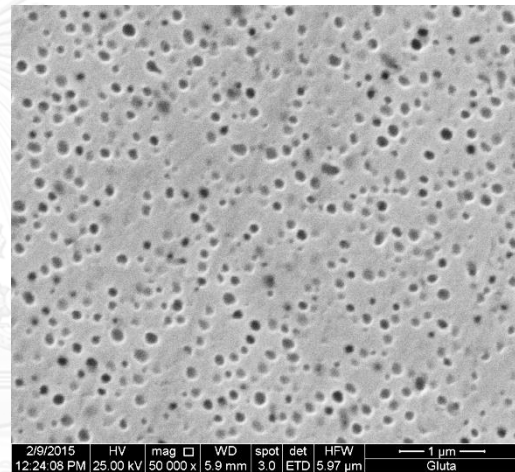
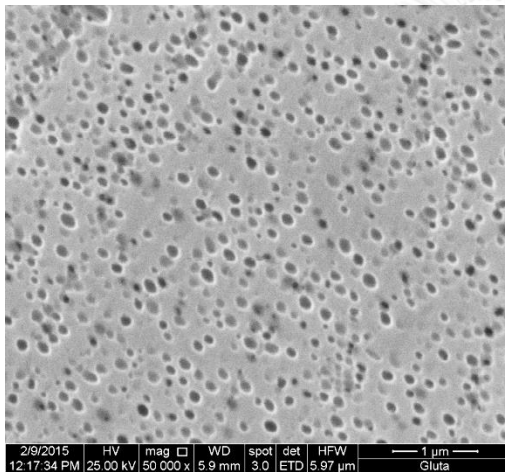
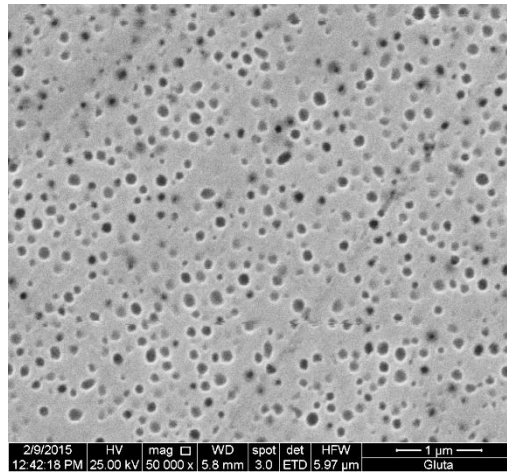
**ภาคผนวก ข**

(โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะต่างๆ  
หลังผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง)

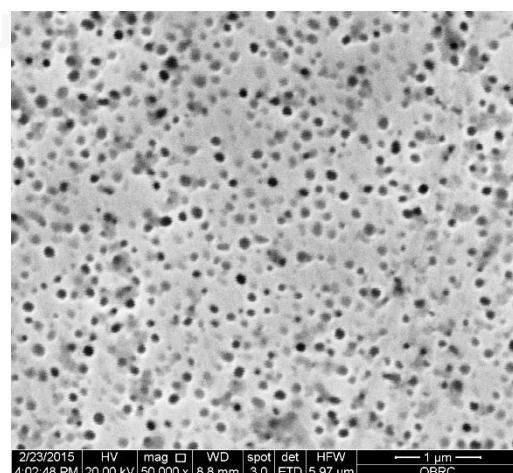
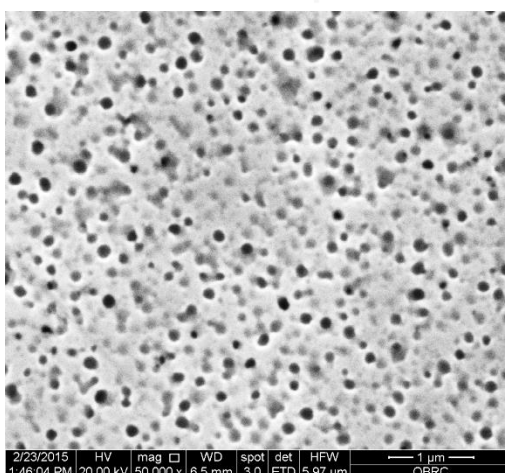
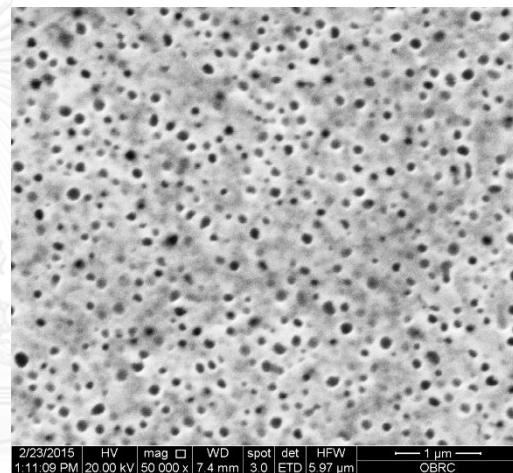
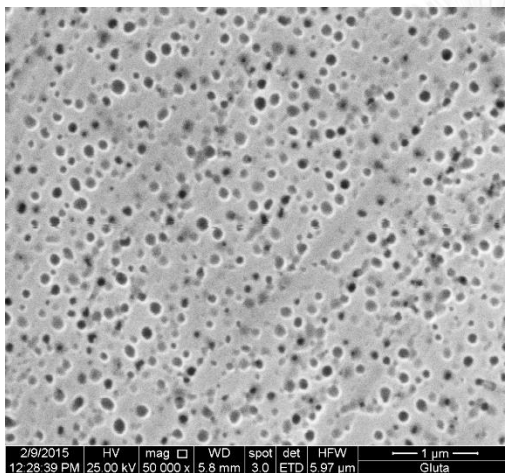
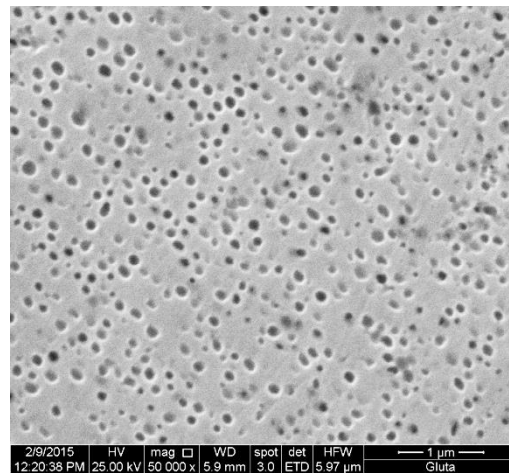
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



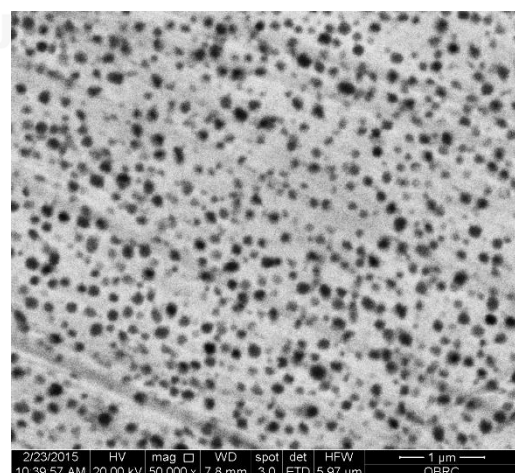
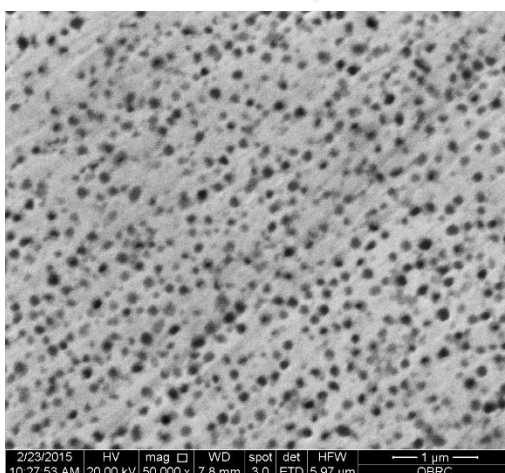
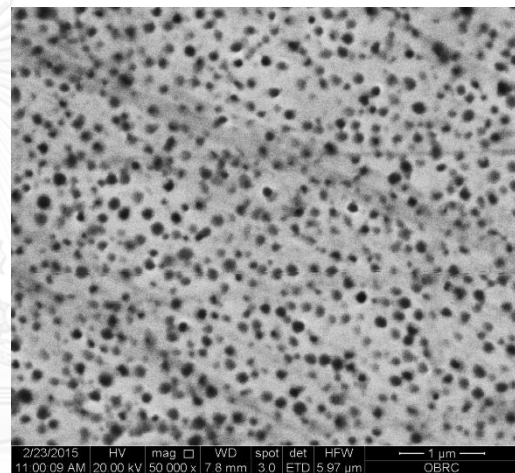
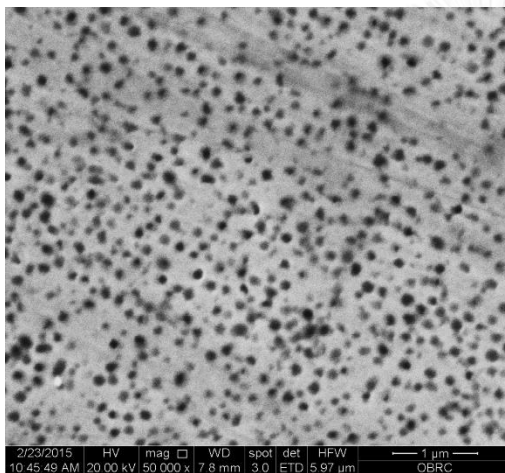
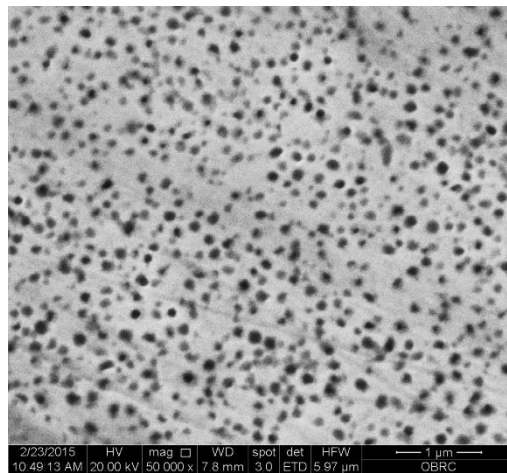
รูปที่ ข-1 โครงสร้างจุลภาคของสภาวะมาตรฐานหลังผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง (กำลังขยาย 50,000 เท่า)



รูปที่ ข-2 โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ A 1-3 หลังผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง (กำลังขยาย 50,000 เท่า)

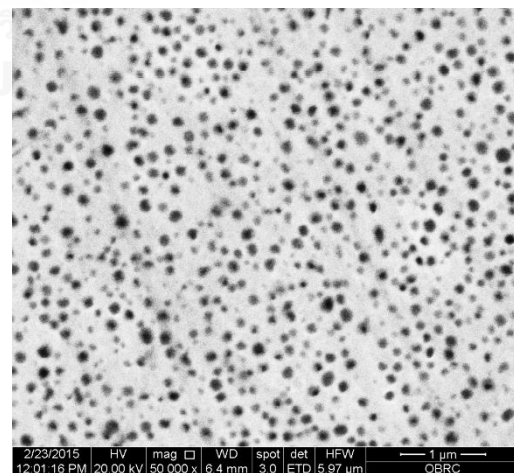
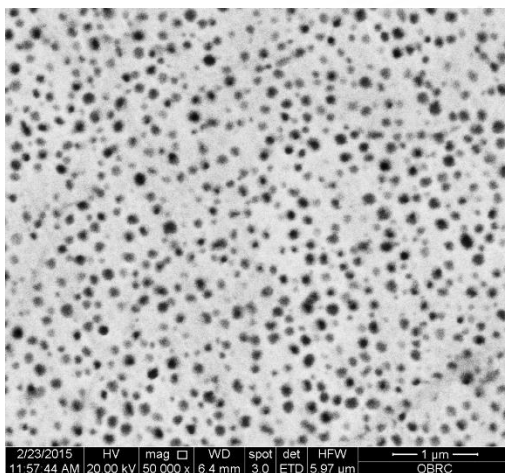
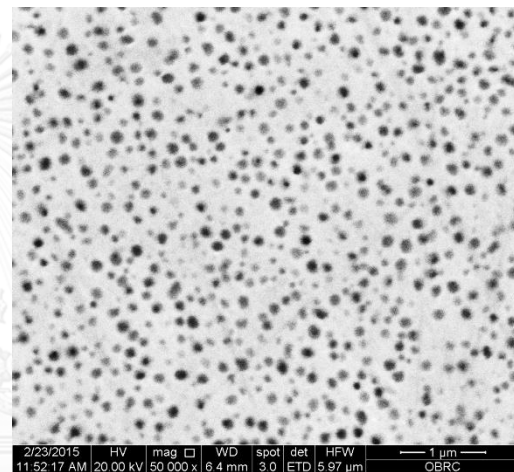
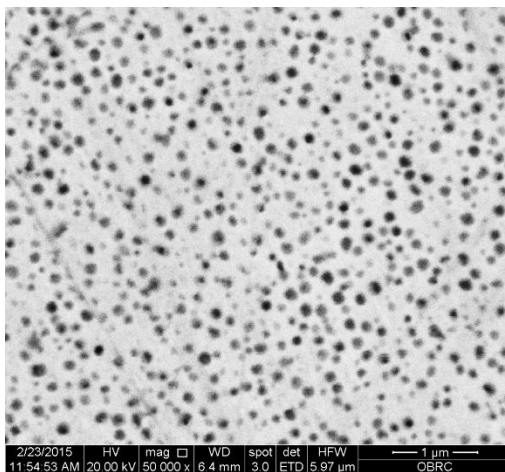
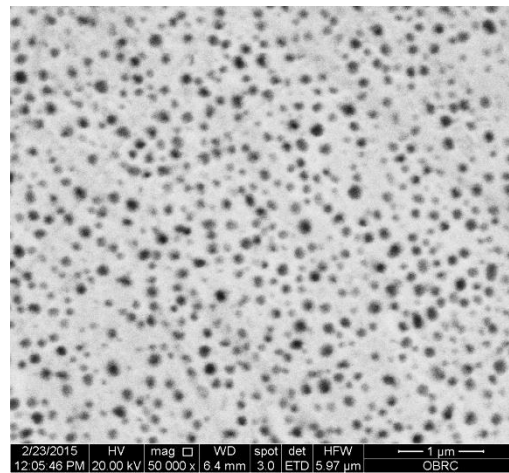


รูปที่ ข-3 โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ B 1-3 หลังผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง (กำลังขยาย 50,000 เท่า)

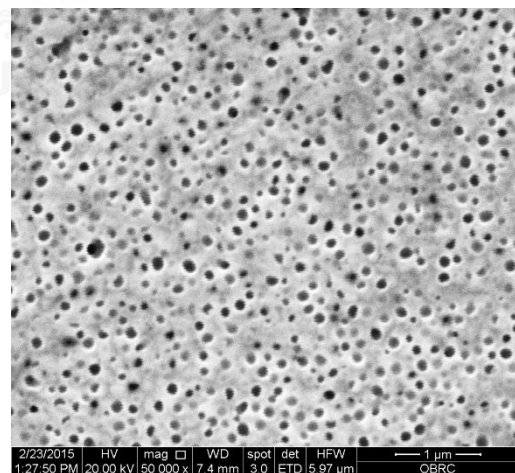
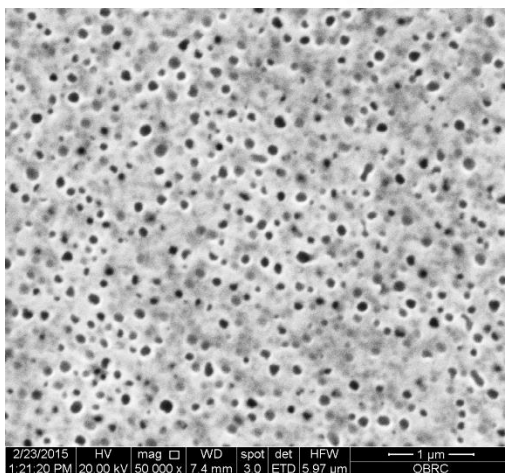
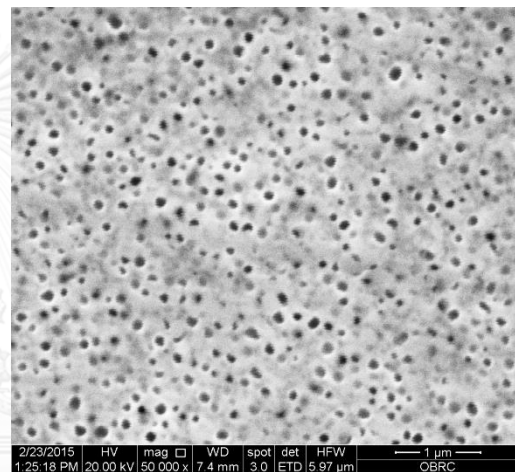
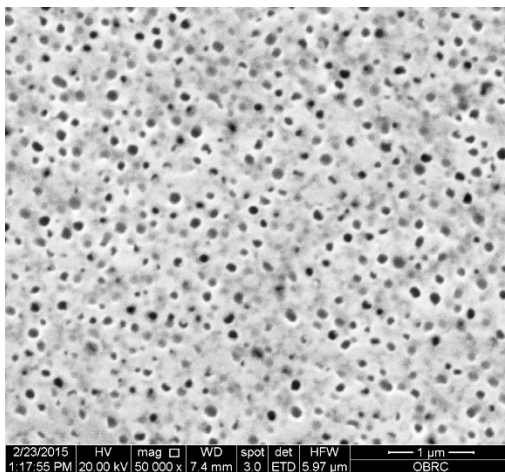
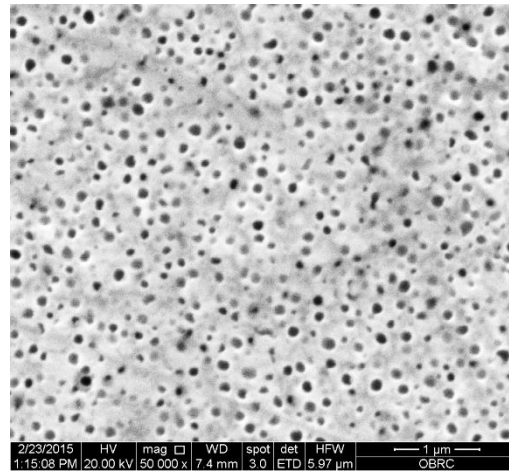


