

ผลกระทบจากกรรมวิธีทางความร้อนในการฟื้นฟูโครงสร้างจุลภาคในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้เหล็กที่
ได้จากการหล่อและผ่านการให้ความร้อนมาเป็นระยะเวลาานาน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมและเทคโนโลยีการป้องกันประเทศ ไม่สังกัดภาควิชา/เทียบเท่า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Effect of reheat treatment on rejuvenated microstructures of various cast nickel base
superalloys after long term exposure



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Defense Engineering and Technology

Common Course

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2020

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลกระทบจากกรรมวิธีทางความร้อนในการฟื้นฟูโครงสร้าง
จุลภาคในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้เหล็กที่ได้จากการหล่อ
และผ่านการให้ความร้อนมาเป็นระยะเวลาานาน
โดย น.ส.วรา วัชรถานนท์
สาขาวิชา วิศวกรรมและเทคโนโลยีการป้องกันประเทศ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปัญญาวัชร วั่งยาว
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม พันเอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพร นุตยະสกุล
ดร.เจียเขียน ฉิน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิฑิต ปานสุข)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปัญญาวัชร วั่งยาว)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(พันเอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพร นุตยະสกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร.เจียเขียน ฉิน)

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

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนพร โรจน์หิรัญสกุล)

วรา วัชรธานนท์ : ผลกระทบจากกรรมวิธีทางความร้อนในการฟื้นฟูโครงสร้างจุลภาคในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้หนักเกิลที่ได้จากการหล่อและผ่านการให้ความร้อนมาเป็นระยะเวลานาน. (Effect of reheat treatment on rejuvenated microstructures of various cast nickel base superalloys after long term exposure) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.ปัญญาวัชร วัช ยาว, อ.ที่ปรึกษาร่วม : พ.อ. ผศ. ดร.ณัฐพร นุตยะสกุล,ดร.เจียเขียน ฉิน

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและประเมินผลของการทำกรรมวิธีทางความร้อน ซึ่งประกอบด้วย การทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ และการ บ่มแข็งที่อุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ เพื่อปรับปรุง และฟื้นฟูโครงสร้างจุลภาคในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้หนักเกิลเกรดจีทีดี-111 ที่มีการเติมธาตุอะลูมิเนียม, นิกเกิล และ/หรือโคบอลต์เพิ่มเติม หลังจากผ่านการจำลองการใช้งานจริงที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 400 ชั่วโมง พบว่าการทำกรรมวิธีทางความร้อนด้วยเงื่อนไขนี้ เหมาะสมกับชิ้นงานที่ผ่านการจำลองการใช้งานจริงที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส แต่โครงสร้างจุลภาคที่ เกิดขึ้นยังไม่สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ทั้งหมด เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานดั้งเดิม ที่ยังไม่ผ่านการจำลองการใช้งานจริงจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิ และ/หรือเวลาที่ ใช้ในการทำละลายยังไม่มากเพียงพอต่อการละลายอนุภาคแกมมาไพรม์แบบหยาบให้กลับสู่เนื้อพื้ นแกมมาได้ สำหรับแนวโน้มของการเติมธาตุผสมทั้งสามต่อขนาดของอนุภาคแกมมาไพรม์และสัดส่วนเชิง พื้นที่ของเฟสแกมมาไพรม์ที่เกิดขึ้นหลังจากการทำกรรมวิธีทางความร้อน มีความใกล้เคียงกับผลที่ได้จาก ชิ้นงานดั้งเดิมมาก แต่อย่างไรก็ตามค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยภาพถ่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งขนาด ของอนุภาคแกมมาไพรม์มีค่าน้อยกว่าชิ้นงานดั้งเดิม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา	วิศวกรรมและเทคโนโลยีการ ป้องกันประเทศ	ลายมือชื่อนิสิต
ปีการศึกษา	2563	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก
		ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม
		ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

6070305621 : MAJOR DEFENSE ENGINEERING AND TECHNOLOGY

KEYWORD: rejuvenation reheat treatment, alloying element addition, modified alloys

Vara Vacharatanon : Effect of reheat treatment on rejuvenated microstructures of various cast nickel base superalloys after long term exposure. Advisor: Asst. Prof. PANYAWAT WANGYAO Co-advisor: Col. Assoc. Prof. Dr. Nuthaporn Nuttayasakul, Dr. Jiaqian Qin

This research work had studied and evaluated how reheat treatment conditions, which consists of solution treatment at temperature of 1175 °C for 4 hours then air cooling down to room temperature and precipitation aging at temperature of 845 °C for 24 hours then air cooling down to room temperature, can influence on microstructural rejuvenation and refurbishment of various casted alloys after different long-term heating conditions. The various alloys are based on cast nickel base superalloy grade GTD-111 modified with various aluminum, nickel or cobalt additions. From all obtained results, it illustrated that reheat treatment conditions as mentioned above are more suitable for the casted samples with long term heating at 900 °C. However, such reheat treatment conditions could not completely refurbish the microstructures back to the original ones, which were received from the previous research work. A temperature level during the solutioning and/or its heating period was not high enough to completely dissolve all existed coarse gamma prime particles from long term heating. Nevertheless, the trends of gamma prime particles size and area fraction of gamma prime particles of the reheat treated samples are similar to the original ones. The obtained measured values by image analysis, especially the size of gamma prime particles, are usually less than the original ones.

Field of Study: Defense Engineering and Technology Student's Signature

Academic Year: 2020 Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จได้ด้วยดีจากความช่วยเหลือของบุคลากรหลายฝ่าย ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ. ดร. ปัญญวัชร วัจยาว ผู้แนะนำและให้โอกาสในการเข้ามาศึกษาปริญญาโทฉบับนี้ และได้เสียสละเวลามาถ่ายทอดความรู้และทุ่มเทในการช่วยเหลือมาโดยตลอด พ.อ. ผศ. ดร. ณัฐพร นุทยะสกุล และ ดร. เจียเขียน ฉิน ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ได้ให้คำแนะนำในเรื่องต่างๆ แก่ข้าพเจ้า รวมถึงการดำเนินงานและการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำวิทยานิพนธ์ จนสมบูรณ์ ขอขอบพระคุณ รศ. ดร. วิจิต ปานสุข ผู้เป็นประธานกรรมการสอบ รศ. ดร. เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย ผู้เป็นกรรมการสอบ และ ผศ. ดร. ธนพร โรจนศิริรัฐสกุล ผู้เป็นกรรมการสอบภายนอก ที่ได้ให้ความร่วมมือในการช่วยปรับแต่งและเติมเต็มวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ขอขอบคุณทางภาควิชาวิศวกรรมโลหการ รวมถึงสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์เรื่องสถานที่และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ขอขอบคุณอาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมโลหการที่คอยสอนและมอบความรู้ต่างๆ ให้ ขอขอบคุณหลักสูตรวิศวกรรมการป้องกันประเทศและเทคโนโลยีสำหรับโอกาสที่ดีที่ให้มาเรียนรู้ข้อมูลในแขนงอื่นที่ไม่เคยพบเห็นมาก่อน ขอขอบคุณ น.ส. นภัส เกียรติวิศาลกิจ นิสิตปริญญาเอก ผู้ที่ได้คอยช่วยอธิบายงานการทดลองและงานวิจัยต่างๆ ให้เข้าใจ รวมถึงช่วยเหลือในด้านการแก้ไขความถูกต้องของงานและแนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ในทุกๆ ขั้นตอน สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณ บิดา มารดา และคนใกล้ตัว ที่คอยให้กำลังใจและสนับสนุนมาโดยตลอด จนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