รูปที่ ข-4 โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ C 1-3 หลังผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง (กำลังขยาย 50,000 เท่า)



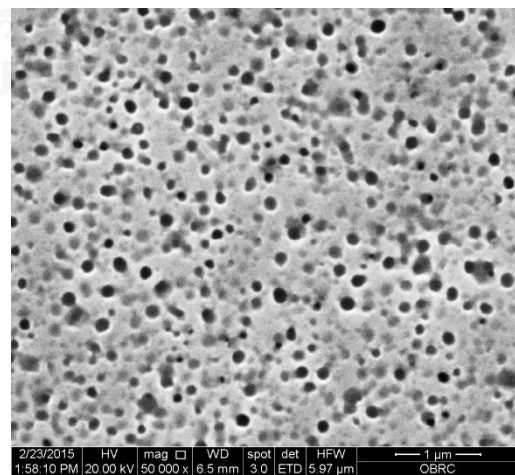
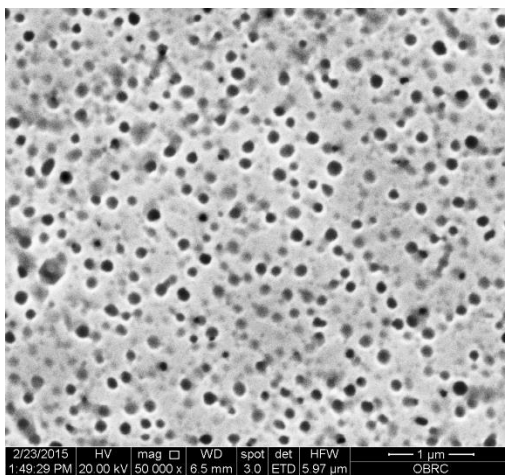
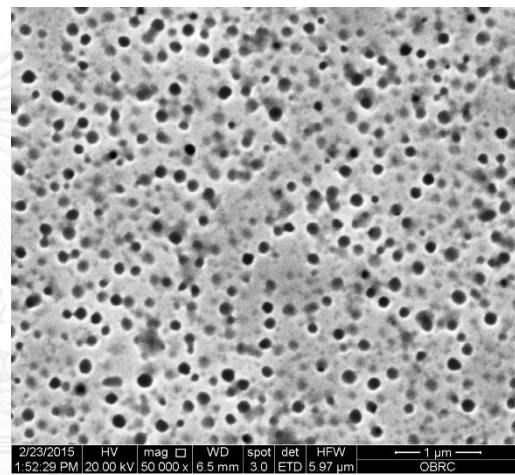
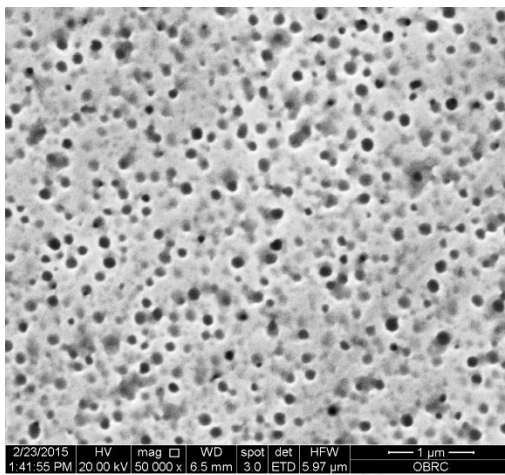
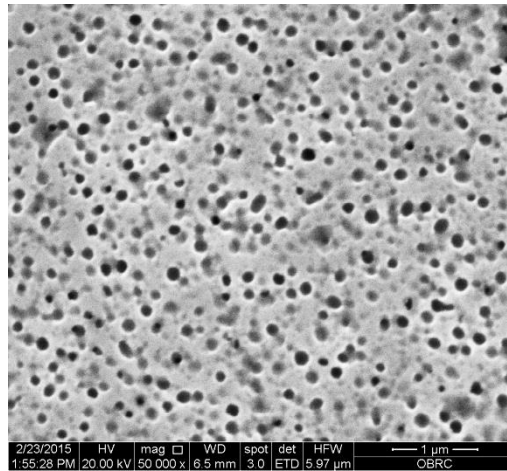


รูปที่ ข-5 โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ A 2-2 หลังผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง (กำลังขยาย 50,000 เท่า)

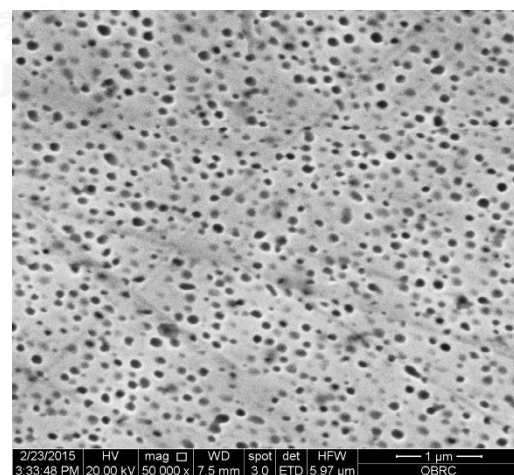
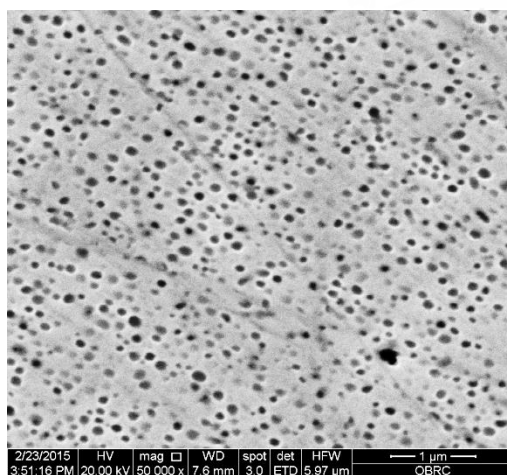
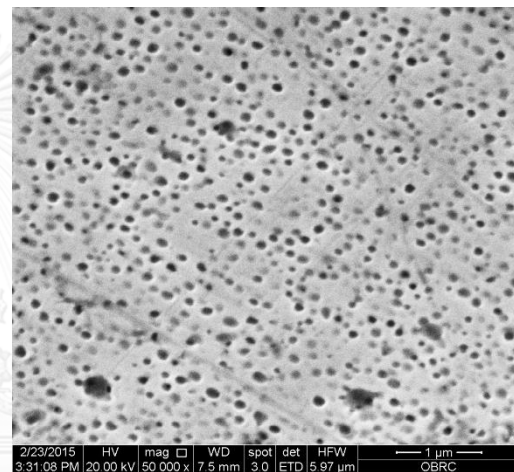
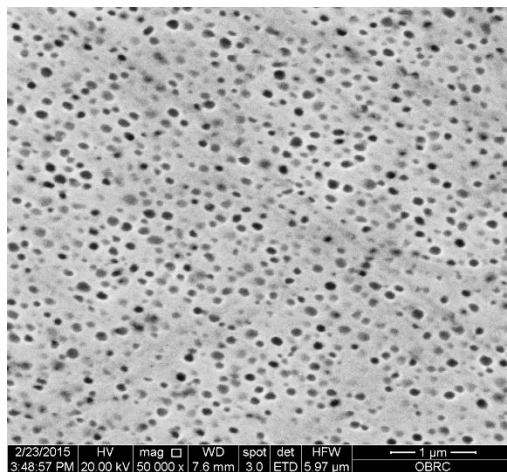
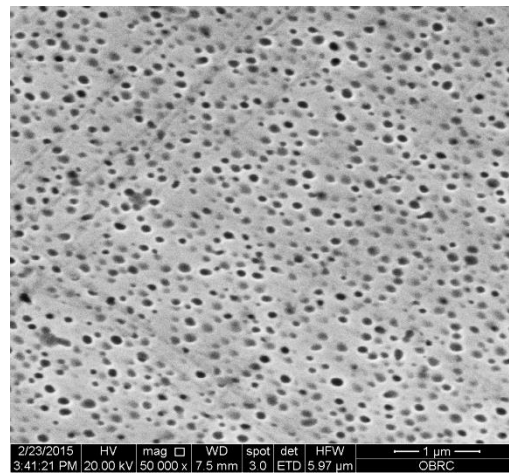


รูปที่ ข-6 โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ B 2-2 หลังผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง (กำลังขยาย 50,000 เท่า)

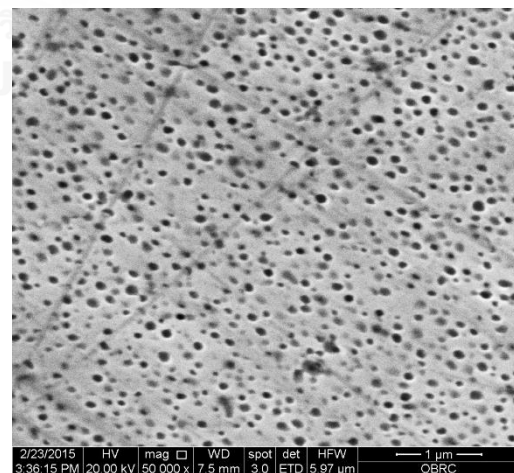
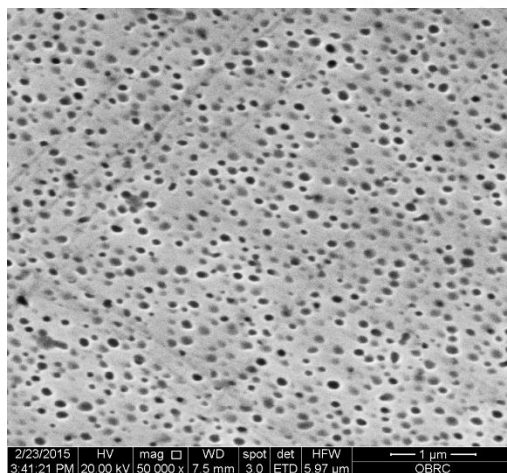
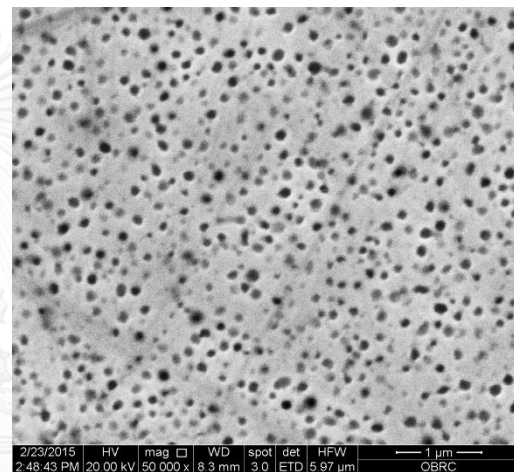
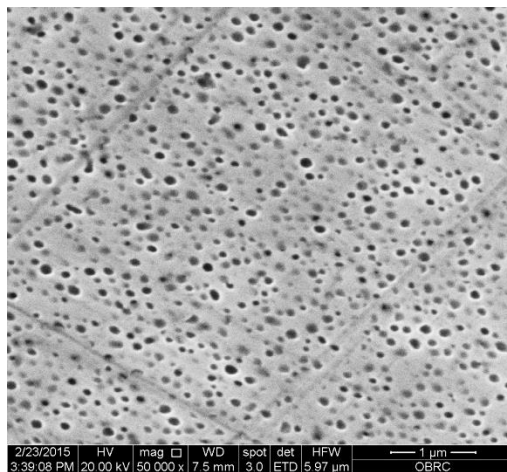
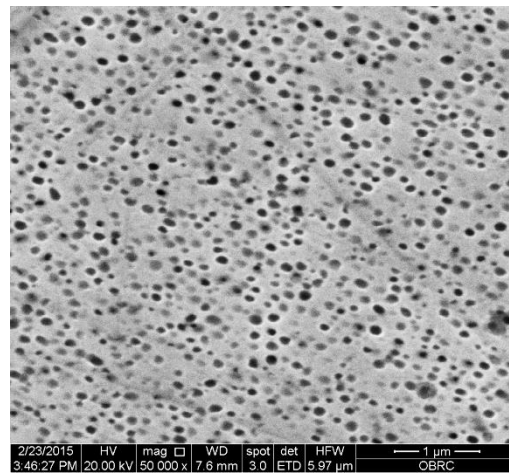




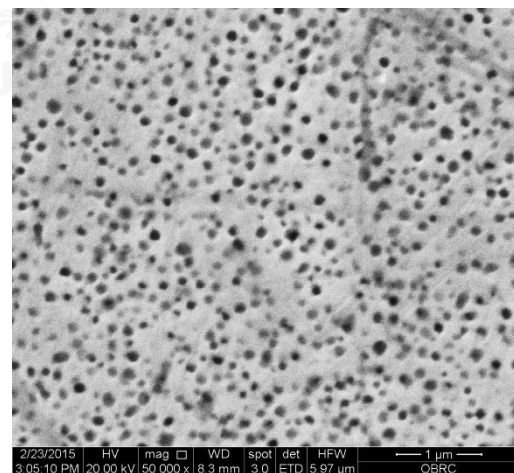
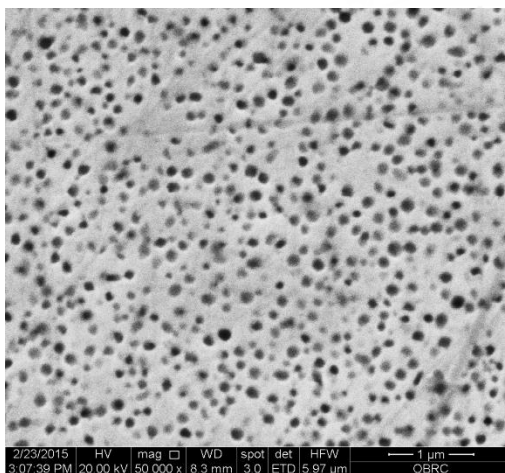
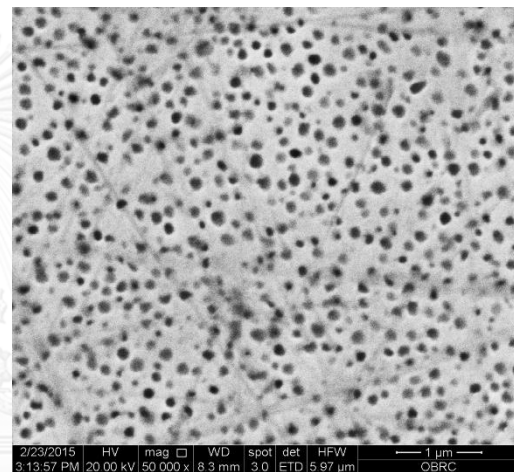
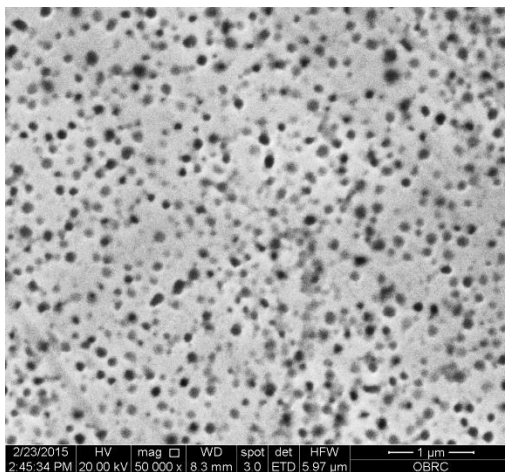
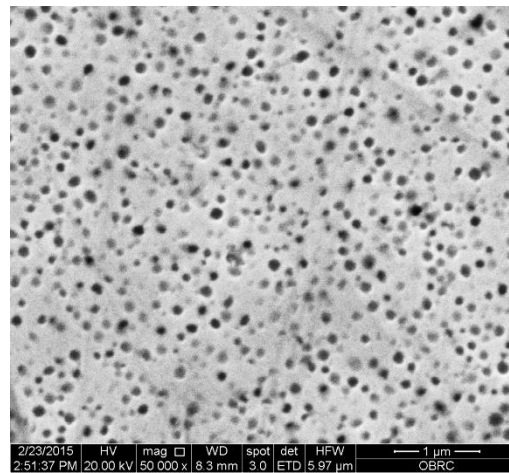
รูปที่ ข-7 โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ C 2-2 หลังผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง (กำลังขยาย 50,000 เท่า)