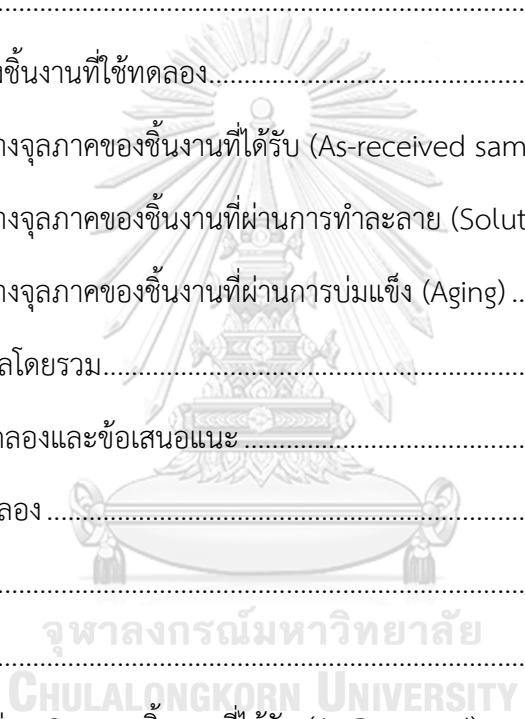
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วรา วัชรถานนท์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ [1].....	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม.....	4
2.1 โลหะผสมพิเศษ [1] [2] [3].....	4
2.2 คุณสมบัติของโลหะผสมพิเศษ [2].....	6
2.2.1 สมบัติทางกล (Mechanical properties).....	6
2.2.2 สมบัติทางกายภาพ (physical properties).....	7
2.2.3 ความเสถียรของพื้นผิว (surface stability).....	8
2.3 โลหะผสมพิเศษเนื้อพ่นนิกเกิล [4].....	8
2.4 เฟสที่พบได้ในโลหะผสมพิเศษเนื้อพ่นนิกเกิล [3] [5].....	11
2.5 โลหะผสมพิเศษ GTD-111 [6] [7].....	12
2.6 ผลของการเติมธาตุผสม [2] [8] [9] [10] [11].....	15
2.7 การทำกรรมวิธีทางความร้อนใน GTD-111 [11].....	16
2.8 การให้กรรมวิธีทางความร้อนอีกครั้งใน GTD-111 [12].....	16

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องอื่น ๆ [13].....	20
บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีทำการทดลอง.....	22
3.1 วัสดุ, อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้.....	22
3.2 ขั้นตอนการทำการวิจัย.....	22
3.3 แผนผังขั้นตอนการทดลอง	23
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล.....	24
4.1 ผลการทดลอง.....	24
4.1.1 ที่มาของชิ้นงานที่ใช้ทดลอง.....	24
4.1.2 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ได้รับ (As-received samples)	25
4.1.3 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการทำละลาย (Solutioning)	39
4.1.4 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็ง (Aging)	51
4.2 การวิเคราะห์ผลโดยรวม.....	58
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	63
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	63
5.2 ข้อเสนอแนะ	63
ภาคผนวก.....	64
ภาคผนวก ก ภาพถ่าย OM ของชิ้นงานที่ได้รับ (As Received).....	64
ก1 ชิ้นงาน A.....	64
ก2 ชิ้นงาน B.....	65
ภาคผนวก ข ภาพถ่าย OM ของชิ้นงานที่ผ่านการทำละลาย (Solutioning).....	66
ข1 ชิ้นงาน A.....	66
ข2 ชิ้นงาน B.....	67
ภาคผนวก ค ภาพถ่าย SEM ของชิ้นงานที่ได้รับ (As Received).....	68
ค1 ชิ้นงาน A.....	68



ค2 ชิ้นงาน B.....	69
ภาคผนวก ง ภาพถ่าย SEM ของชิ้นงานที่ผ่านการทำละลาย (Solutioning).....	70
ง1 ชิ้นงาน A.....	70
ง2 ชิ้นงาน B.....	71
ภาคผนวก จ ภาพถ่าย SEM ของชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็ง (Aging).....	72
จ1 ชิ้นงาน A.....	72
จ2 ชิ้นงาน B.....	73
ภาคผนวก ฉ ชิ้นงานที่ได้รับมา (As Received).....	74
ฉ1 ขนาดอนุภาคแกมมาไพรม์โดยใช้โปรแกรม Image Analysis	74
ฉ2 ค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่โดยใช้โปรแกรม Image Analysis	74
ฉ3 ค่าความกลมโดยใช้โปรแกรม Image Analysis	75
ภาคผนวก ช ชิ้นงานที่ผ่านการทำละลาย (Solutioning).....	76
ช1 ขนาดอนุภาคแกมมาไพรม์โดยใช้โปรแกรม Image Analysis	76
ช2 ค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่โดยใช้โปรแกรม Image Analysis	76
ช3 ค่าความกลมโดยใช้โปรแกรม Image Analysis	77
ภาคผนวก ซ ชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็ง (Aging).....	78
ซ1 ขนาดอนุภาคแกมมาไพรม์โดยใช้โปรแกรม Image Analysis	78
ซ2 ค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่โดยใช้โปรแกรม Image Analysis	78
ซ3 ค่าความกลมโดยใช้โปรแกรม Image Analysis	79
ภาคผนวก ฌ การใช้งานโปรแกรม Image Analysis (ImageJ).....	80
บรรณานุกรม.....	87
ประวัติผู้เขียน.....	89

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ [1]

โลหะผสมพิเศษ (Superalloys) มีคุณสมบัติที่พิเศษกว่าโลหะผสมทั่วไปในหลายๆด้าน โดยการที่สามารถคงคุณสมบัติเหล่านี้ได้ที่ใช้ในงานที่อุณหภูมิสูง ได้แก่ ความแข็งแรง, ความต้านทานการคืบ, ความต้านทานการความล้า และความต้านทานการกัดกร่อน องค์ประกอบหลักของโลหะผสมพิเศษมาจากเนื้อพื้นออสเทนไนต์ (γ) เป็นโครงสร้างแบบ Face Center Cubic (FCC) และเฟสอื่นได้แก่ แกมมาไพร์ม (γ'), แกมมาดับเบิลไพร์ม (γ'') และคาร์ไบด์ (Carbides)

โลหะผสมหรือโลหะผสมพิเศษเป็นวัสดุที่พัฒนามาจากเหล็กกล้าไร้สนิม เพื่อให้สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมได้ ซึ่งโลหะผสมชนิดแรกที่ถูกพัฒนาขึ้นคือ โลหะผสมนิโครม (Nichrome alloys) เกิดขึ้นในปี.ศ.1930 วัสดุชนิดนี้มีส่วนผสมหลักคือนิกเกิล 80% และโครเมียม 20% ต่อมาในปี.ศ. 1960 ทางสหราชอาณาจักร มีการพัฒนาโลหะผสมประเภทนิโมนิก โดยการเติมธาตุผสมที่แตกต่างกันลงในโลหะผสมนิโครม ส่วนทางสหรัฐอเมริกา มีการพัฒนาโลหะผสมประเภทอินโคเนล (Inconel alloys) จากการดัดแปลงส่วนผสมจากโลหะผสมนิโครม เป็นนิกเกิล 78%, โครเมียม 15% และเหล็ก 7%

ประเภทของโลหะผสมพิเศษแบ่งโดยใช้ส่วนผสมหลักคือส่วนผสมของเนื้อพื้นที่มีปริมาณสูงกว่าธาตุอื่นๆเป็นเกณฑ์ ซึ่งสามารถแบ่งตามส่วนผสมออกได้เป็น 3 ประเภท

1. โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล (Ni-base superalloys) มีองค์ประกอบคือนิกเกิล, โครเมียม
2. โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นโคบอลต์ (Co-base superalloys) มีองค์ประกอบคือโคบอลต์, โครเมียม
3. โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นเหล็ก (Fe-base superalloys) มีองค์ประกอบคือเหล็ก

สำหรับโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลนั้นมีความสามารถในการใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ดี ตัวอย่างการใช้งานเช่น ชิ้นส่วนเครื่องบิน, ชิ้นส่วนรถยนต์, เตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์, อุปกรณ์ทางงานปิโตรเลียม และที่นิยมที่สุดคือใช้เป็นชิ้นส่วนในเครื่องยนต์กังหันก๊าซ (Gas turbines) การแบ่งประเภทโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลหลักๆแบ่งได้ด้วยวิธีการขึ้นรูป ได้แก่ ทูบขึ้นรูป (wrought) และหล่อขึ้นรูป (cast) สำหรับงานหล่อขึ้นรูปได้ถูกพัฒนาหลังจากงานทูบขึ้นรูป เพื่อให้สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ดียิ่งขึ้น และสามารถออกแบบรูปร่างได้หลากหลาย เกรนหยาบและทนการคืบมากกว่า

โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลเป็นโลหะผสมพิเศษประเภทหนึ่งที่มีเนื้อพื้่นิกเกิล โดยมีการผสมธาตุอื่น ๆ ลงไปเช่น โครเมียม (Chromium, Cr), อะลูมิเนียม (Aluminium, Al), ไทเทเนียม (Titanium, Ti) เป็นต้น โดยในปัจจุบันมีการใช้งานโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลอยู่หลายเกรด เช่น อินโคเนล 738 (Inconel 738, IN738), จีทีดี 111 (GTD-111) เป็นต้น โดย GTD-111 มีการพัฒนาจากการเติมธาตุผสมลงในอินโคเนล 738 ซึ่งส่งผลให้ความต้านทานการคืบและความแข็งแรงมีค่าสูงกว่า และยังสามารถทนต่อการเกิดออกซิเดชันและการกัดกร่อนแบบร้อนได้ดีเช่นเดิม

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาดังกล่าวถึงผลกระทบของการให้กรรมวิธีทางความร้อน เพื่อคืนสภาพโครงสร้างจุลภาคภายหลังจากการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิสูงต่อชิ้นงาน ที่ได้จากชิ้นงานตั้งต้นซึ่งได้แก่ GTD-111 เทียบกับชิ้นงานอีก 5 ส่วนผสมที่มีการเติมอะลูมิเนียมลงไปปริมาณคงที่คือ 1% โดยน้ำหนัก ลงไปในส่วนผสมหลักซึ่งก็คือ GTD-111 และมีการเติมโคบอลต์กับนิกเกิลเข้าไปในปริมาณที่แตกต่างกัน 5 เงื่อนไข โดยชิ้นงานตั้งต้นนี้ ผ่านการหลอมแบบอาร์คในสุญญากาศ (vacuum arc melting), ให้กรรมวิธีทางความร้อนแบบมาตรฐาน (heat treatment) ซึ่งประกอบด้วยการทำละลายและการบ่มแข็ง, และผ่านการทดสอบการเผาชิ้นงานเป็นเวลานาน 400 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส รวมเป็น 12 สภาวะมาก่อนหน้านี้ เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ถึงผลกระทบของการให้กรรมวิธีทางความร้อนที่ประกอบไปด้วยการทำละลายและการบ่มแข็ง รวมถึงผลของการเติมธาตุผสมดังกล่าว ต่อการฟื้นคืนสภาพโครงสร้างจุลภาคที่ผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิสูงมาก่อนหน้านี้

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาถึงผลของการให้กรรมวิธีทางความร้อน เพื่อฟื้นฟูสภาพโครงสร้างจุลภาคที่ผ่านการจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิสูงมาก โดยประกอบไปด้วยการทำละลายและการบ่มแข็ง และ ผลของการเติมธาตุผสมในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล GTD-111 ที่มีการเติมอะลูมิเนียมเพิ่ม 1% โดยน้ำหนักของนิกเกิลและโคบอลต์ในอัตราส่วนที่กำหนดไว้ต่าง ๆ กัน ต่อการฟื้นฟูโครงสร้างจุลภาค เพื่อวิเคราะห์ว่าธาตุต่างๆ ที่เติมลงไปมีผลอย่างไรบ้างในกรรมวิธีทางความร้อนต่อการทำให้โครงสร้างจุลภาคกลับมาใกล้เคียงของใหม่อีกครั้งหนึ่ง

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 ศึกษาถึงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานโลหะผสมพิเศษ GTD-111 ที่มีการเติมธาตุผสมลงไปคือ อะลูมิเนียม 1% โดยน้ำหนัก และการผสมธาตุนิกเกิลและโคบอลต์ลงไปรวม 6 สภาวะ ดังนี้

1. GTD-111
2. 93%GTD-111 + 1%Al, 6%Ni

3. 93%GTD-111 + 1%Al, 4.5%Ni, 1.5%Co
4. 93%GTD-111 + 1%Al, 3%Ni, 3%Co
5. 93%GTD-111 + 1%Al, 1.5%Ni, 4.5%Co และ
6. 93%GTD-111 + 1%Al, 6%Co

ที่ผ่านการหลอมด้วยวิธี vacuum arc melting และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่ประกอบไปด้วย การทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และผ่านการจำลองการใช้งานเป็นระยะเวลา 400 ชั่วโมง ที่ อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อ ศึกษาถึงขนาดและปริมาณของเฟสแกมมาไพรม์

1.3.2 ทำการละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมงต่อชิ้นงานต่างๆจากข้อที่ 1 และทำการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อ ศึกษาถึงขนาดและปริมาณเฟสแกมมาไพรม์ที่ถูกละลายของชิ้นงานรวม 12 สภาวะ

1.3.3 ทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ต่อชิ้นงานรวม 12 สภาวะ ภายหลังจากการทำให้ละลายจากข้อที่ 2 และศึกษาวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อศึกษาถึงขนาดและปริมาณของเฟสแกมมาไพรม์ที่ตกตะกอนออกมาอีกครั้ง

1.3.4 วิเคราะห์ถึงผลของธาตุต่าง ๆ คือ อะลูมิเนียม นิกเกิล และโคบอลต์ต่อผลของการทำให้ละลาย และการบ่มแข็ง ต่อการฟื้นฟูโครงสร้างจุลภาคให้เหมือนใหม่อีกครั้ง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ทราบถึงผลกระทบของการเติมธาตุผสมอะลูมิเนียม นิกเกิลและโคบอลต์ลงไปโลหะผสมพิเศษ นิกเกิลในส่วนผสมต่างๆ ต่อการถูกฟื้นฟูโครงสร้างจุลภาคให้กลับมาเหมือนใหม่อีกครั้งในขั้นตอนของ การทำให้ละลายและการบ่มแข็งในกรรมวิธีทางความร้อนแบบมาตรฐาน

บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม

2.1 โลหะผสมพิเศษ [1] [2] [3]

โลหะผสมพิเศษ (superalloys) ได้ถูกออกแบบให้มีความแข็งแรงและความทนต่อการกัดกร่อนที่มากขึ้นที่การใช้งานที่อุณหภูมิสูง ในปีค.ศ. 1930 โลหะผสมนิโครม (Nichrome alloys) ถูกพัฒนาขึ้นจากเหล็กกล้าไร้สนิมซึ่งมีส่วนผสมเป็นนิกเกิล 80% และโครเมียม 20% จากนั้นในปีค.ศ. 1940 มีการผลิตโลหะผสมนิโมนิก (Nimonic alloys) เริ่มมีการเติมไทเทเนียมเข้าไปปริมาณเล็กน้อยในโลหะผสมนิโครมเพื่อให้จับตัวเป็นไทเทเนียมคาร์ไบด์ แต่ถ้าใส่ไทเทเนียมในปริมาณมากเกินไปจะทำให้ไทเทเนียมคาร์ไบด์สลายตัว เกิดเป็นโลหะผสมนิโมนิก 75 ซึ่งเกิดจากโลหะผสมนิโครมที่เติมไทเทเนียม 0.3% และคาร์ไบด์ 0.1% ผลที่ได้พบว่ามีความทนทานที่อุณหภูมิสูงเพิ่มขึ้น และในปีค.ศ. 1980 มีการพัฒนาในหลากหลายประเทศ เช่น สหราชอาณาจักรได้พัฒนากลุ่มโลหะผสมนิโมนิกอย่างหลากหลายประเภท ด้วยการเติมธาตุผสมต่าง ๆ กันไป เช่น ไทเทเนียม, อะลูมิเนียม, โคบอลต์ และโมลิบดีนัม ในขณะที่ทางสหรัฐอเมริกาได้พัฒนาโลหะผสมอินโคเนล (Inconel alloys) ขึ้นโดยมีส่วนผสมคือ นิกเกิล 78%, โครเมียม 15% และเหล็ก 7% อีกทั้งยังมีการเติมธาตุผสมต่างๆ เช่น อะลูมิเนียม, ไทเทเนียม, ไนโอเบียม และคาร์บอนเพื่อให้พัฒนาคุณสมบัติของโลหะผสมอินโคเนลในด้านต่างๆกัน

ทั้งนี้ จะสามารถแบ่งโลหะผสมพิเศษได้ตามวิธีการขึ้นรูปจะได้เป็น 2 แบบคือ

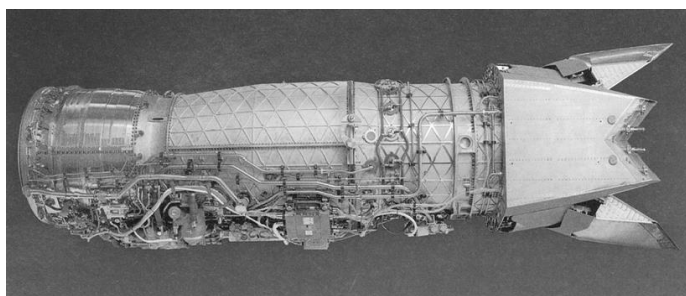
ทุบขึ้นรูป (wrought)

หล่อขึ้นรูป (cast)