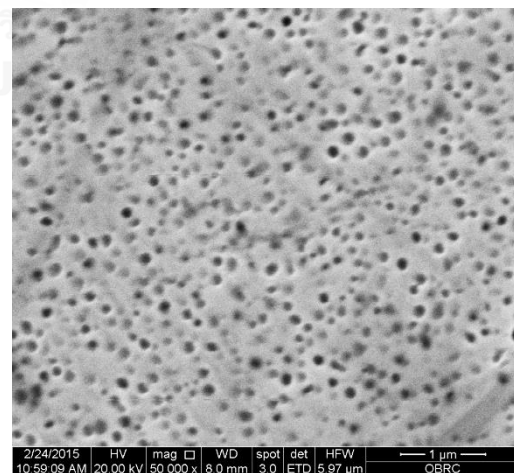
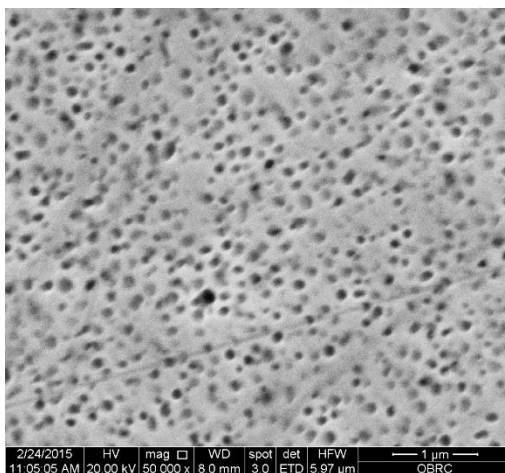
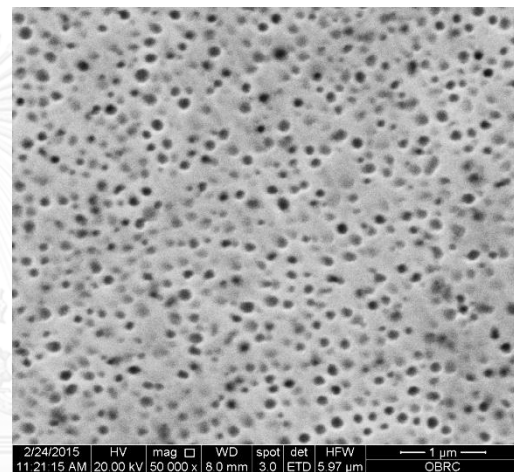
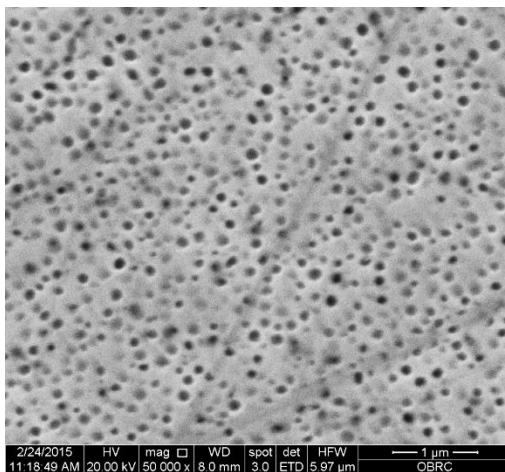
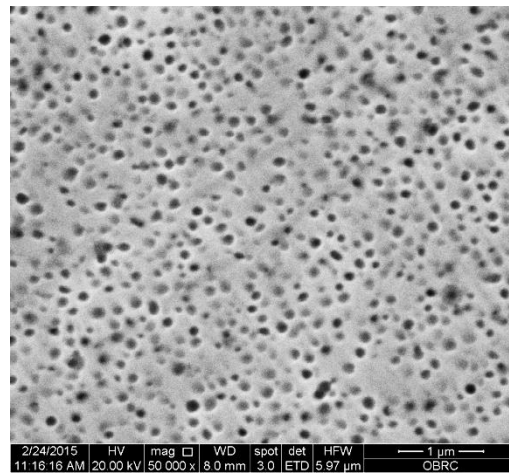
รูปที่ ข-8 โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ A 3-1 หลังผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง (กำลังขยาย 50,000 เท่า)



รูปที่ ข-9 โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ B 3-1 หลังผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง (กำลังขยาย 50,000 เท่า)

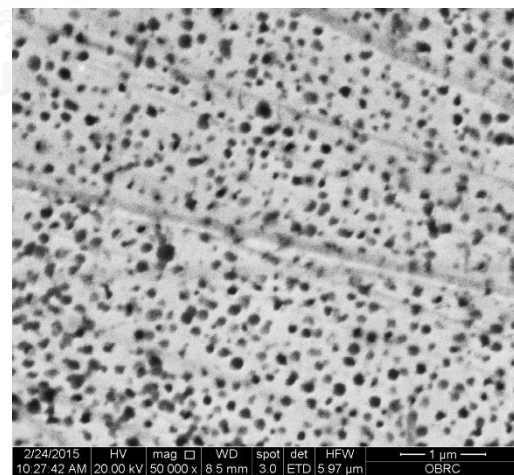
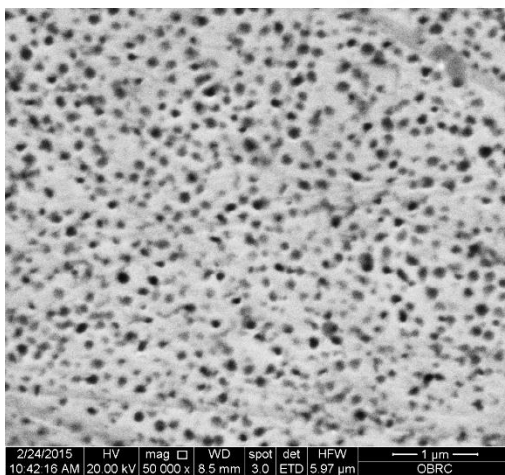
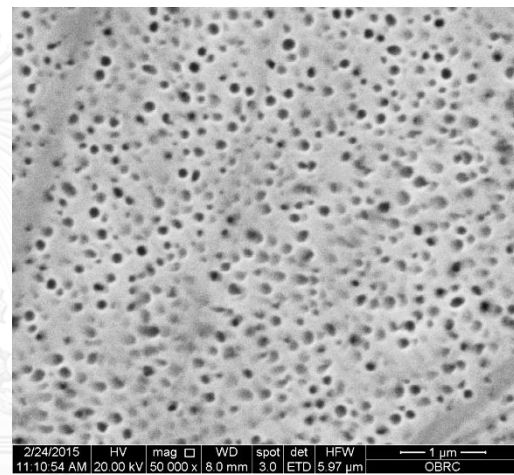
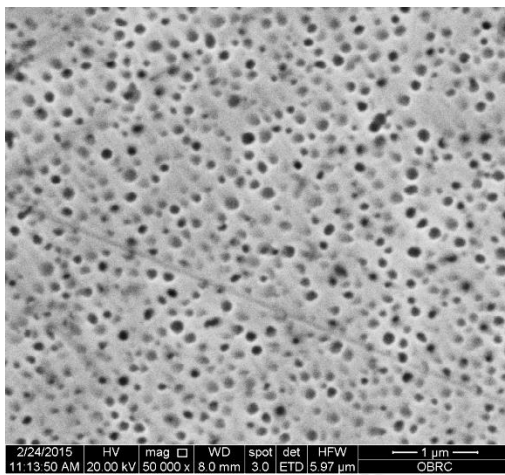
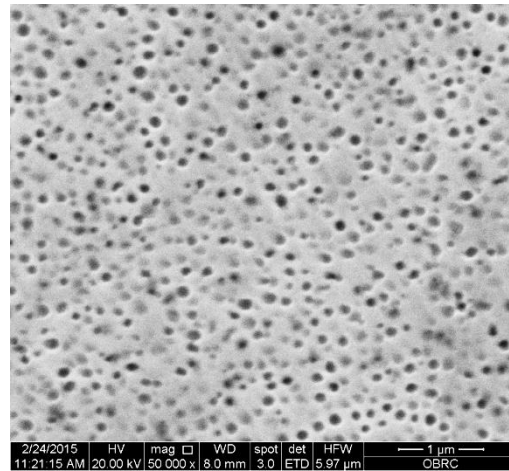


รูปที่ ข-10 โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ C 3-1 หลังผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง (กำลังขยาย 50,000 เท่า)

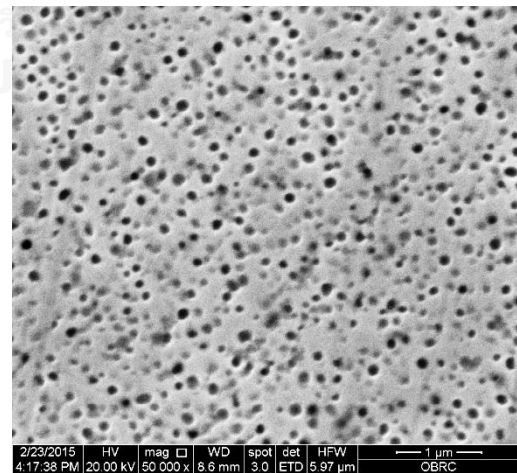
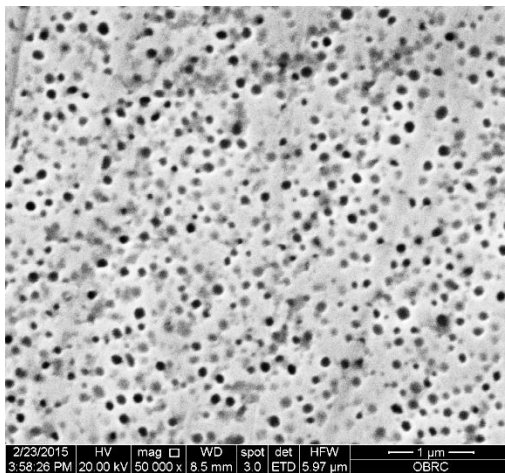
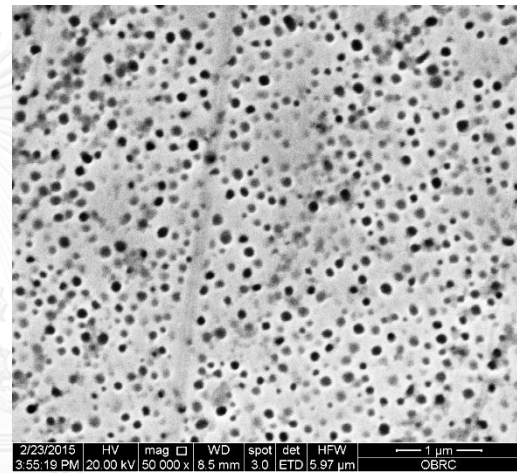
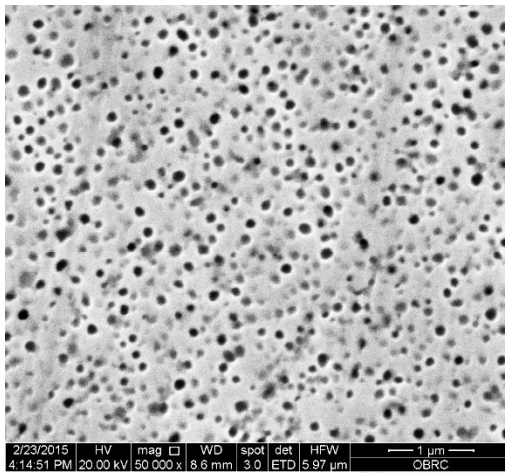
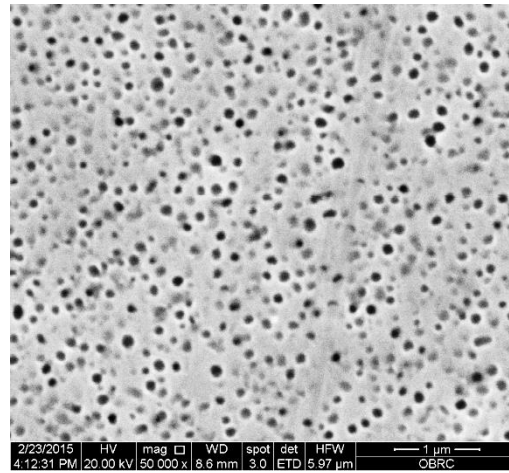


รูปที่ ข-11 โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ A 1-2-1 หลังผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง (กำลังขยาย 50,000 เท่า)

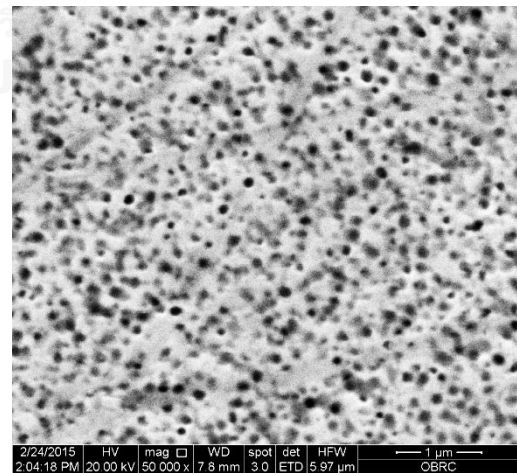
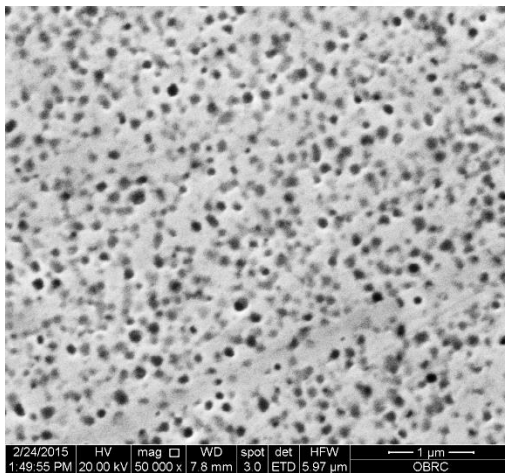
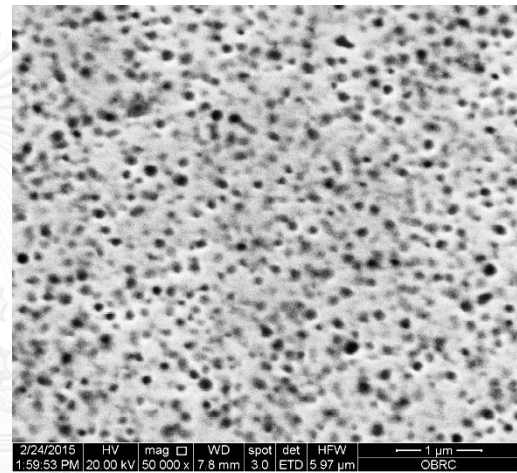
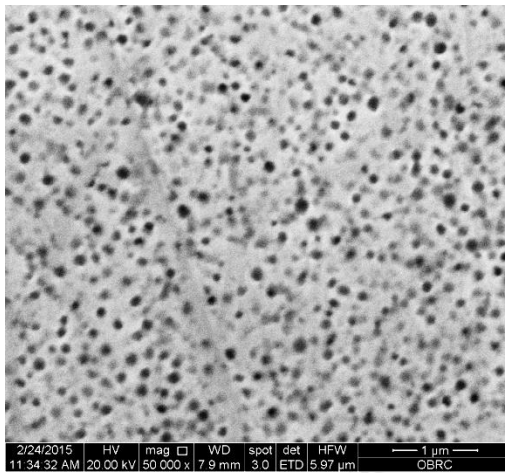
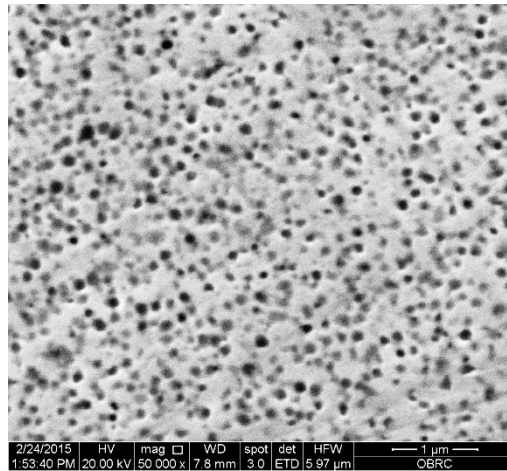




รูปที่ ข-12 โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ B 1-2-1 หลังผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง (กำลังขยาย 50,000 เท่า)