สำหรับโลหะผสมพิเศษแบบทุบขึ้นรูปนั้นเกิดขึ้นก่อนโลหะผสมพิเศษแบบหล่อขึ้นรูป งานทุบขึ้นรูปจะต้องใช้แรงในการขึ้นรูป เหมาะกับงานที่รูปร่างไม่ซับซ้อนและมีข้อจำกัดทางการออกแบบรูปร่างชิ้นงาน ใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำปานกลาง ในขณะที่โลหะผสมพิเศษแบบหล่อขึ้นรูปจะสามารถขึ้นรูปร่างได้อิสระกว่ามาก ใช้งานได้กับงานที่ต้องการความทนทานที่อุณหภูมิสูงหรืองานโครงสร้าง เช่น ชิ้นส่วนเครื่องบิน, ชิ้นส่วนรถยนต์, เตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์, อุปกรณ์ทางงานปิโตรเลียม และเครื่องยนต์กังหันก๊าซ (gas turbines) ดังรูปที่ 2.1

เครื่องยนต์กังหันก๊าซต้องการวัสดุที่มีคุณสมบัติดังต่อไปนี้ มีความทนความเค้นสูง, มีความทนความล้าสูง, ใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ดีโดยยังมีความแข็งแรง ความเหนียว สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความ

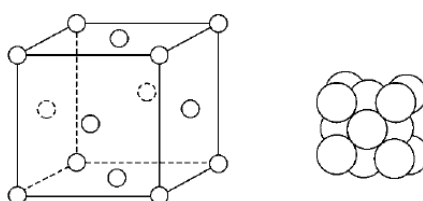
ร้อนต่ำ, มีความเสถียรทางโครงสร้าง, มีความทนการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูง และยังสามารถเชื่อมหรือขึ้นรูปได้ดีสำหรับแบบทุบขึ้นรูป



รูปที่ 0.1 เครื่องยนต์กังหันก๊าซ (gas turbine) [2]

สำหรับเครื่องยนต์กังหันก๊าซนั้นชิ้นส่วนเครื่องยนต์จะถูกใช้งานที่อุณหภูมิที่สูงกว่า 540 องศาเซลเซียส โดยมี 4 องค์ประกอบหลัก ได้แก่ ใบพัดเครื่องยนต์ (turbine blades) ใช้ในช่วงอุณหภูมิ 650-980 องศาเซลเซียสใช้วัสดุเป็นโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเพื่อความทนในด้านการเสื่อมสภาพทางผิวที่ถูกกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูง, มีความเหนียวมากพอที่จะทนต่อความคืบ, การทนกระแทก และมีโครงสร้างจุลภาคที่เสถียร ในส่วนของหัวฉีดใบพัด (turbine nozzle) และแผ่นใบพัดกังหัน (turbine disk) สามารถใช้โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลหรือนิกเกิลผสมเหล็กก็ได้เนื่องจากไม่ได้ใช้ที่อุณหภูมิสูงมาก และส่วนสุดท้ายห้องเผาไหม้ (combustion can) นั้นไม่ได้รองรับแรงมากแต่ใช้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1100 องศาเซลเซียส ปัจจัยที่สำคัญที่สุดจึงเป็นการทนการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูง สามารถใช้วัสดุเป็นโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลหรือโคบอลต์

โครงสร้างหลักในเนื้อโลหะผสมพิเศษนั้นมี 3 ส่วน ได้แก่เนื้อพื้นที่เป็นออสเทนไนต์ (γ) เป็นโครงสร้างแบบ Face Center Cubic (FCC) ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งมีความทนการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูงและยังสามารถเติมธาตุผสมได้มาก รวมถึงสามารถควบคุมการตกตะกอน (Precipitation) ของเฟสอื่นได้แก่ แกมมาไพร์ม (γ'), แกมมาดับเบิลไพร์ม (γ'') ที่อาจมีในเนื้อโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล และคาร์ไบด์ที่กระจายในเนื้อพื้นเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของเนื้อพื้นออสเทนไนต์

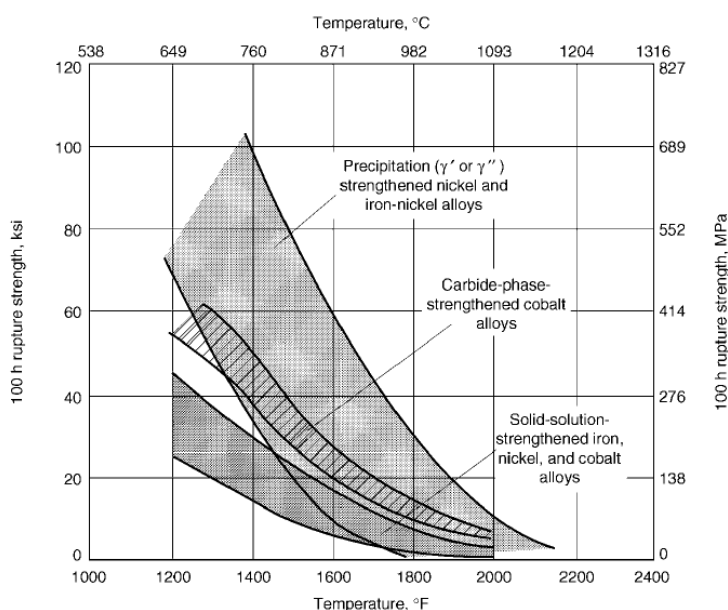


(a) Face-centered cubic

รูปที่ 0.2 โครงสร้างแบบ FCC, BCC และ HCP [2]

ทั้งนี้ กลไกการเพิ่มความแข็งแรงของโลหะผสมพิเศษมี 3 วิธี ได้แก่

1. กลไกการเพิ่มความแข็งแรงโดยการเกิดสารละลายของแข็ง (Solid solution strengthening) เป็นการทำให้เกิดสารละลายของแข็งระหว่างธาตุที่เป็นเนื้อพื้นและธาตุผสมต่าง ๆ
 2. กลไกการเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอน (Precipitation strengthening) การตกตะกอนเฟสอินเทอร์เมทัลลิก (intermetallic phase) ที่ทำให้การเคลื่อนของดิสโลเคชัน (Dislocation) เกิดยากขึ้น
 3. กลไกการเพิ่มความแข็งแรงโดยการตกตะกอนของเฟสคาร์ไบด์ (Carbide strengthening) การเกิดคาร์ไบด์เกิดได้ทั้งที่ขอบเกรนและภายในเกรน ซึ่งหากเกิดภายในเกรนจะช่วยขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน และถ้าเกิดที่ขอบเกรนจะช่วยขัดขวางการเคลื่อนที่ของขอบเกรน (Grain boundary sliding) เนื่องจากคาร์ไบด์ไปตกตะกอนที่ขอบเกรนทำให้ขอบเกรนเคลื่อนไถลได้ยากขึ้น
- จากรูปที่ 2.3 จะเห็นว่าโลหะผสมพิเศษมีการแบ่งประเภทตามกลไกความแข็งแรงที่ต่างกัน



รูปที่ 0.3 เปรียบเทียบความสามารถในการเพิ่มความแข็งแรงของโลหะผสมพิเศษ [2]

2.2 คุณสมบัติของโลหะผสมพิเศษ [2]

2.2.1 สมบัติทางกล (Mechanical properties)

โลหะผสมพิเศษมีความแข็งแรงสูงมากที่อุณหภูมิสูง ด้วยการที่มีเนื้อพื้นเป็นออสเทนไนต์ (γ) ซึ่งมีโครงสร้าง FCC ส่งผลให้มีค่าแรงดึงสูง, ความทนความเค้นสูง, ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิสูง และ

ความสามารถในการละลายของธาตุผสมลงไปเนื้อที่ที่อุณหภูมิสูง อีกทั้งยังมีการควบคุมการตกตะกอนของแกมมาไพรม์ (γ') ที่ดี

2.2.2 สมบัติทางกายภาพ (physical properties)

2.2.2.1. ความหนาแน่น (density)

โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นเหล็กจะมีค่าความหนาแน่นต่ำสุด เพราะความหนาแน่นของโมเลกุลเหล็ก (Fe) น้อยกว่านิกเกิล (Ni) และโคบอลต์ (Co) โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลมีค่าความหนาแน่นเป็นช่วงกว้างขึ้นกับการเติมธาตุผสมต่างชนิดเข้าไป โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นโคบอลต์มีค่าความหนาแน่นสูงสุด โดยขึ้นกับปริมาณในการเติมทังสเตน (W) และแทนทาลัม (Ta) โดยความหนาแน่นนั้นมีความสำคัญในการพิจารณาการใช้งานวัสดุที่มีรอบหมุน (cycle) สูง เพื่อลดความเครียดจากการหมุนเหวี่ยง (centrifugal stress)

2.2.2.2 สัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (thermal expansion)

เป็นค่าที่บอกว่าเมื่อความร้อนเพิ่มขึ้น วัสดุมีการขยายตัวมากขึ้นเท่าไร โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นโคบอลต์และโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลนั้นมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนเท่ากัน ซึ่งน้อยกว่าโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นเหล็ก การลดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนทำได้โดยการลดความเครียดที่อุณหภูมิสูงที่อาจทำให้เกิดความล้าจนวัสดุแตกหักได้

2.2.2.3 ค่าการนำความร้อน (thermal conductivity)

ต้องการให้ค่าการนำความร้อนสูงในโลหะผสมพิเศษ ต้องทำให้วัสดุมีการถ่ายเทความร้อนได้ดีที่สุด ซึ่งจะส่งผลลดความเครียดและความล้าที่อาจทำให้ไปถึงจุดแตกหักของวัสดุได้

2.2.2.4 ความไม่เสถียรของเฟส (phase instability)

ในแต่ละเฟสในโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมพิเศษช่วงแรกจะไม่ค่อยมีความสมดุล (equilibrium) แต่จะมีแนวโน้มเปลี่ยนไปในแนวทางสมดุลเมื่อมีอุณหภูมิสูงและเวลาเพียงพอ มีการทดสอบเพื่อจำแนกสมบัติของโลหะผสมพิเศษโดยใช้การปรับปรุงทางความร้อน (heat treatment) ซึ่งจำแนกโดยองค์ประกอบของวัสดุ, ขนาด, รูปร่าง, ลักษณะโครงสร้างของคาร์ไบด์ และเฟสอินเตอร์เมทัลลิก กล่าวคือการปรับปรุงทางความร้อนจะทำให้โครงสร้างจุลภาคเปลี่ยนตามที่ต้องการและส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกลด้วย ทั้งนี้ เฟสที่ไม่เสถียรจะทำให้เกิดการสร้างตัวของเฟสที่ไม่ต้องการ ที่มีความเปราะและอ่อนแอได้ในโครงสร้างจุลภาค เช่น ซิกมา (σ) และเดลต้า (δ) ซึ่งเป็นโครงสร้าง BCC (body centered cubic) หรือ เลฟ (lave) ซึ่งเป็นโครงสร้าง FCC (face center cubic) โดยรวมแล้วโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลจะดีกว่าเนื้อพื้นอื่นๆเนื่องจากมีความทนต่อการเติมธาตุผสมโดยไม่เกิดโครงสร้างของเฟสที่ไม่ต้องการขึ้นมา

2.2.3 ความเสถียรของพื้นผิว (surface stability)

โดยปกติการพ่นไอก๊าซร้อนด้วยความไวสูงจะทำให้เกิดทั้งการเผาไหม้และแรงกดดันทำให้มีโอกาสที่จะลดคุณภาพวัสดุได้ด้วย

2.2.3.1 ออกซิเดชัน (oxidation)

เป็นปฏิกิริยาที่ธาตุผสมจับตัวกับออกซิเจนในอากาศระหว่างการเผาไหม้ โดยกำหนดให้เป็นเชื้อเพลิงสะอาด จึงไม่เกิดสารปนเปื้อนขึ้น เช่น โซเดียม (Na), ซัลเฟอร์ (S) หรือวาเนเดียม (V) การทนออกซิเดชันที่ดีจะเกิดเมื่อมีการสร้างชั้นผิวที่ครอบคลุมต่อเนื่องอย่างแน่นและดี อาจแสดงให้เห็นได้โดยเกิดการป้องกันการแพร่ (diffusion barrier) และไม่พึ่งพียงใช้ที่รอบหมุนสูงที่อุณหภูมิสูง

โดยปกติสำหรับโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิลที่มีโครเมียมและอะลูมิเนียมเป็นส่วนประกอบ จะเกิดชั้นฟิล์มโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) สำหรับใช้งานที่อุณหภูมิไม่สูงมาก และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) สำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูงเกิน 1000 องศาเซลเซียส ทำให้โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิลมีการป้องกันการเกิดออกซิเดชันดีมาก โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นโคบอลต์ก็มีความทนต่อการเกิดออกซิเดชันที่ดีแต่รองลงมาจากโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิล โดยคุณสมบัติที่ดีมาจากการที่มีโครเมียมมาก ส่วนโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นเหล็กจะมีคุณสมบัติที่ด้อยกว่าทั้งโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นโคบอลต์และโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิล

2.2.3.2 การกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูง (hot corrosion)

ความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนขึ้นกับปริมาณโครเมียมเป็นหลัก โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นโคบอลต์จึงจะดีกว่าโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิลเนื่องจากมีปริมาณโครเมียมมากกว่า การเกิดการกัดกร่อนอย่างรุนแรงที่อุณหภูมิสูงถึง 980 องศาเซลเซียส ถ้าอุณหภูมิมากกว่านี้ การเกิดการกัดกร่อนแบบออกซิเดชันจะเริ่มมีความเด่นชัดและรุนแรงขึ้น

2.3 โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิล [4]

การแบ่งประเภทโลหะผสมพิเศษโดยใช้ส่วนผสมหลักเป็นเกณฑ์ หลักๆจะแบ่งได้ 3 แบบ ได้แก่

1. โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิล (Ni base superalloys) มีองค์ประกอบหลักคือนิเกิล และโครเมียม
2. โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นโคบอลต์ (Co base superalloys) มีองค์ประกอบหลักคือโคบอลต์ และโครเมียม
3. โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นเหล็ก (Fe base superalloys) มีองค์ประกอบหลักคือเหล็ก

สำหรับโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้เหล็กจะต้องมีพื้เหล็กเป็นส่วนผสมอย่างน้อย 40% ขึ้นไป ซึ่งโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้เหล็กโดยรวมมีคุณสมบัติที่ดีกว่าโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้เหล็กแต่ราคาสูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้โคบอลต์พบว่ามีการทนการกัดกร่อนที่อุณหภูมิปกติดีกว่า แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น การทนการกัดกร่อนของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้โคบอลต์จะดีกว่ามาก เนื่องจากมีปริมาณโครเมียมมากกว่า อีกทั้งยังมีการทนความล้าที่อุณหภูมิสูงดีกว่าโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้เหล็กอีกด้วย โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้เหล็ก โคบอลต์ และเหล็ก สามารถดูส่วนผสมได้จากตารางที่ 2.1[4]

ตารางที่ 0.1 การเปรียบเทียบส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมพิเศษแต่ละชนิด [4]

Fe-Ni-based										
Element	Ni	Fe	Cr	Ti	Al	Mo	Nb	Co	W	C
Weight %	9-44	29-67	0-25	0-3	0.3-1	0-3	0-5	0-20	0-2.5	<0.35
Co-based										
Element	Co	Ni	Cr	Ti	Al	Mo	Nb	Co	W	C
Weight %	40-62	0-35	19-30	0-3	0-0.2	0-10	0-4	0-21	0-15	0-1
Ni-based										
Element	Ni	Ti	Cr	Co	Al	Mo	Nb	W	C	
Weight%	37-79.5	0-5	5-22	0-20	0-6	0-28	0-5.1	0-15	<0.30	

Also, minor proportions of Zr, Mn, La, Cu, Si, Mg, B, Ce, Hf, V and Ta can be included.