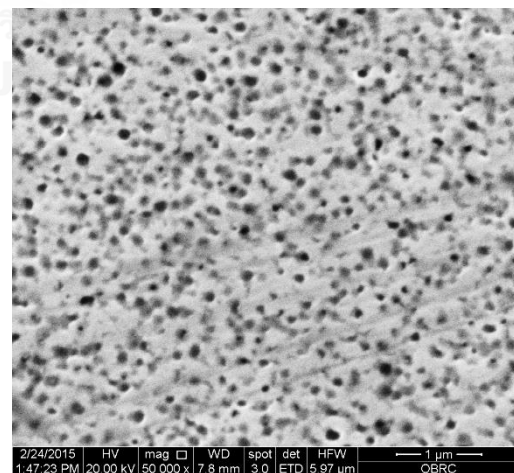
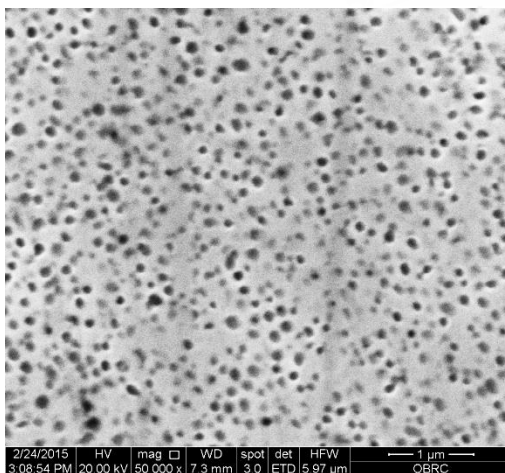
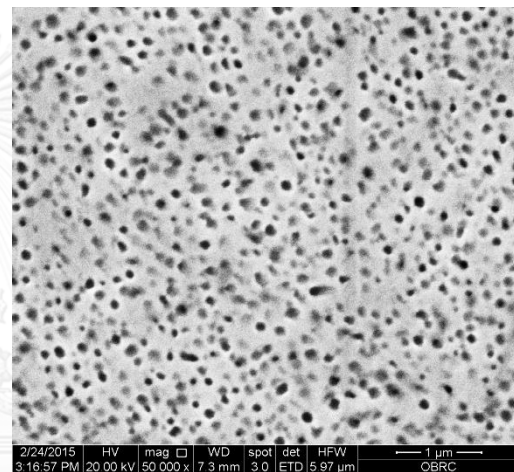
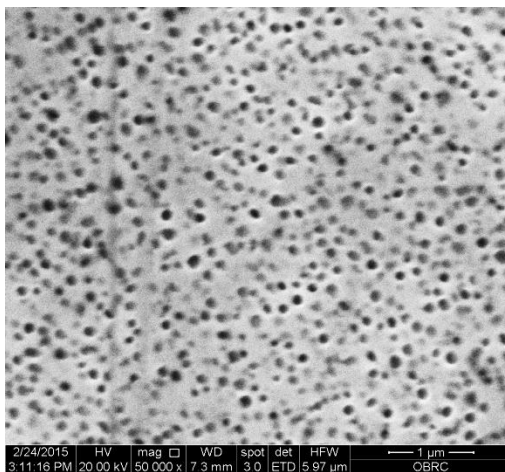
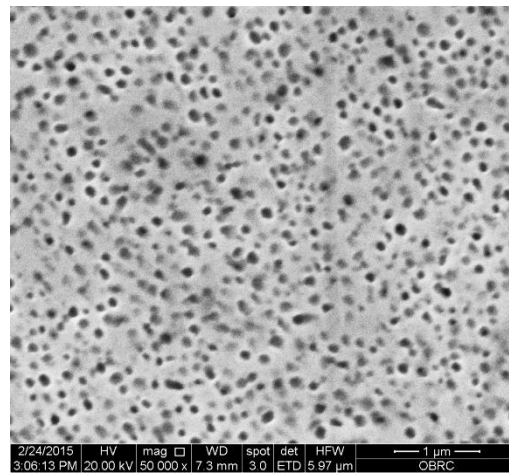


รูปที่ ข-13 โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ C 1-2-1 หลังผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง (กำลังขยาย 50,000 เท่า)

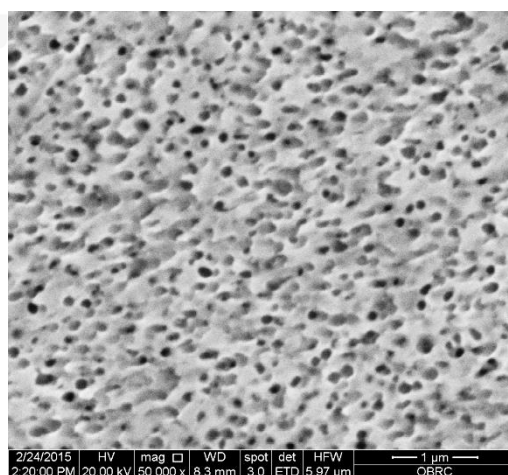
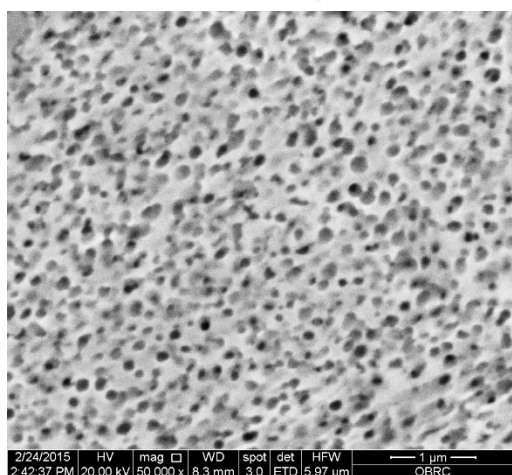
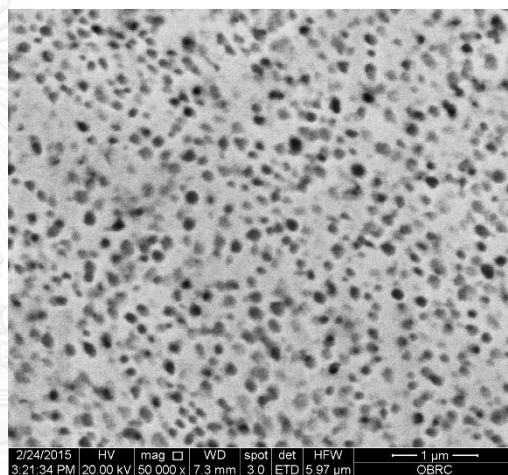
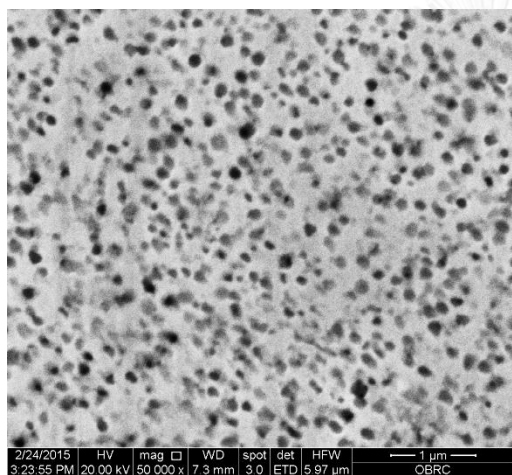
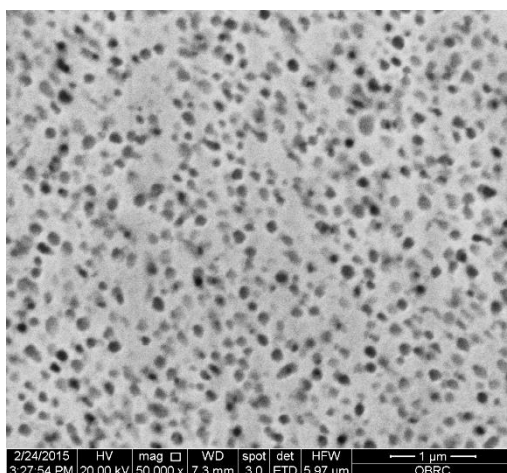


รูปที่ ข-14 โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ A 1-1-1-1 หลังผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง (กำลังขยาย 50,000 เท่า)





รูปที่ ข-15 โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ B 1-1-1-1 หลังผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง (กำลังขยาย 50,000 เท่า)



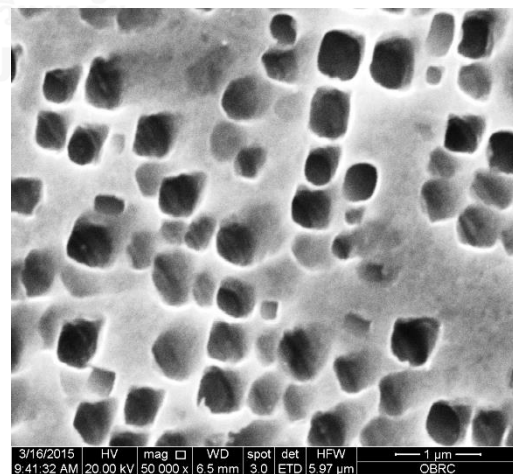
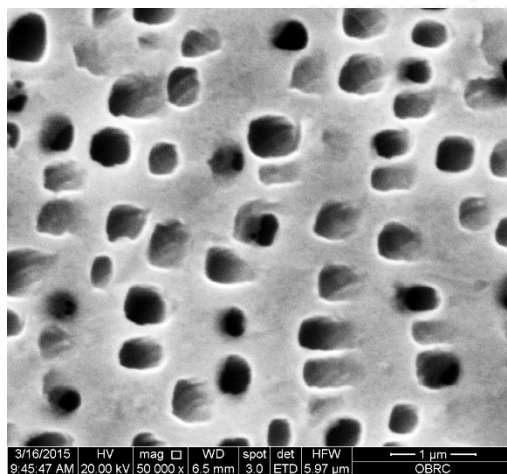
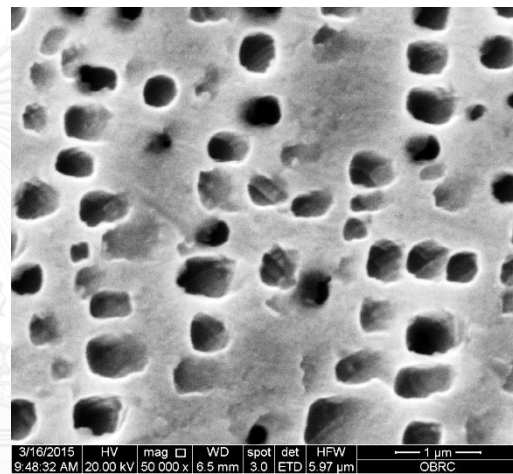
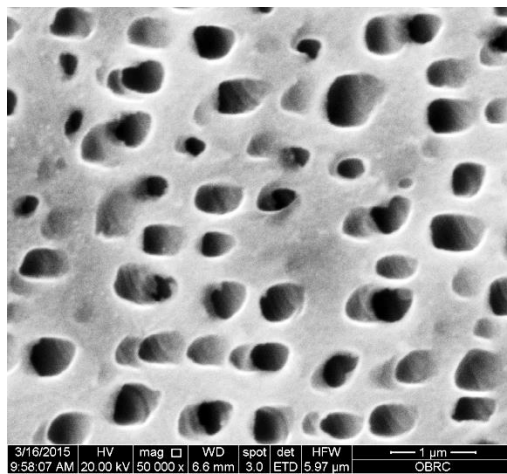
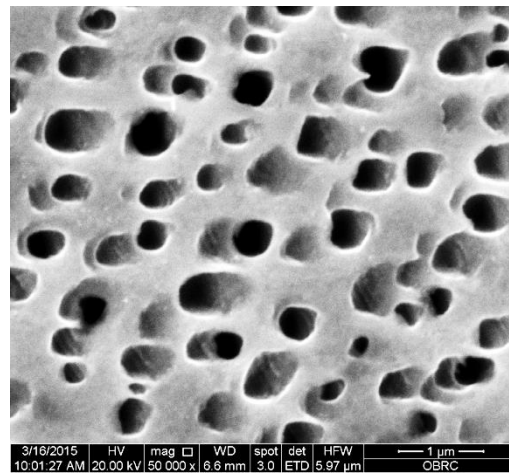
รูปที่ ข-16 โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ C 1-1-1-1 หลังผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง (กำลังขยาย 50,000 เท่า)



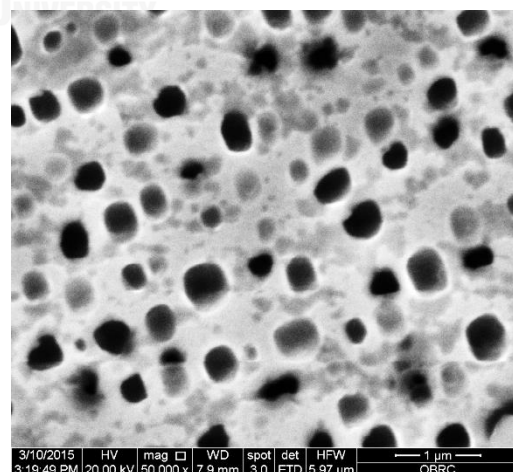
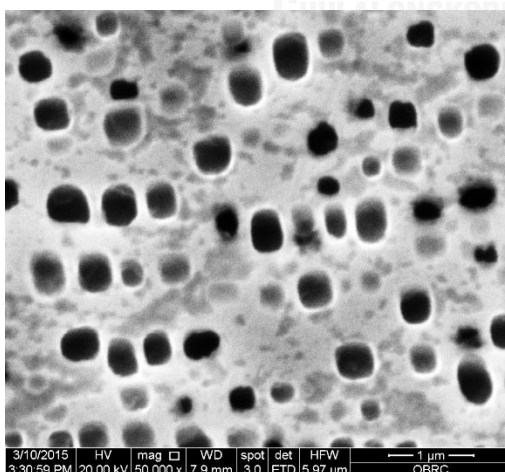
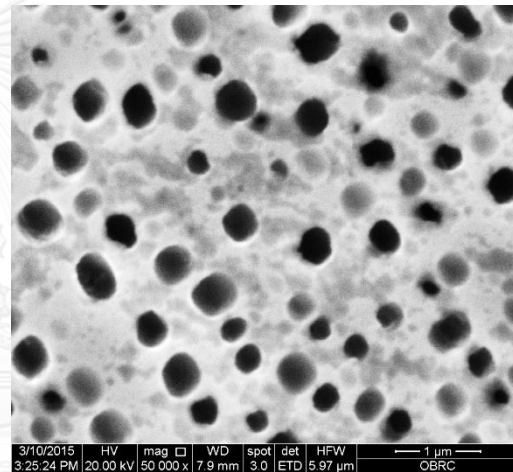
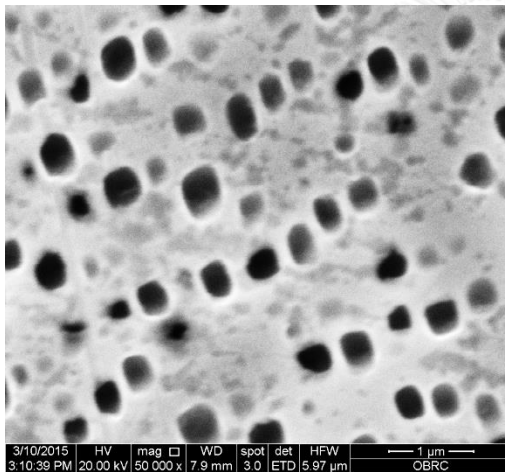
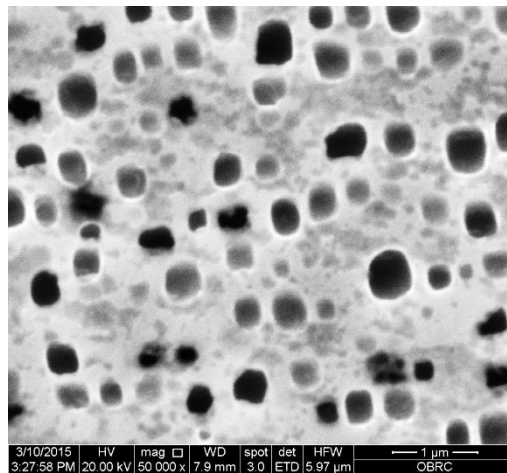
**ภาคผนวก ค**

(โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะต่างๆ  
หลังผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง)

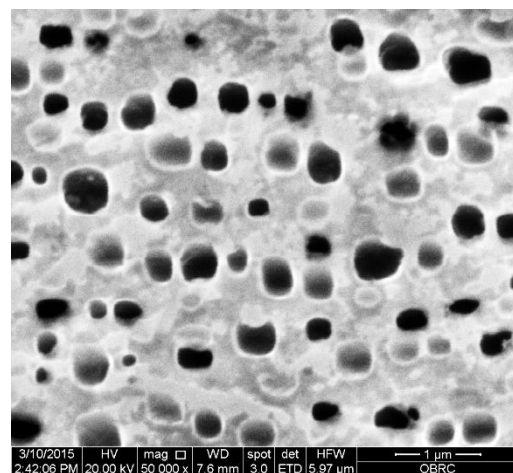
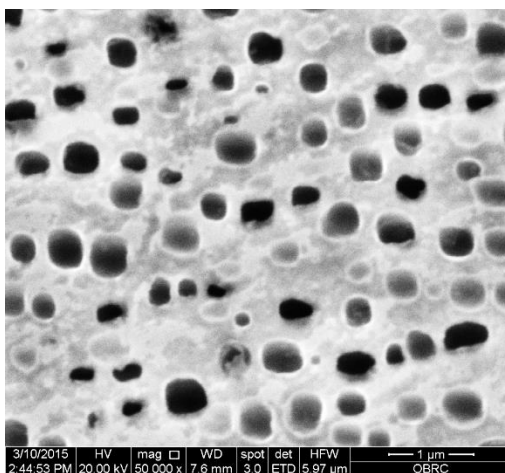
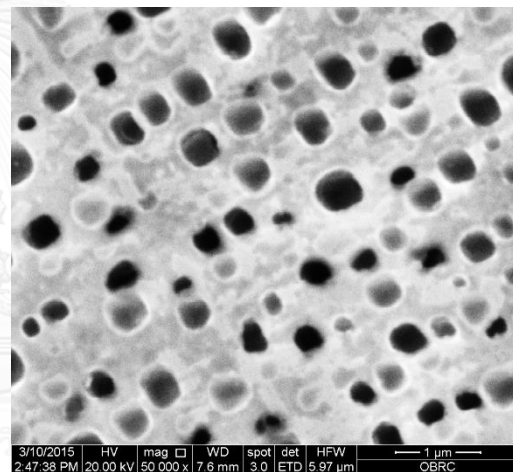
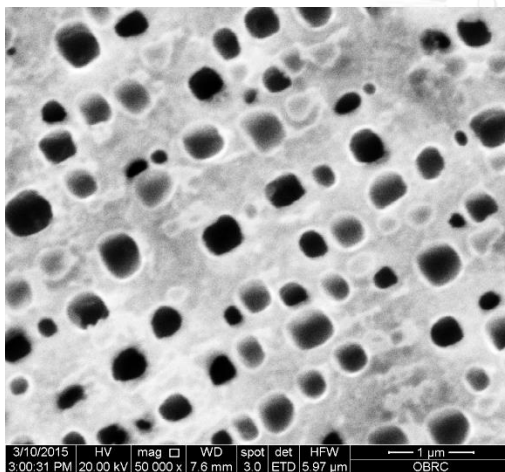
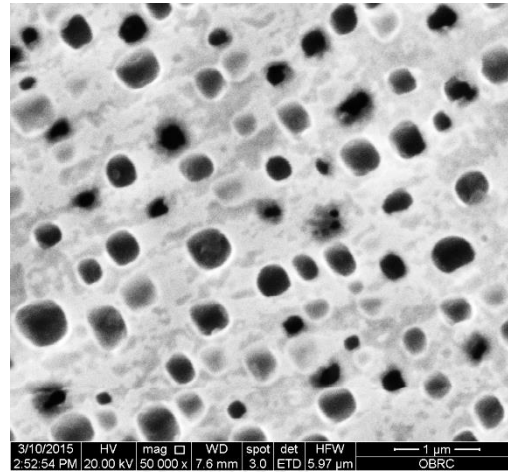
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ ค-1 โครงสร้างจุลภาคของสภาวะมาตรฐานหลังการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง (กำลังขยาย 50,000 เท่า)

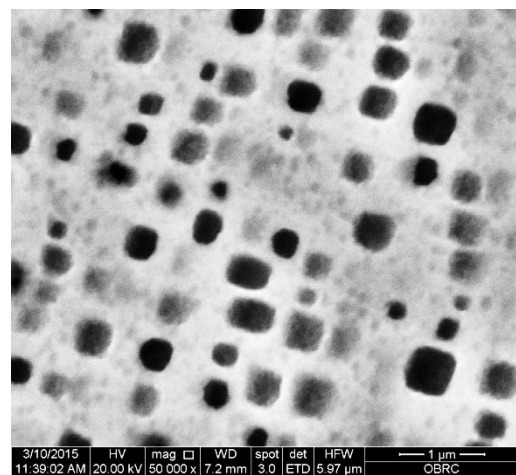
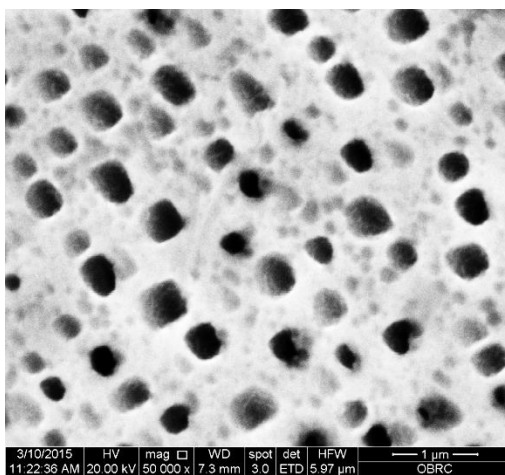
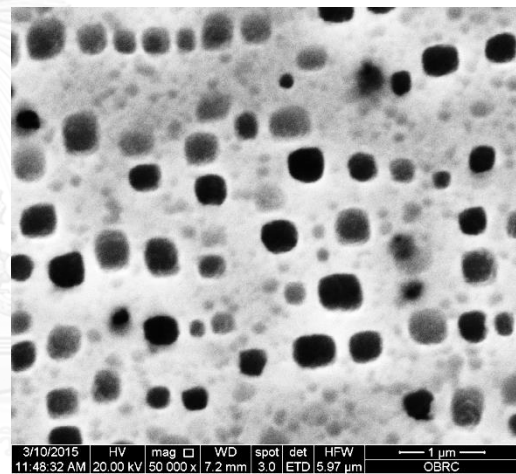
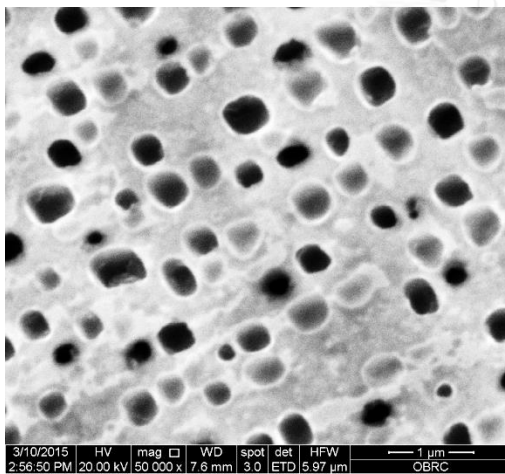
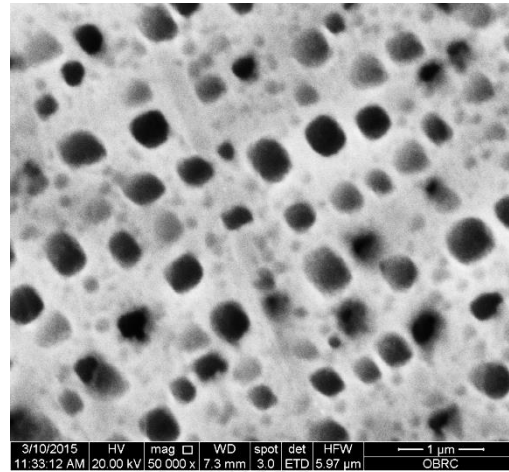


รูปที่ ค-2 โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ A 1-3 หลังผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง (กำลังขยาย 50,000 เท่า)

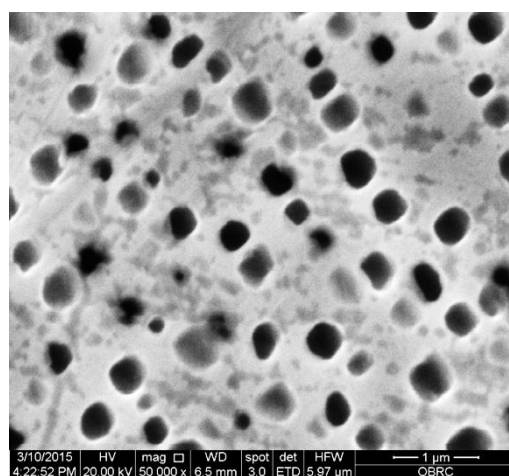
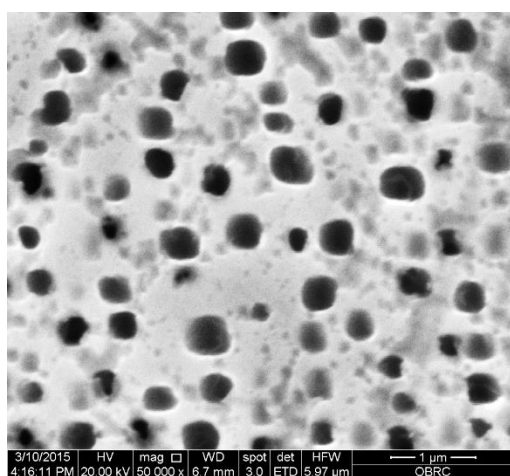
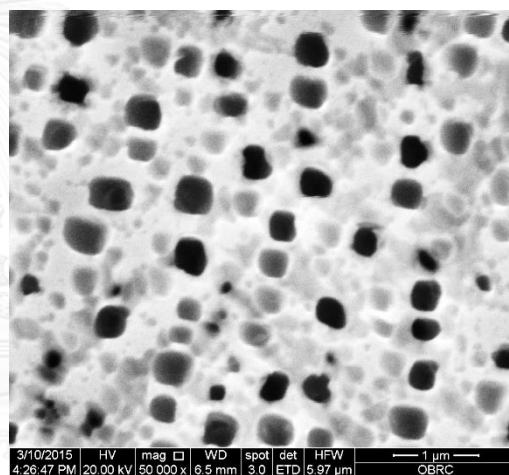
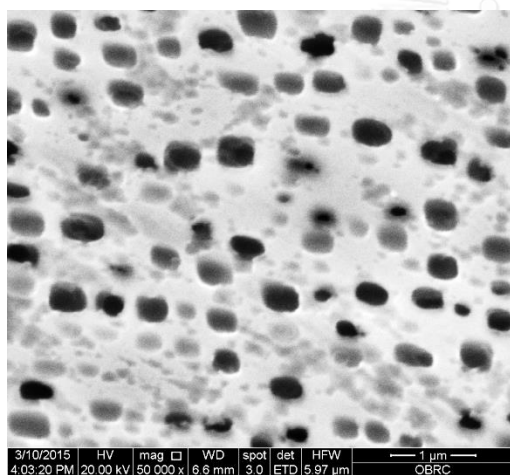
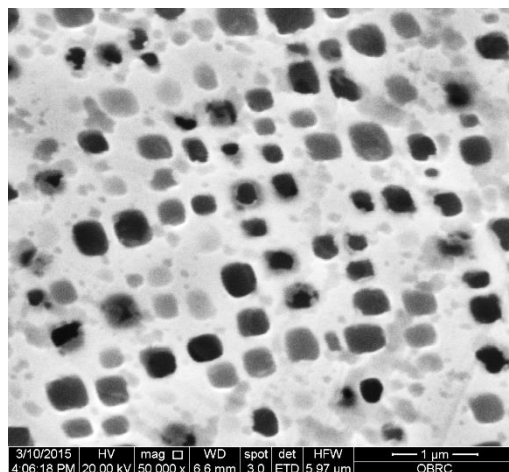


รูปที่ ค-3 โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ B 1-3 หลังผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง (กำลังขยาย 50,000 เท่า)



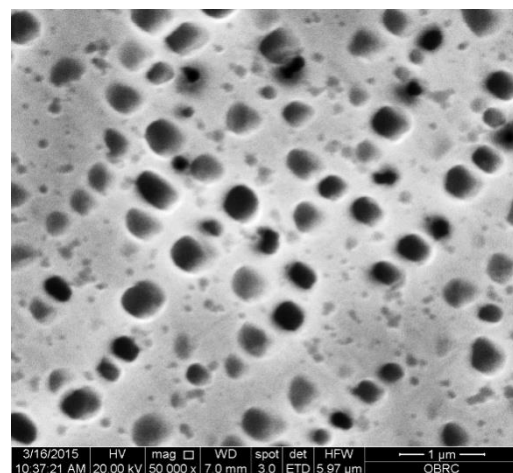
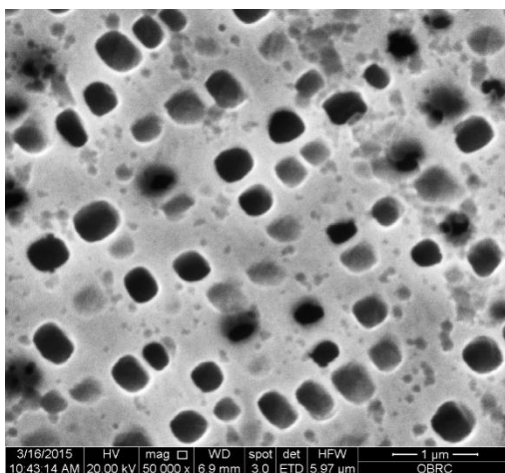
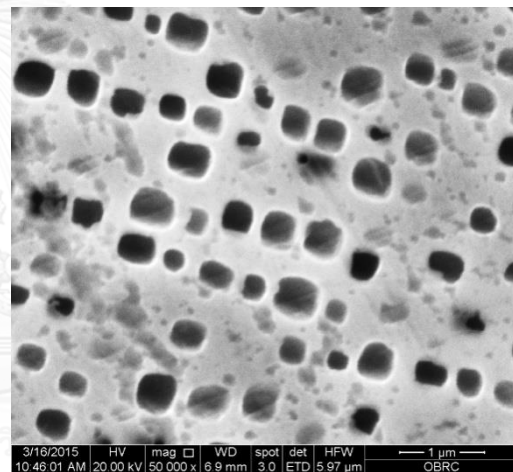
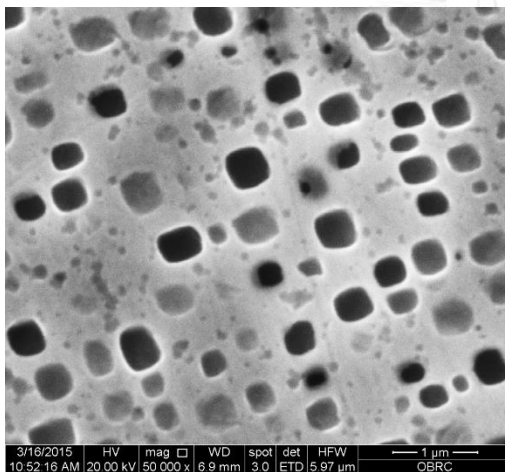
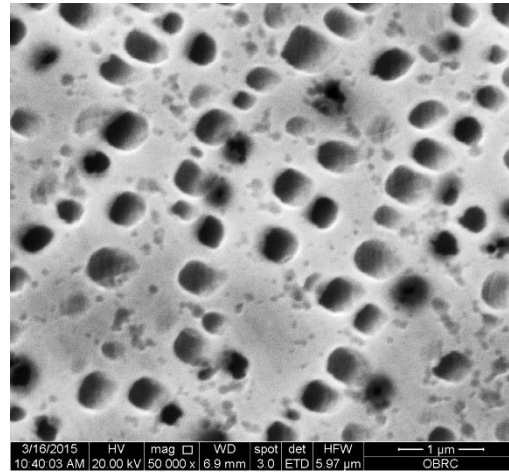


รูปที่ ค-4 โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ C 1-3 หลังผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง (กำลังขยาย 50,000 เท่า)

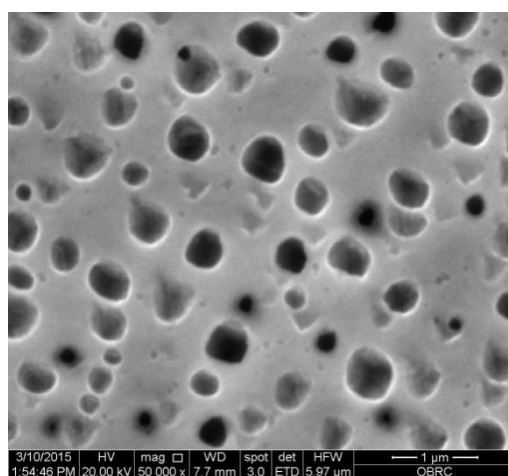
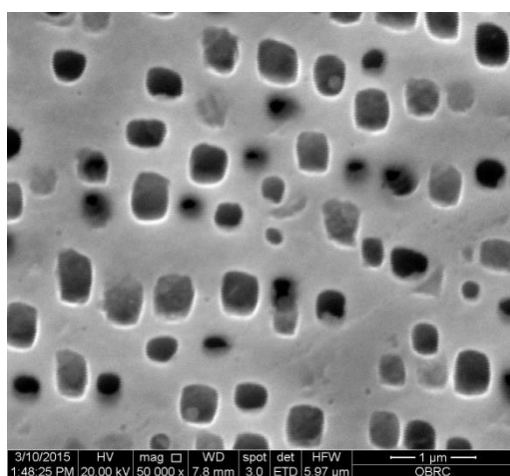
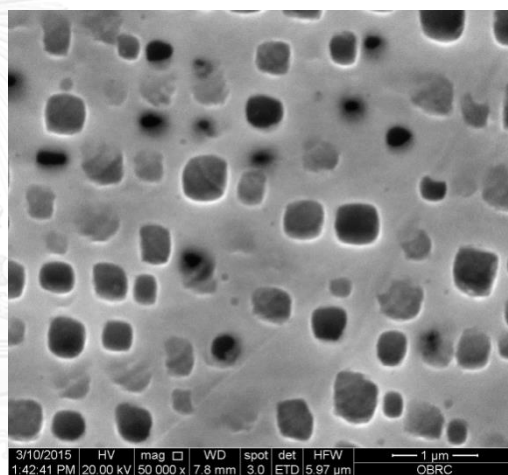
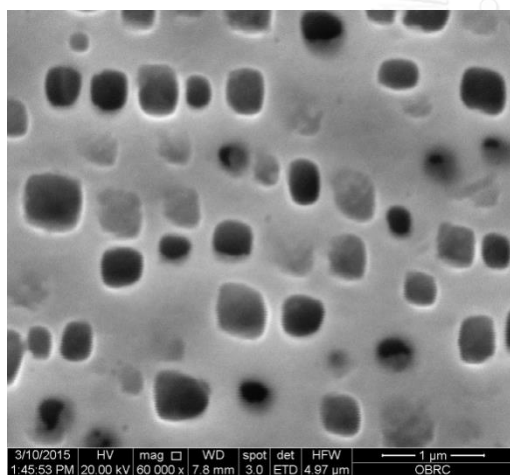
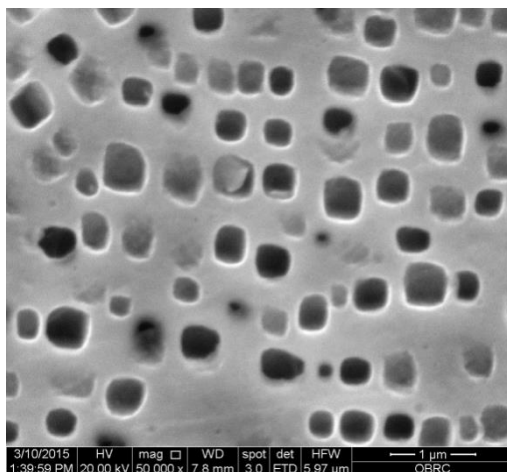