สมบัติทางกายภาพของโลหะพื้เหล็ก และโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้เหล็ก แสดงในตารางที่ 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ ผลของการเติมธาตุผสมต่างชนิดกันจะส่งผลให้สมบัติในแต่ละด้านของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้เหล็กต่างกันออกไป ผลของการเติมธาตุต่างๆผสมสามารถดูได้ในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 0.2 สมบัติทางกายภาพของโลหะพื้เหล็ก [4]

Property	Value
Atomic Weight	58.71

Crystal structure	FCC
Lattice constant at 25 °C (nm)	0.35238
Density at 20 °C (g cm ⁻³)	8.908
Melting Temperature (°C)	1453
Specific heat at 20 °C (kJ kg ⁻¹ K ⁻¹)	0.44
Thermal conductivity (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	
at 100 °C	82.8
at 300 °C	63.6
at 500 °C	61.9
Electrical Resistivity at 20 °C ($\mu \Omega$ cm)	6.97
Coercive force (Am ⁻¹)	239
Saturation magnetization (T)	0.617
Curie temperature (°C)	353
Residual magnetization (T)	0.300
Modulus of elasticity (GPa) in tension	206.0
Shear modulus (GPa)	73.6
Poisson's ratio	0.30

ตารางที่ 0.3 สมบัติทางกายภาพของโลหะผสมพิเศษเนื้อฟ้านิกเกิล [4]

Properties	Typical ranges and values
Density	7.7-9.1 g/cm ³
Melting point	1320-1450 °C
Elastic modulus	Room temp.: 210 MPa 800 °C: 160 MPa
Thermal expansion coefficient	8-18 × 10 ⁻⁶ /°C
Thermal conductivity	Room temp.: 11 W/mK 800 °C: 22 W/mK

ตารางที่ 0.4 ผลของธาตุผสมต่อโลหะผสมพิเศษเนื้อฟ้านิกเกิล [4]

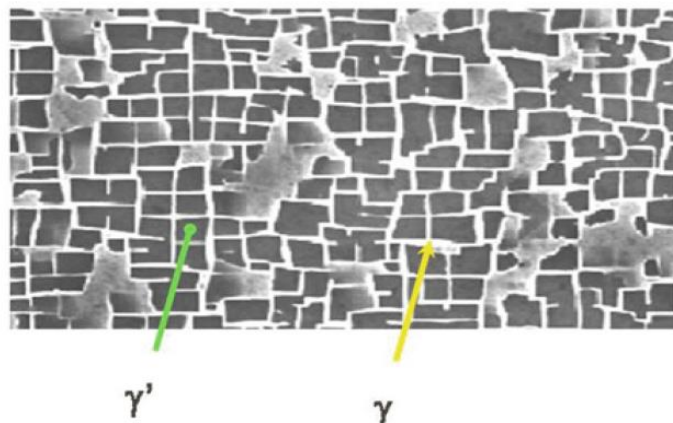
Nickel when alloyed with	Provides
--------------------------	----------

Chromium, Molybdenum, Iron, Tantalum, Tungsten	Higher Strength
Boron, Zirconium, Carbon	Creep resistance
Chromium, Aluminium, Tantalum	Oxidation resistance
Aluminium, Titanium	High temperature strength
Hafnium	Ductile at intermediate temperatures, Prevents oxides flaking

2.4 เฟสที่พบได้ในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล [3] [5]

สำหรับโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล มีองค์ประกอบที่หลากหลายดังนี้

- แกมมา (γ) หรือออสเทนไนต์ โครงสร้างอะตอมเป็น Face Cubic Center (FCC) สามารถเติมธาตุต่างๆลงไปได้มาก เช่น โคบอลต์, เหล็ก และอื่นๆ
- แกมมาไพรม์ (γ') เกิดจากการจับตัวกันของอะลูมิเนียมและไทเทเนียมทำให้เกิดเป็นเฟสของ Ni-precipitate มีการยึดเหนี่ยวระหว่างกันด้วยเนื้อพื้นแกมมา
- ฟิล์มแกมมาไพรม์ เกิดได้ที่ขอบเกรนทั้งแบบทุบขึ้นรูปหรือหล่อขึ้นรูป สามารถช่วยในเรื่องการทนความเค้นได้ดี
- แกมมาไพรม์ในเกรน อาจเกิดจากการทำ initial heat treatment หรือการใช้งานเป็นเวลานาน ช่วยในเรื่องการทนความเค้นได้ดี
- แกมมาดับเบิลไพรม์ (γ'') เกิดจากการรวมตัวของนิกเกิลและไนโอเบียมเป็น Ni_3Nb ยึดเหนี่ยวกันด้วยเนื้อพื้นแกมมา เฟสนี้จะช่วยให้เกิดความแข็งแรงสูงมากที่ช่วงอุณหภูมิต่ำถึงปานกลาง แต่ไม่เสถียรถ้าใช้ที่อุณหภูมิสูงถึง 649 องศาเซลเซียสขึ้นไป เฟสแบบนี้จะพบเฉพาะในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลหรือโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นเหล็กนิกเกิล
- คาร์ไบด์ (carbides) เกิดเมื่อมีคาร์บอน 0.02-0.2 %wt. ไปจับตัวกับไทเทเนียม (Ti), แทนทาลัม (Ta), ฮาฟเนียม (Hf) และไนโอเบียม (Nb) เป็น MC คาร์ไบด์ ระหว่างการให้กรรมวิธีทางความร้อน นั้น MC คาร์ไบด์มีแนวโน้มที่จะสลายตัวและทำให้เกิดคาร์ไบด์ชนิดอื่น เช่น $M_{23}C_6$ หรือ M_6C เกาะอยู่ที่ตามขอบเกรน และนอกจากนี้คาร์ไบด์อาจเกิดได้จากการใช้งานขึ้นงานเป็นเวลานานอีกด้วย
- โบไรด์ (boride) เกิดจากการที่โบรอนไปทำให้เกิดการแตกตัวที่ขอบเกรน
- เฟส TCP (Topologically Closed Pack phases) เช่น ซิกมา (σ) หรือ Laves จะทำให้ค่า rupture stress ลดลง ค่าความเหนียวลดลง และเกิดการแตกที่ขอบเกรนมากขึ้น (segregation)



รูปที่ 0.4 รูปโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิล [3]

2.5 โลหะผสมพิเศษ GTD-111 [6] [7]

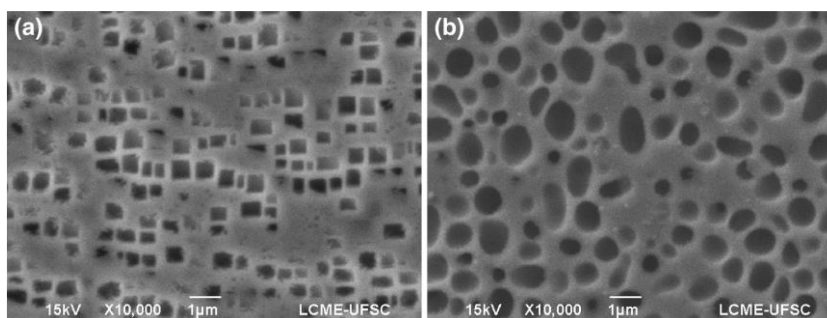
โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิลสามารถผลิตออกมาเป็นโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิลเกรดอื่นๆได้มากมายด้วยการเปลี่ยนกรรมวิธีการผลิตหรือเปลี่ยนธาตุผสมที่เติมลงไป เช่น GTD-111 ซึ่งได้พัฒนาขึ้นจนเป็นอันดับ 1 ในการใช้งานส่วนของอุตสาหกรรมใบพัดกังหันก๊าซ ในการใช้งานที่อุณหภูมิสูงจะนิยมการเคลือบผิว (Thermal barrier coating (TBC)) และยังช่วยให้ค่าความล้าของวัสดุ น้อยลงจากการตรวจสอบด้วยเครื่องทดสอบความล้า (thermo-mechanical fatigue (TMF))

องค์ประกอบของ GTD-111 มีองค์ประกอบหลักเป็นนิเกิล, โครเมียมและธาตุผสมอื่นๆตามตารางที่ 2.5

ตารางที่ 0.5 ส่วนผสมทางเคมีของ GTD-111 [6]

Component	Ni	Co	Cr	W	Mo	Ti	Al	C	B	Ta
wt(%)	Bal.	9.5	14	3.8	4.5	4.9	3	0.1	0.01	2.8

โครงสร้างของ GTD-111 เมื่อผ่านการใช้งานเป็นเวลานานจะมีการเปลี่ยนแปลงดังตัวอย่างในรูปที่ 2.5 จะเห็นการเปลี่ยนโครงสร้างจุลภาคจากการใช้งาน สำหรับรูป (a) เป็นสภาวะตั้งต้น อนุภาคแกมมาไพรม์มีลักษณะทรงเหลี่ยมซึ่งเป็นโครงสร้างของแกมมาไพรม์ที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงในเนื้อพื้น ส่วนในรูป (b) หลังผ่านการใช้งานมา 38,000 ชั่วโมงนั้นจะเห็นได้ว่าโครงสร้างแกมมาไพรม์เกิดการเสื่อมสภาพมีขนาดใหญ่อขึ้นทำให้เสียแรงยึดเหนี่ยวกับเนื้อพื้นไป การเสียแรงยึดของแกมมาไพรม์ทำให้ขนาดใหญ่อขึ้นอย่างเห็นได้ชัดถึง 60%