รูปที่ ค-5 โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ A 2-2 หลังผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง (กำลังขยาย 50,000 เท่า)

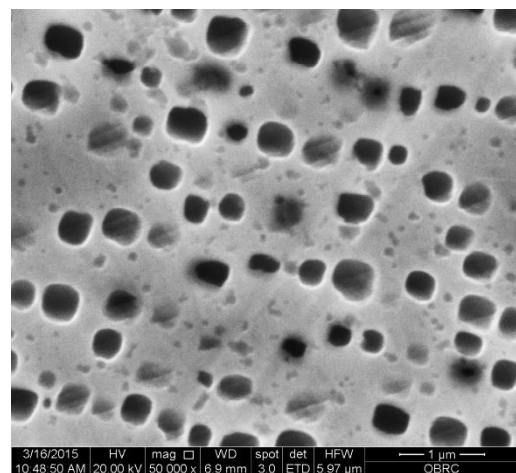
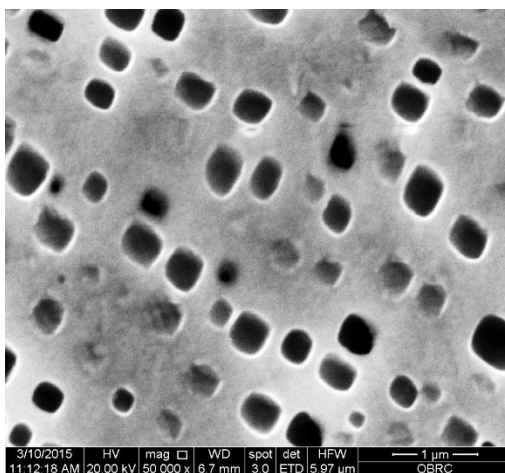
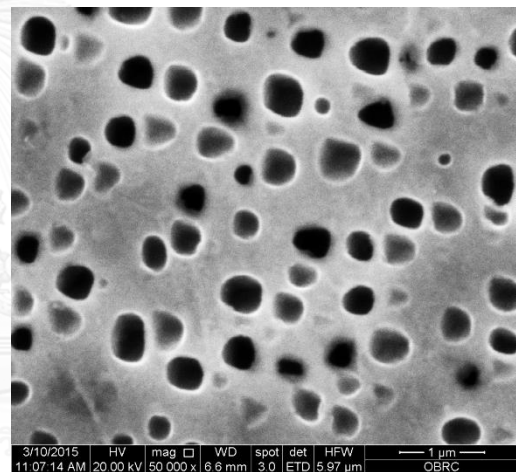
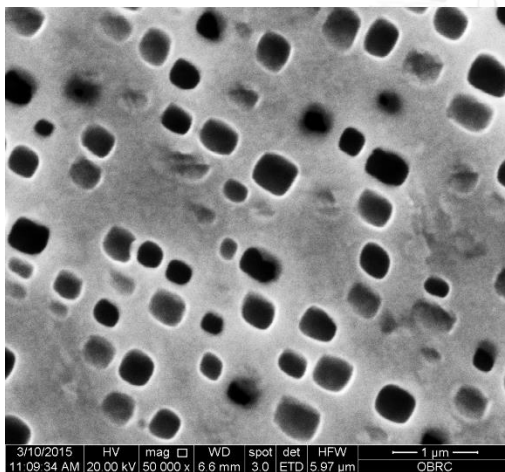
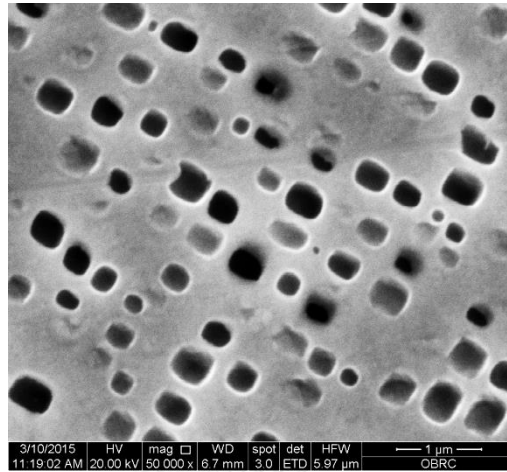




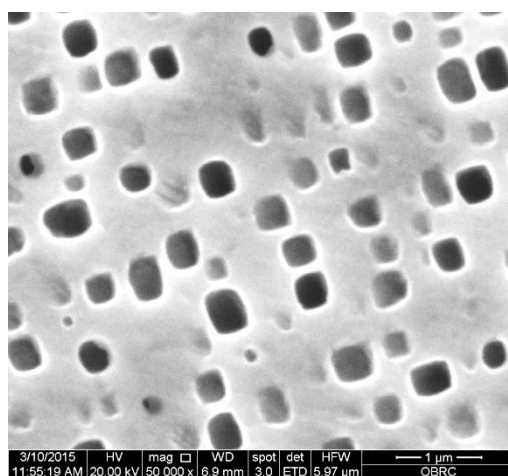
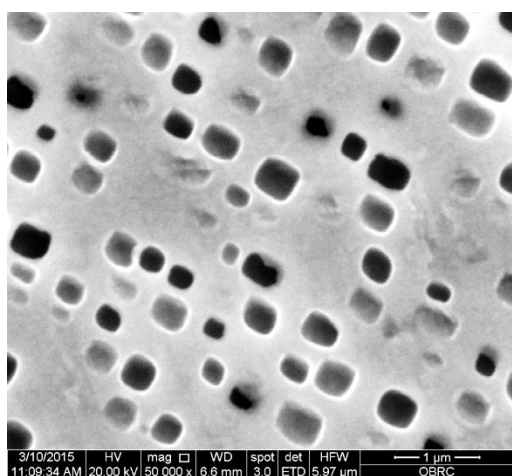
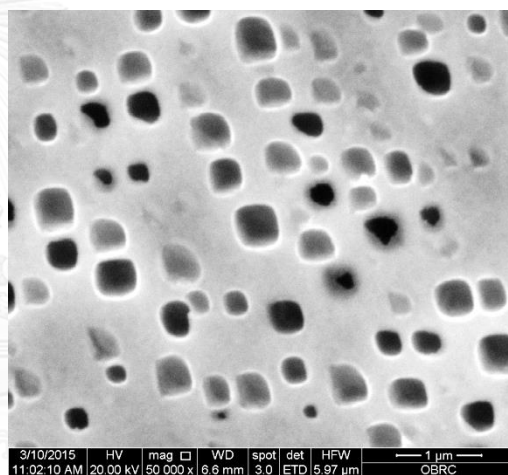
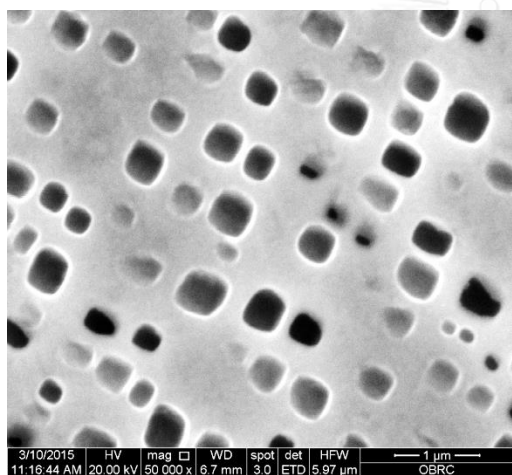
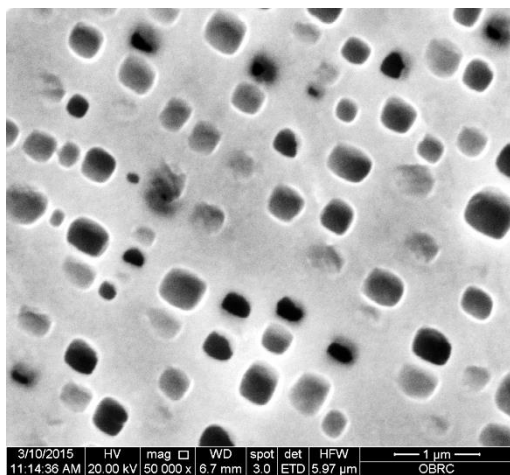
รูปที่ ค-6 โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ B 2-2 หลังผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง (กำลังขยาย 50,000 เท่า)



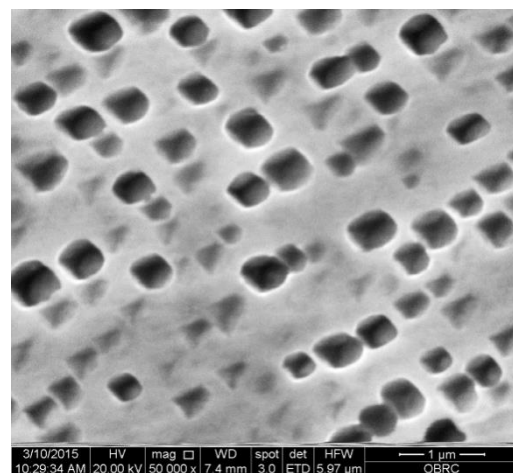
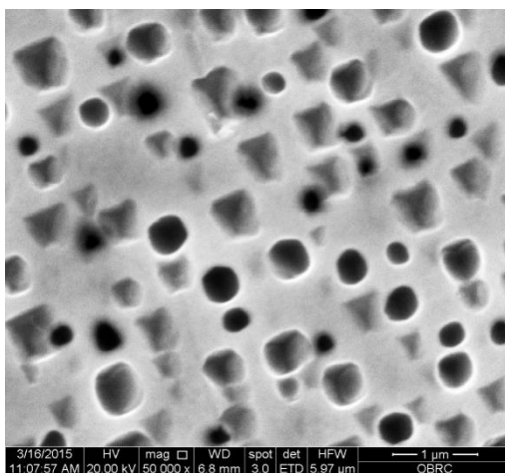
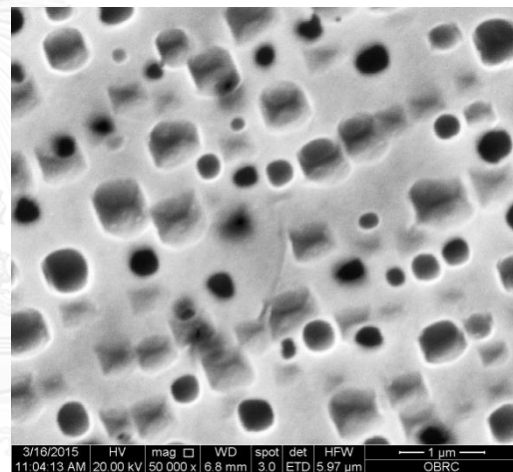
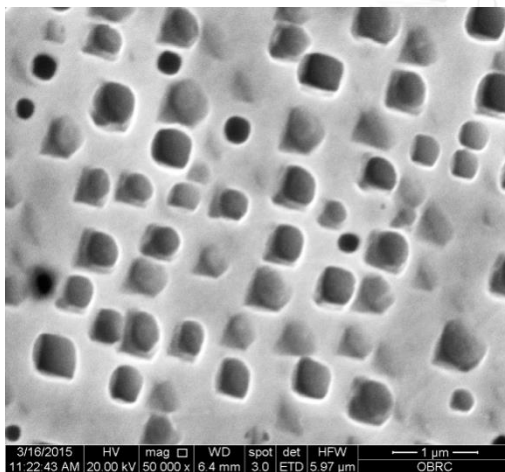
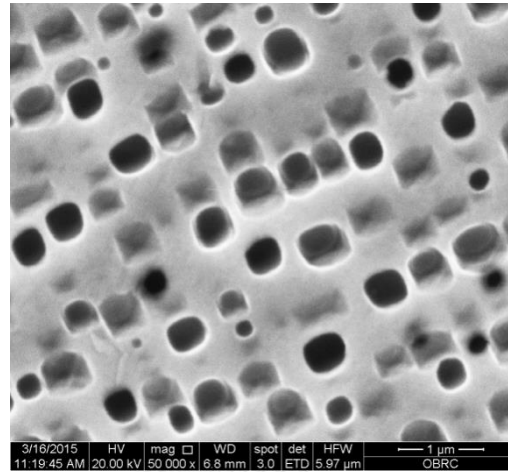
รูปที่ ค-7 โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ C 2-2 หลังผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง (กำลังขยาย 50,000 เท่า)



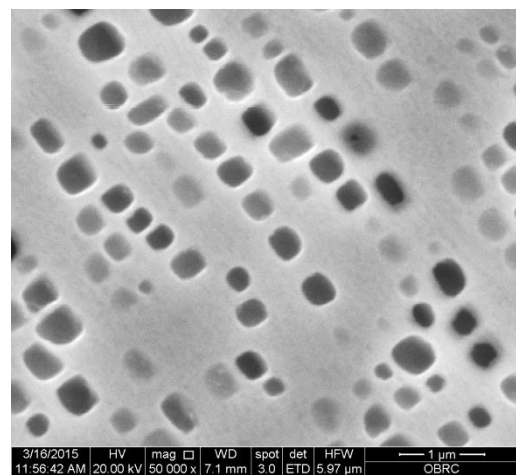
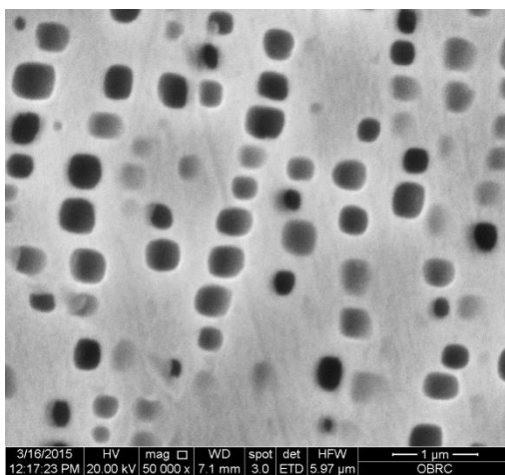
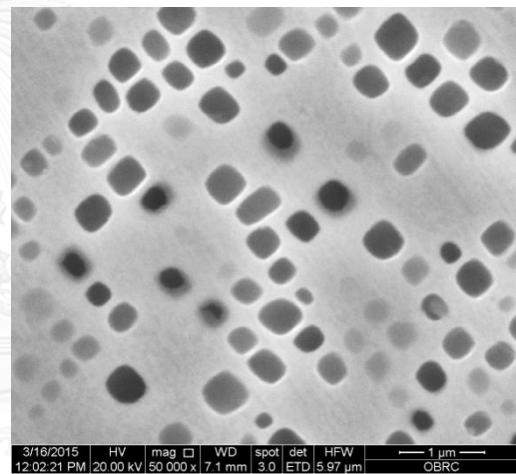
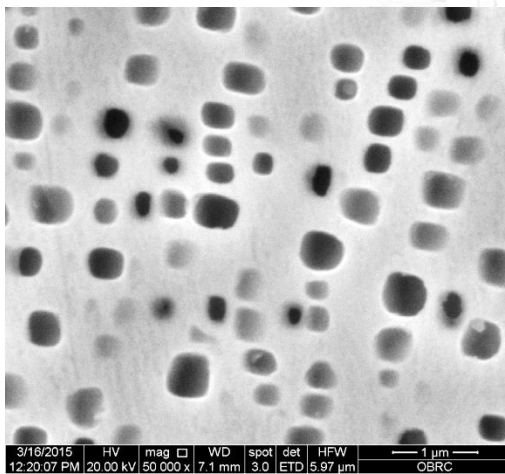
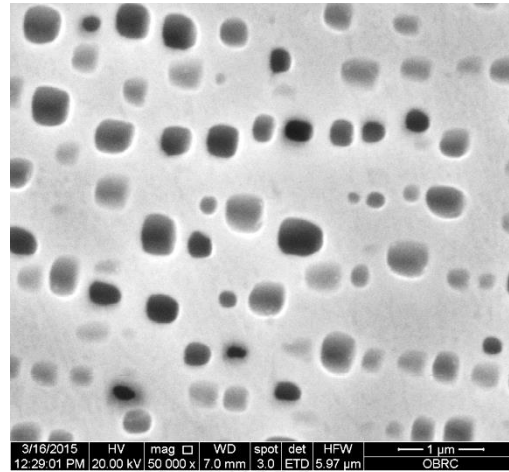
รูปที่ ค-8 โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ A 3-1 หลังผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง (กำลังขยาย 50,000 เท่า)



รูปที่ ค-9 โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ B 3-1 หลังผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง (กำลังขยาย 50,000 เท่า)