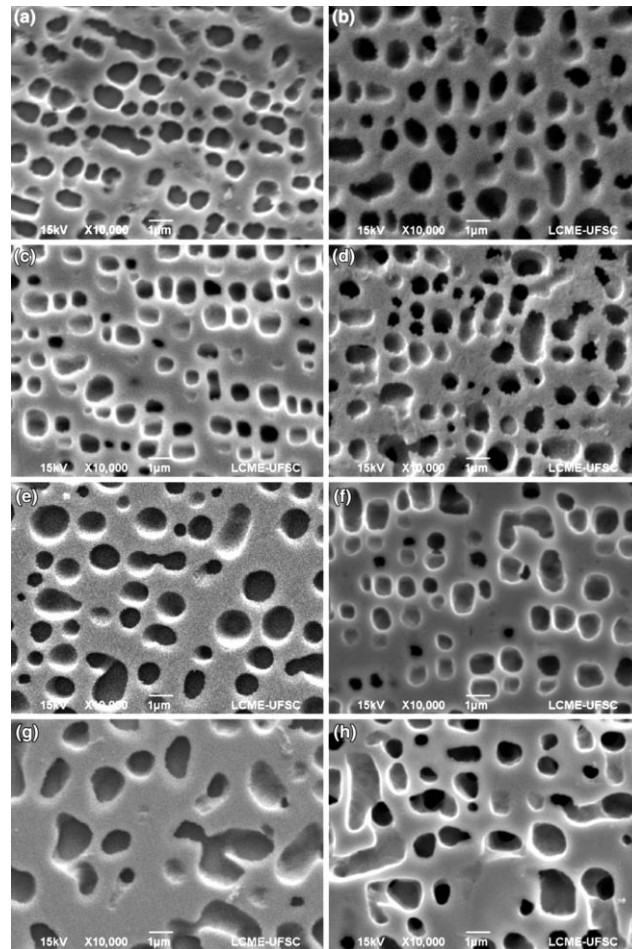
รูปที่ 0.5 รูปโครงสร้างจุลภาคของ GTD-111 ที่ใช้ในเครื่องยนต์ใบพัดกังหันก๊าซ (a) สภาวะตั้งต้นก่อนใช้งาน (b) ผ่านการใช้งานไป 38,000 ชั่วโมง [7]

จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ [7] พบว่าโครงสร้างจุลภาคของ GTD-111 ที่มีการเปลี่ยนไปของอนุภาคเฟสแกมมาไพรม์ที่ใช้เป็นเวลานานแล้ว ยังมีผลต่อสมบัติทางกลด้วยเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูงด้วย รูปที่ 2.5 เป็นการเปรียบเทียบการใช้งานที่อุณหภูมิสูงคงที่ที่ 1000 องศาเซลเซียส ที่เวลาการใช้งานต่างๆกันไป จะเห็นว่าปริมาณของเฟสแกมมาไพรม์ลดลง และมีขนาดของอนุภาคแกมมาไพรม์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ดังตารางที่ 2.6 และรูปที่ 2.6 ขนาดของอนุภาคแกมมาไพรม์จะมีค่าสูงขึ้น เมื่อทำการเผาเป็นเวลานานขึ้นที่อุณหภูมิสูงคงที่ ดังรูปที่ 2.7

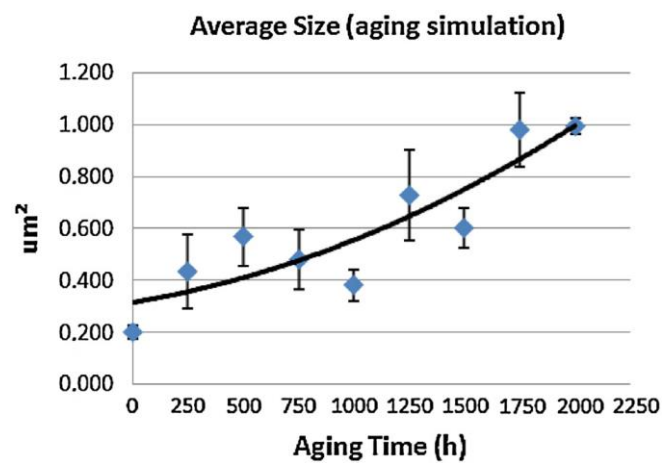
ตารางที่ 0.6 สมบัติที่เปลี่ยนไปเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น [7]

Condition	Size (μm^2)		Fraction per area (%)		Vickers hardness (HV-2)	
	Average	CI ^a	Average	CI ^a	Average	CI ^a
Virgin	0.202	±0.024	26.4	±1.2	417	±5
250 h	0.437	±0.142	34.1	±4.6	341	±7
500 h	0.643	±0.173	34.5	±2.9	360	±4
750 h	0.480	±0.114	32.3	±2.9	346	±12
1000 h	0.361	±0.095	33.4	±3.5	339	±3
1250 h	0.800	±0.194	32.6	±5.2	332	±6
1500 h	0.604	±0.076	33.4	±2.9	328	±10
1750 h	0.979	±0.143	28.6	±3.1	310	±3
2000 h	0.995	±0.029	35.2	±3.1	320	±5

^a 95% confidence interval



รูปที่ 0.6 โครงสร้างจุลภาคหลังผ่านการอบที่ 1000 องศาเซลเซียส ที่เวลา (a) 250 ชั่วโมง, (b) 500 ชั่วโมง, (c) 750 ชั่วโมง, (d) 1,000 ชั่วโมง, (e) 1,250 ชั่วโมง, (f) 1,500 ชั่วโมง (g) 1,750 ชั่วโมง และ (h) 2,000 ชั่วโมง [7]



รูปที่ 0.7 ขนาดของแกมมาไพร์มเมื่อทำการอบที่อุณหภูมิคงที่แต่เวลาต่างกัน [7]

2.6 ผลของการเติมธาตุผสม [2] [8] [9] [10] [11]

การเติมธาตุผสมแต่ละชนิดลงในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิลมีผลดังนี้

นิเกิล ทำให้เนื้อพื้นมีสภาพเป็น FCC ซึ่งเป็นเนื้อพื้นที่ดี สามารถทนความร้อนที่อุณหภูมิสูงได้และเติมธาตุผสมเพิ่มได้ดี เกิดความเสถียรในเฟส ต่างไปจากเนื้อพื้นที่จะเปราะและอ่อนแอกว่า

อะลูมิเนียม เปลี่ยนสภาพเป็นฟิล์ม Al_2O_3 ป้องกันการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูง ช่วยส่งเสริมการเพิ่มความแข็งแรงในการอบแข็ง (age hardening) ด้วยตะกอนของแกมมาไพรม์ เนื้อพื้น FCC ส่งเสริมความเหนียวของเฟสอินเตอเมทัลลิกด้วย Ni_3Al ทำให้ค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นแต่หากเติมอะลูมิเนียมมากเกินไปอาจเกิดการผลิตฟิล์มออกไซด์ เกิดการแยกตัวตามขอบเกรนหรือในเนื้อพื้น และทำให้กระบวนการทางความร้อนทำได้ยากขึ้น

โคบอลต์ ช่วยเพิ่มอุณหภูมิโซลวัส (solvus temperature) ของแกมมาไพรม์ ซึ่งจะส่งผลให้เพิ่มคุณสมบัติทางความร้อนของเนื้อโลหะ ลดอัตราการโตของอนุภาคแกมมาไพรม์และทำให้เฟสแกมมาไพรม์เสถียรขึ้น

มีงานวิจัยอื่นเพิ่มเติม [5] [12] เกี่ยวกับการเติมนิเกิลลงใน GTD-111 พบว่าผลออกมาเหมือนที่กล่าวไว้ข้างต้น นิเกิลจะเป็นการเพิ่มความเสถียรให้กับเนื้อพื้น และลดการเกิดเฟส TCP สำหรับการเพิ่มอะลูมิเนียมใน GTD-111 จากงานวิจัย [8] [9] [10] กล่าวไว้ว่า เมื่อเติมอะลูมิเนียมลงไป GTD-111 ที่ผ่านการใช้งานเวลานานที่ 900 และ 1000 องศาเซลเซียสนั้น อะลูมิเนียมได้ทำหน้าที่เหมือนในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิลอื่น นั่นคือ จับกับนิเกิลเป็นแกมมาไพรม์ (Ni_3Al) แบบ intermetallic phase เพิ่มคุณสมบัติทางกลให้กับชิ้นงานที่อุณหภูมิสูง อีกทั้งยังจับกับออกซิเจนกลายเป็นฟิล์มออกไซด์ Al_2O_3 เพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูง ประโยชน์ของอะลูมิเนียมจะเห็นชัดหลังทำ standard reheat treatment มีการทดลองเติมอะลูมิเนียมลงไป 1, 2, 3 % โดยน้ำหนัก ปริมาณที่พอเหมาะในการเติมคือ 1 %Al หรือไม่เกิน 2 %Al ในชิ้นงาน การเติมเพียง 1 %Al จะทำให้ได้แกมมาไพรม์ที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ มีลักษณะคิวกิก จากการทดลอง หากเติมถึง 3 %Al จะทำให้เกิดโครงสร้างจุลภาคอื่นที่ไม่ต้องการ เช่น เฟส TCP และเป็นปริมาณที่มากเกินไป ส่วนช่วงอุณหภูมิในการทำ solution treatment ในชิ้นงาน GTD-111 ที่เติมอะลูมิเนียมไป 1% จากการทดลองก่อนหน้านี้ [10] ทำที่ 1125, 1145, 1165, 1185, 1205 องศาเซลเซียส พบว่าช่วงอุณหภูมิที่ชิ้นงานออกมาดีที่สุดคือ 1145 และ 1165 องศาเซลเซียส แต่อีกการทดลองก่อนหน้านี้ [9] สรุปมาว่าอุณหภูมิที่ดีที่สุดคือ 1165 องศาเซลเซียส