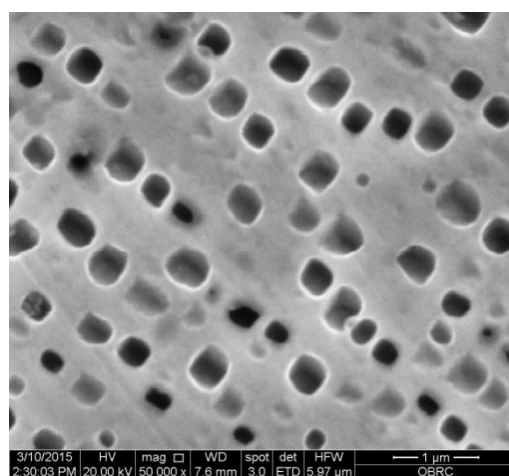
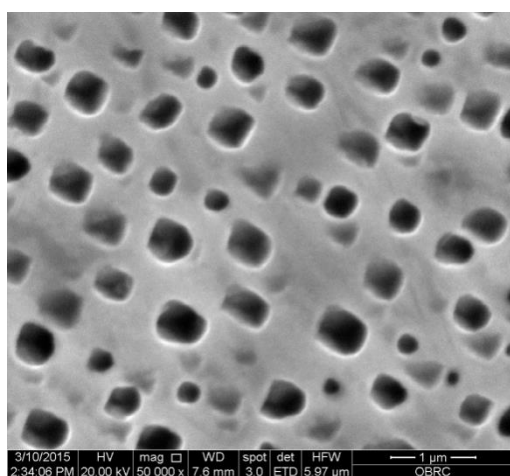
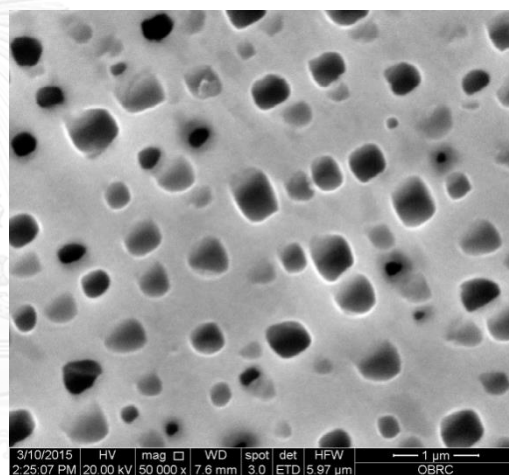
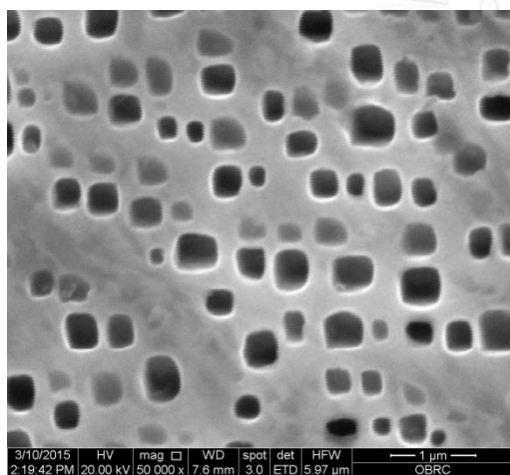
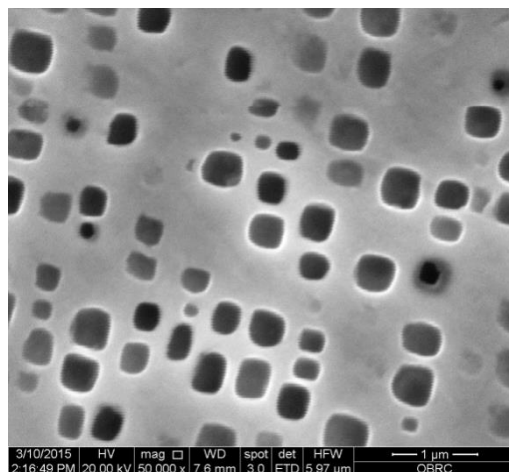


รูปที่ ค-10 โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ C 3-1 หลังผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง (กำลังขยาย 50,000 เท่า)

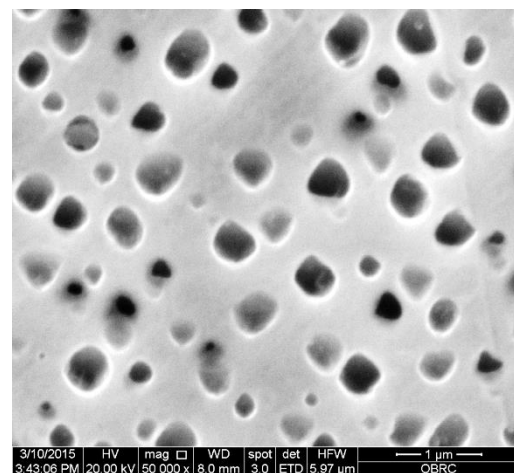
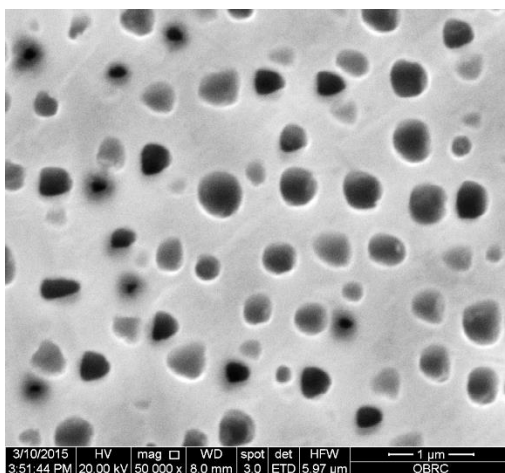
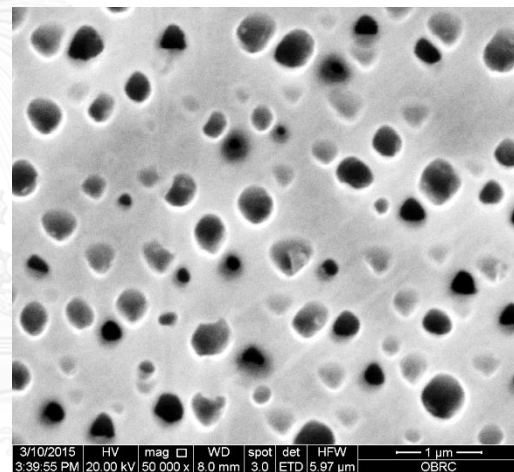
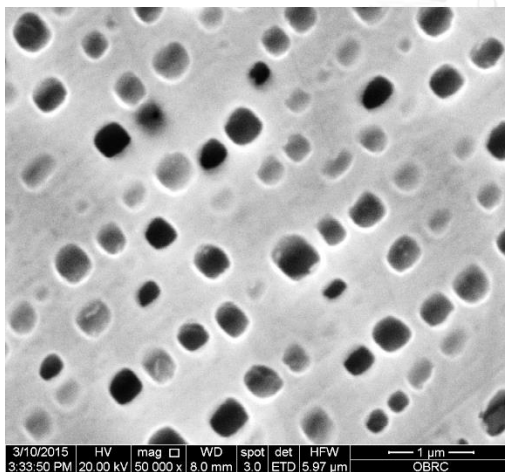
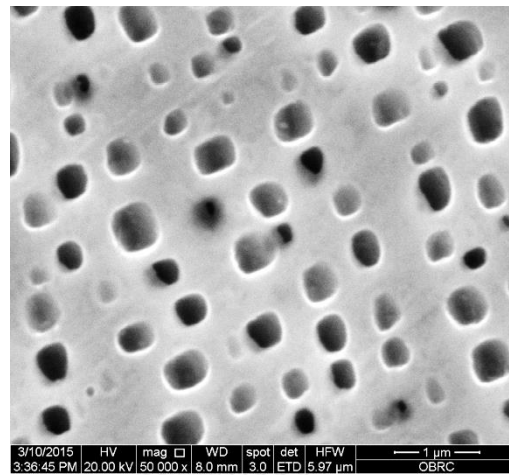


รูปที่ ค-11 โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ A 1-2-1 หลังผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง (กำลังขยาย 50,000 เท่า)



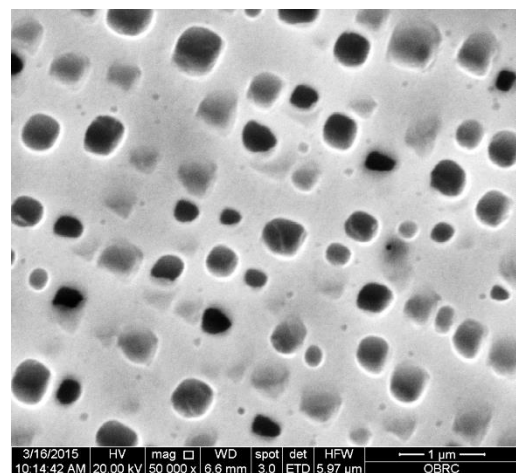
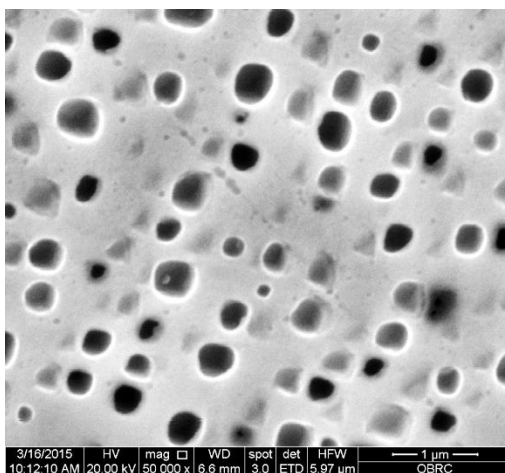
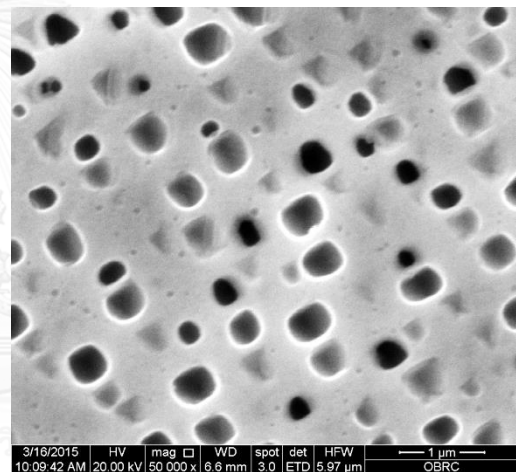
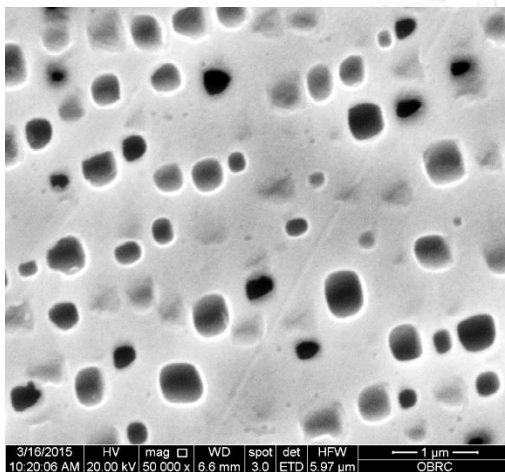
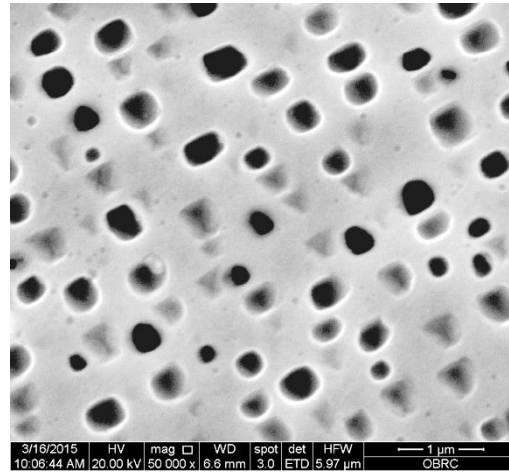


รูปที่ ค-12 โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ B 1-2-1 หลังผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง (กำลังขยาย 50,000 เท่า)

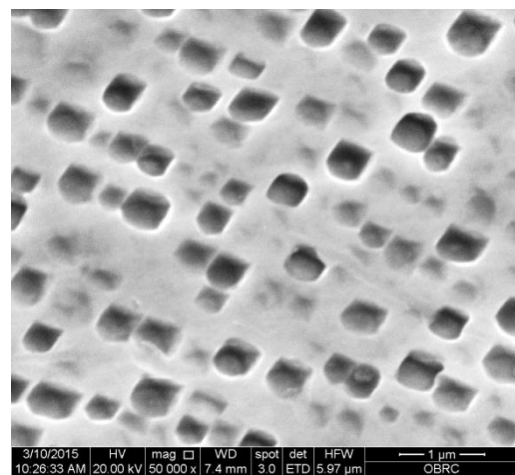
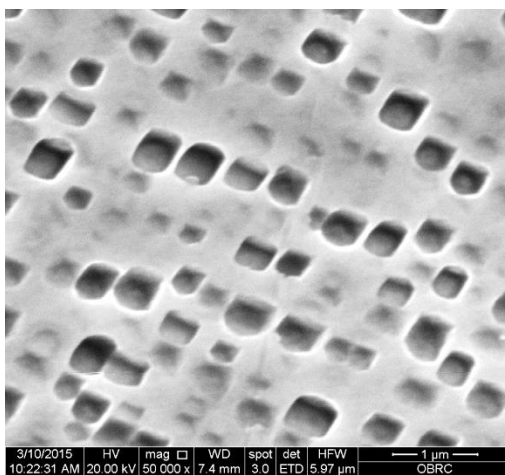
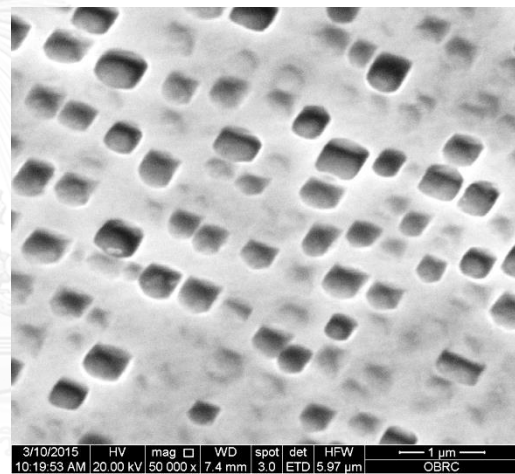
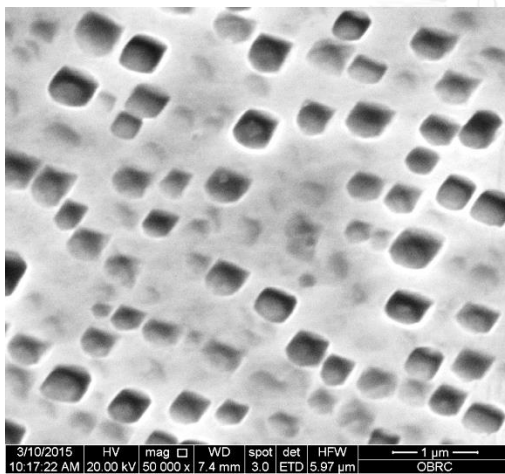
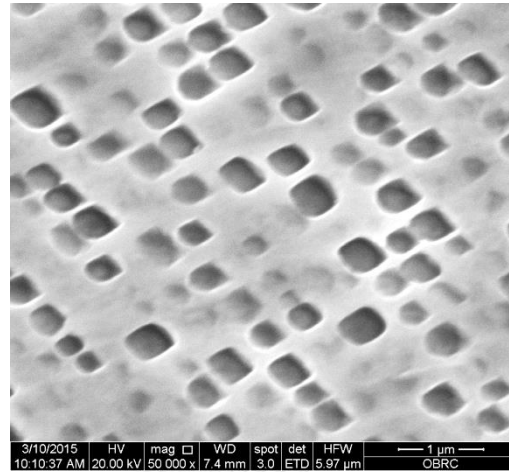


รูปที่ ค-13 โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ C 1-2-1 หลังผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง (กำลังขยาย 50,000 เท่า)

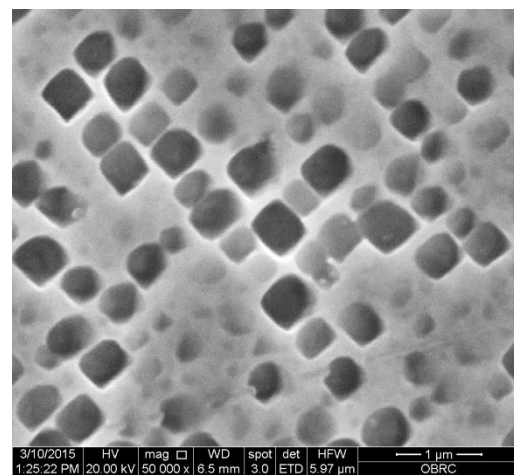
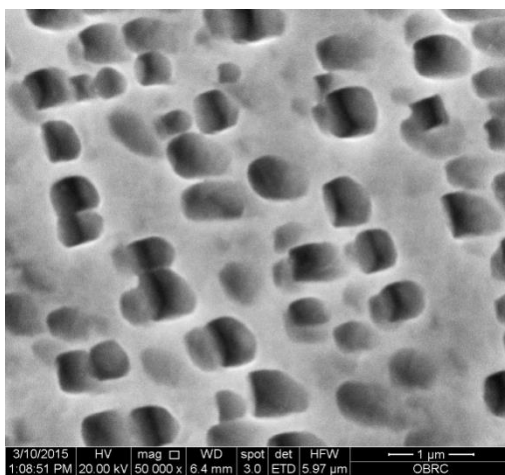
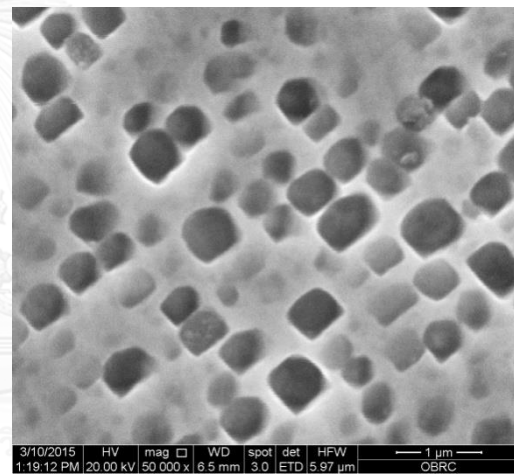
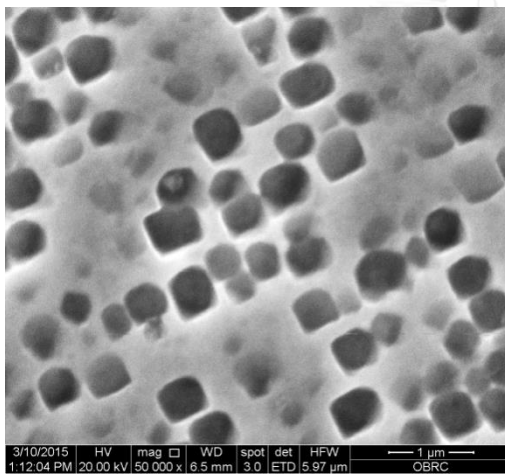
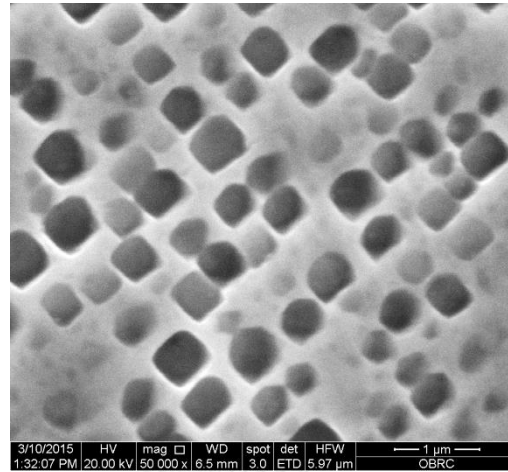




รูปที่ ค-14 โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ A 1-1-1-1 หลังผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง (กำลังขยาย 50,000 เท่า)



รูปที่ ค-15 โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ B 1-1-1-1 หลังผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง (กำลังขยาย 50,000 เท่า)



รูปที่ ค-16 โครงสร้างจุลภาคของสภาวะ C 1-1-1-1 หลังผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง (กำลังขยาย 50,000 เท่า)



ภาคผนวก ง  
(คำนวณพื้นที่ของแกมมาไพร์มเฉลี่ย)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางผนวก ง1 ขนาดโดยเฉลี่ยของอนุภาคแกมมาไพรม์ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะต่างๆ

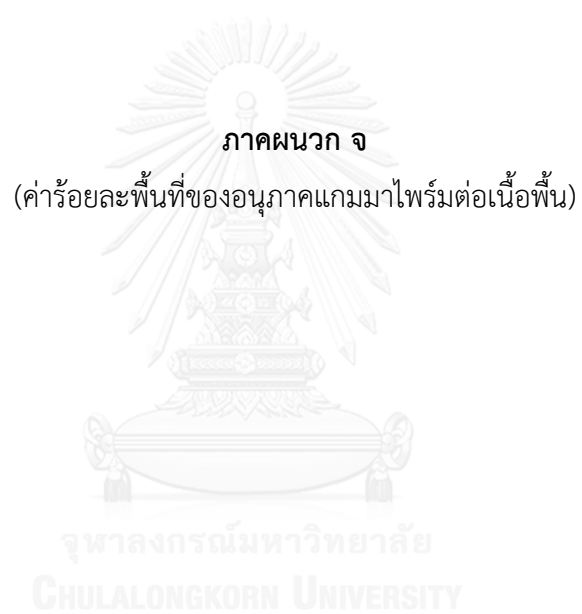
สภาวะการทดลอง	ขนาดพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพรม์โดยเฉลี่ย (ตารางไมครอน)					
	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย
As-Received	0.1641	0.1532	0.1505	0.1488	0.1387	0.1511
Standard	0.0031	0.0029	0.0041	0.0035	0.0041	0.0035
A 1,3	0.0020	0.0019	0.0020	0.0016	0.0015	0.0018
B 1,3	0.0023	0.0021	0.0019	0.0025	0.0019	0.0021
C 1,3	0.0018	0.0022	0.0025	0.0028	0.0023	0.0023
A 2,2	0.0018	0.0018	0.0023	0.0023	0.0025	0.0021
B 2,2	0.0025	0.0026	0.0026	0.0025	0.0031	0.0027
C 2,2	0.0029	0.0031	0.0038	0.0032	0.0033	0.0033
A 3,1	0.0015	0.0017	0.0021	0.0019	0.0022	0.0019
B 3,1	0.0023	0.0027	0.0020	0.0025	0.0029	0.0025
C 3,1	0.0027	0.0031	0.0026	0.0030	0.0034	0.0030
A 1,2,1	0.0022	0.0029	0.0025	0.0027	0.0030	0.0027
B 1,2,1	0.0027	0.0025	0.0030	0.0031	0.0034	0.0029
C 1,2,1	0.0031	0.0033	0.0033	0.0035	0.0038	0.0034
A 1,1,1,1	0.0027	0.0024	0.0031	0.0031	0.0033	0.0029
B 1,1,1,1	0.0031	0.0033	0.0030	0.0034	0.0035	0.0033
C 1,1,1,1	0.0030	0.0032	0.0034	0.0036	0.0037	0.0034

ตารางผนวก 2 ขนาดโดยเฉลี่ยของอนุภาคแกมมาไพรม์ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะต่างๆหลังผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง

สภาวะการทดลอง	ขนาดพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพรม์โดยเฉลี่ย (ตารางไมครอน)					ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	4	5	
Standard	0.0091	0.0091	0.0093	0.0095	0.0098	0.0094
A 1,3	0.0051	0.0057	0.0052	0.0050	0.0054	0.0053
B 1,3	0.0053	0.0059	0.0057	0.0073	0.0067	0.0062
C 1,3	0.0089	0.0095	0.0099	0.0103	0.0094	0.0096
A 2,2	0.0085	0.0081	0.0079	0.0075	0.0083	0.0081
B 2,2	0.0091	0.0089	0.0095	0.0095	0.0097	0.0093
C 2,2	0.0115	0.0103	0.0123	0.0114	0.0109	0.0113
A 3,1	0.0052	0.0059	0.0055	0.0061	0.0065	0.0058
B 3,1	0.0069	0.0058	0.0063	0.0069	0.0065	0.0065
C 3,1	0.0065	0.0068	0.0073	0.0084	0.0079	0.0074
A 1,2,1	0.0054	0.0061	0.0051	0.0065	0.0055	0.0057
B 1,2,1	0.0074	0.0088	0.0075	0.0086	0.0085	0.0082
C 1,2,1	0.0084	0.0084	0.0086	0.0088	0.0091	0.0087
A 1,1,1,1	0.0097	0.0134	0.0129	0.0125	0.0135	0.0124
B 1,1,1,1	0.0127	0.0139	0.0154	0.0162	0.0131	0.0143
C 1,1,1,1	0.0128	0.0137	0.0160	0.0158	0.0156	0.0148

ตารางผนวก ง3 ขนาดโดยเฉลี่ยของอนุภาคแกมมาไพรม์ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสภาวะต่างๆหลังผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง

สภาวะการทดลอง	ขนาดพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพรม์โดยเฉลี่ย (ตารางไมครอน)					
	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย
Standard	0.1712	0.1420	0.1492	0.1694	0.1658	0.1579
A 1,3	0.0453	0.0462	0.0492	0.0557	0.0496	0.0492
B 1,3	0.0485	0.0524	0.0573	0.0530	0.0496	0.0522
C 1,3	0.0491	0.0711	0.0674	0.0672	0.0702	0.0650
A 2,2	0.0502	0.0447	0.0501	0.0461	0.0439	0.0463
B 2,2	0.0672	0.0595	0.0641	0.0637	0.0640	0.0637
C 2,2	0.0725	0.0857	0.0830	0.0851	0.0912	0.0835
A 3,1	0.0489	0.0536	0.0590	0.0615	0.0554	0.0557
B 3,1	0.0583	0.0681	0.0593	0.0630	0.0628	0.0623
C 3,1	0.0719	0.0962	0.0954	0.0803	0.0868	0.0861
A 1,2,1	0.0522	0.0481	0.0429	0.0435	0.0439	0.0461
B 1,2,1	0.0589	0.0704	0.0659	0.0719	0.0723	0.0679
C 1,2,1	0.0785	0.0736	0.0706	0.0694	0.0752	0.0735
A 1,1,1,1	0.0579	0.0598	0.0701	0.0602	0.0588	0.0614
B 1,1,1,1	0.0705	0.0758	0.0740	0.0697	0.0774	0.0735
C 1,1,1,1	0.1238	0.1384	0.1062	0.1067	0.1058	0.1162





ตารางผนวก จ1 ค่าร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพรม์ต่อเนื้อพื้นที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน  
แบบสภาวะต่างๆ

สภาวะการ ทดลอง	ค่าร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพรม์ต่อเนื้อพื้นที่ (%)					
	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย
As- Received	30.16	26.04	26.12	27.01	27.36	27.34
Standard	15.94	17.83	19.57	21.04	20.45	18.97
A 1,3	19.20	16.53	16.98	15.66	18.96	17.47
B 1,3	17.89	18.79	17.61	18.97	18.59	18.37
C 1,3	20.54	18.61	18.75	19.72	20.99	19.72
A 2,2	15.32	16.54	18.95	16.21	17.37	16.88
B 2,2	23.01	16.78	17.94	18.58	19.64	19.19
C 2,2	19.94	21.03	22.21	20.06	19.05	20.46
A 3,1	17.50	18.94	19.03	19.56	19.91	18.99
B 3,1	23.17	20.56	19.60	22.35	22.97	21.73
C 3,1	22.34	27.82	25.65	26.01	26.65	25.69
A 1,2,1	19.56	20.87	22.59	22.34	20.86	21.24
B 1,2,1	25.07	22.04	23.52	22.16	23.49	23.26
C 1,2,1	25.61	23.46	25.80	25.62	24.58	25.01
A 1,1,1,1	23.61	20.14	20.54	20.07	22.34	21.34
B 1,1,1,1	25.92	24.78	21.94	22.56	27.78	24.60
C 1,1,1,1	23.86	25.79	26.05	24.98	25.53	25.24

ตารางผนวก จ2 ค่าร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพรม์ต่อเนื้อพื้นที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสถานะต่างๆหลังผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง

สภาวะการทดลอง	ค่าร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพรม์ต่อเนื้อพื้นที่ (%)					
	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย
Standard	21.56	23.52	20.92	23.19	24.95	22.83
A 1,3	20.60	27.21	23.17	24.59	23.68	23.85
B 1,3	24.86	21.74	22.73	28.64	26.72	24.94
C 1,3	21.10	27.89	24.02	28.01	29.14	26.03
A 2,2	27.90	20.13	19.49	21.57	25.08	22.83
B 2,2	25.60	23.26	23.07	23.34	20.08	23.07
C 2,2	23.90	23.94	21.89	25.31	23.87	23.78
A 3,1	22.00	22.78	23.06	23.54	23.91	23.06
B 3,1	23.96	23.78	23.79	24.47	22.94	23.79
C 3,1	28.04	21.46	25.67	29.71	28.78	26.73
A 1,2,1	24.34	24.60	23.79	23.61	28.95	25.06
B 1,2,1	24.97	27.89	27.92	28.04	26.61	27.09
C 1,2,1	25.04	28.07	24.38	26.04	28.52	26.41
A 1,1,1,1	29.43	25.97	26.90	28.86	28.71	27.97
B 1,1,1,1	27.07	30.6	29.4	30.11	29.78	29.39
C 1,1,1,1	31.50	29.57	30.8	30.73	30.2	30.56

ตารางผนวก จ3 ค่าร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพรม์ต่อเนื้อพื้นที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบสถานะต่างๆหลังผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลารวม 1,000 ชั่วโมง

สภาวะการทดลอง	ค่าร้อยละพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพรม์ต่อเนื้อพื้นที่ (%)					
	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย
Standard	30.86	33.57	37.90	29.49	30.97	32.56
A 1,3	29.78	24.50	25.08	28.09	25.26	26.54
B 1,3	25.80	27.94	24.79	27.65	27.65	26.77
C 1,3	30.21	25.07	24.61	27.94	30.42	27.65
A 2,2	25.08	23.05	21.95	22.48	22.80	23.07
B 2,2	25.73	23.94	24.17	22.61	20.27	23.34
C 2,2	27.00	24.65	23.34	25.97	26.00	25.39
A 3,1	20.58	25.03	22.41	25.04	23.24	23.26
B 3,1	23.96	24.59	21.98	27.04	24.80	24.47
C 3,1	31.62	29.03	33.01	27.52	29.71	30.18
A 1,2,1	22.38	26.07	22.57	27.05	28.09	25.23
B 1,2,1	27.89	26.94	24.63	29.41	27.43	27.26
C 1,2,1	32.23	30.17	32.10	28.95	31.21	30.93
A 1,1,1,1	29.94	25.49	27.04	28.11	27.48	27.61
B 1,1,1,1	37.15	35.18	30.29	31.56	33.47	33.53
C 1,1,1,1	45.37	37.19	43.06	36.03	40.11	40.35

ภาคผนวก ฉ  
(ค่าความแข็งจุดภาค)



ตารางผนวก ฉ1 ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อปรับปรุงโครงสร้าง  
จุลภาคสภาวะแบบต่างๆ

สภาวะการทดลอง	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ค่าเฉลี่ย
As-Received	330	349	336	373	379	297	286	297	280	281	319
Standard	344	385	361	394	397	312	357	364	374	368	365
A 1,3	365	335	389	385	396	387	383	367	384	413	380
B 1,3	373	360	377	378	368	379	377	394	404	407	381
C 1,3	327	360	392	369	348	349	381	373	383	357	364
A 2,2	365	385	369	381	386	398	372	390	381	389	381
B 2,2	386	384	371	380	388	385	371	391	383	387	382
C 2,2	376	388	385	390	382	389	378	383	385	381	384
A 3,1	386	389	399	381	384	373	395	387	393	388	387
B 3,1	389	373	398	403	380	375	386	379	391	386	386
C 3,1	397	390	354	387	380	380	381	387	375	379	381
A 1,2,1	378	387	367	363	379	372	387	376	383	374	376
B 1,2,1	342	390	389	381	391	373	378	376	381	389	379
C 1,2,1	367	390	393	388	388	387	392	389	387	384	386
A 1,1,1,1	398	406	405	393	393	402	398	400	407	399	400
B 1,1,1,1	388	392	409	394	383	400	405	398	394	385	394
C 1,1,1,1	383	380	394	408	388	398	390	376	388	374	388

ตารางผนวก ฉ2 ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อปรับปรุงโครงสร้าง  
 จุลภาคสภาวะแบบต่างๆหลังผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา  
 รวม 1,000 ชั่วโมง

สภาวะการทดลอง	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ค่าเฉลี่ย
Standard	300	326	353	351	353	344	335	342	338	345	338
A 1,3	316	300	322	313	303	334	327	309	315	313	315
B 1,3	327	340	311	346	344	342	336	343	342	335	336
C 1,3	324	334	333	334	333	338	332	334	342	337	334
A 2,2	353	358	363	369	360	366	362	362	358	361	361
B 2,2	342	353	367	367	365	364	353	358	360	364	359
C 2,2	355	360	323	364	353	335	342	349	351	348	348
A 3,1	344	336	359	349	342	369	357	348	351	345	350
B 3,1	367	354	344	352	359	289	367	370	354	353	350
C 3,1	292	322	305	301	340	341	313	313	322	314	316
A 1,2,1	335	343	335	343	359	362	354	338	348	343	346
B 1,2,1	358	368	319	325	373	350	344	326	331	342	343
C 1,2,1	319	370	374	364	310	334	331	337	332	330	334
A 1,1,1,1	328	335	327	336	357	348	351	331	337	341	339
B 1,1,1,1	362	359	357	372	366	364	359	365	368	362	364
C 1,1,1,1	322	370	353	342	317	362	340	345	351	338	343

ตารางผนวก ฉ3 ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อปรับปรุงโครงสร้าง  
จุลภาคสภาวะแบบต่างๆหลังผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา  
รวม 1,000 ชั่วโมง

สภาวะการทดลอง	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ค่าเฉลี่ย
Standard	296	299	305	310	307	301	302	304	301	305	303
A 1,3	295	296	311	313	286	318	312	306	302	303	304
B 1,3	311	298	310	292	311	290	301	303	301	303	302
C 1,3	294	313	277	307	286	292	303	296	299	293	296
A 2,2	250	257	259	269	267	272	265	268	270	272	265
B 2,2	294	281	311	299	298	268	289	287	291	272	291
C 2,2	262	270	281	286	289	272	277	274	276	280	276
A 3,1	312	307	283	296	327	294	302	304	306	303	303
B 3,1	292	303	316	307	313	305	309	307	303	305	306
C 3,1	302	320	317	287	315	355	311	313	318	314	315
A 1,2,1	289	282	316	294	279	292	293	291	290	293	292
B 1,2,1	307	308	322	304	311	313	322	311	313	313	312
C 1,2,1	286	307	305	316	291	303	298	302	300	299	301
A 1,1,1,1	296	293	275	304	303	298	303	297	298	291	296
B 1,1,1,1	289	286	294	308	280	311	292	299	295	293	295
C 1,1,1,1	299	324	309	310	296	301	303	308	311	313	307

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวกฤษฎานีย์ แซ่ล้อ เกิดเมื่อวันที่ 14 มีนาคม พ.ศ.2532 ที่จังหวัดสุราษฎร์ธานี เป็นบุตรของนางเยาวลักษณ์ ศรีสุจริต และนายจ้อย แซ่ล้อ สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ปีการศึกษา 2554 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2555