สำหรับโคบอลต์ มีงานวิจัยเพิ่มเติม [11] ว่าเมื่อเติมลงในชิ้นงานที่เป็น single crystal ด้วยปริมาณ 4, 8.5, 11.5 %Co โดยน้ำหนัก พบถึงผลเสียของการเติมโคบอลต์ที่มากเกินไป โคบอลต์สามารถทำให้เกิดการแตกหักของโครงสร้างจุลภาคได้ภายหลังการทำ heat treatment ขนาดโครงสร้างจุลภาคของแกมมาไพรม์ลดลง ที่ 4 และ 8.5 %Co จะเกิด TCP ได้ แต่ที่ 11.5 %Co จะไม่พบเฟส TCP สรุป

ได้ว่าการเติมโคบอลต์มากขึ้น ทำให้ลดการเกิดอนุภาคหยาบของแกมมาไพรม์และขัดขวางการเกิดเฟส TCP

อย่างไรก็ตามได้มีงานวิจัยในอดีตได้ศึกษาถึงผลกระทบของธาตุต่างๆต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลเป็นจำนวนมาก แต่ยังไม่มีการศึกษาถึงผลกระทบของธาตุผสมโดยเฉพาะอะลูมิเนียม นิกเกิล และโคบอลต์ในเชิงลึก ต่อขั้นตอนการทำละลายและการบ่มแข็งในกรรมวิธีทางความร้อนแบบมาตรฐานในเกรด GTD-111 และ ส่วนผสมอื่นๆที่ใกล้เคียงกัน จึงเป็นความสนใจในการที่จะศึกษาผลกระทบดังกล่าวในงานวิจัยชิ้นนี้

2.7 การทำกรรมวิธีทางความร้อนใน GTD-111 [11]

จุดเด่นเกี่ยวกับโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลคือมีความเสถียรสูงและแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง ตัวแปรหลักๆที่เกี่ยวข้องกับการให้กรรมวิธีทางความร้อนใน GTD-111 ได้แก่ เวลา, อุณหภูมิ และ อัตราการเย็นตัว ของขั้นตอน การทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน, การทำละลายบางส่วน และ การบ่มแข็ง จากงานวิจัยที่ผ่านมาทำให้พบว่า การให้เป็นเนื้อเดียวกันที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมงนั้นเพียงพอต่อการทำให้โครงสร้างจุลภาคที่เป็นเนื้อเดียวกัน หากให้อุณหภูมิขึ้นไปสูงถึง เป็นเวลานาน จะทำให้โครงสร้างจุลภาคหลอมเป็นเนื้อเดียวกัน และพบว่าเกิดโครงสร้าง $\gamma-\gamma'$ eutectic ขึ้น ขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญในการทำ กรรมวิธีทางความร้อนคือ การทำละลายอย่างสมบูรณ์ สำหรับ อัตราการเย็นตัวที่สูงเกินไปนั้น จะทำให้แกมมาไพรม์ไม่เป็นเนื้อเดียวกันกับเนื้อพื้่นิกเกิล โดยที่อัตราการเย็นตัวจะมีผลต่อขนาด, รูปร่าง และปริมาณแกมมาไพรม์ สำหรับเงื่อนไขในการทำทดลองที่ดีที่สุดในงานนี้คือการทำละลายที่ 1120 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง จากนั้นทำการบ่มแข็งเพื่อให้สารละลายของแข็งที่อิ่มตัวยังยวดเกิดเป็นเฟสแกมมาไพรม์ออกมา โดยช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 845 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง

2.8 การให้กรรมวิธีทางความร้อนอีกครั้งใน GTD-111 [12]

โครงสร้างจุลภาคของ GTD-111 หลังถูกใช้งานมาเป็นเวลานานถูกนำมาตรวจด้วย SEM ภายหลังจากการทำ reheat treatment พบว่าชิ้นงานสามารถฟื้นฟูสภาพได้ มีการทดลอง 3 ขั้นตอนในเงื่อนไขทั้งหมด 9 แบบดังตารางที่ 2.7

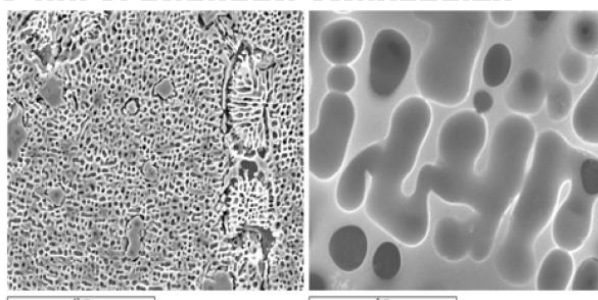
จากงานวิจัย [12] ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ถึง 2.17 โดยมีผลการทดลองที่ทำให้เห็นว่า เงื่อนไขที่ดีที่สุดในการทำ heat treatment คือเงื่อนไขที่ 5 และ 6 สรุปลได้จากงานวิจัยนี้และงานวิจัยอื่น ๆ [2] ว่า เงื่อนไขที่ดีที่สุดสำหรับ GTD-111 โดยทั่วไปช่วง solution treatment คือระหว่าง 1125 และ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2-6 ชั่วโมง สำหรับการทดลองนี้ [12] คือ 1150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2

ชั่วโมง จะส่งผลให้มีความเป็นเนื้อเดียวกันของโครงสร้างจุลภาคมากขึ้น ในขั้นตอนการทำ primary precipitation aging ที่ 925 หรือ 1055 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1-2 ชั่วโมง จะเพิ่มขนาดเกรนของแกมมาไพรม์โดยเฉพาะเกรนแกมมาไพรม์แบบหยาบ ขั้นตอนสุดท้ายคือ secondary precipitation aging ที่ 845 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง

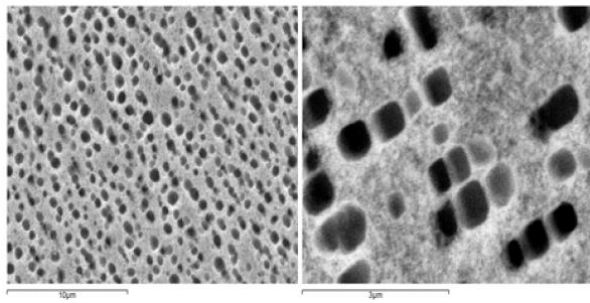
ตารางที่ 0.7 เงื่อนไขต่างๆในการให้กรรมวิธีทางความร้อนใน GTD-111 ที่ใช้งานมาเป็นเวลานาน [12]

No.	Solution Treatment	Primary precipitate aging	Secondary precipitate aging
1 *	1125°C / 2 hrs. (AC)	-	845°C / 24 hrs. (AC)
2	1125°C / 2 hrs. (AC)	925°C / 1 hr. (AC)	845°C / 24 hrs. (AC)
3	1125°C / 2 hrs. (AC)	1055°C / 1 hr. (AC)	845°C / 24 hrs. (AC)
4	1150°C / 2 hrs. (AC)	-	845°C / 24 hrs. (AC)
5	1150°C / 2 hrs. (AC)	925°C / 1 hr. (AC)	845°C / 24 hrs. (AC)
6	1150°C / 2 hrs. (AC)	1055°C / 1 hr. (AC)	845°C / 24 hrs. (AC)
7	1175°C / 2 hrs. (AC)	-	845°C / 24 hrs. (AC)
8	1175°C / 2 hrs. (AC)	925°C / 1 hr. (AC)	845°C / 24 hrs. (AC)
9	1175°C / 2 hrs. (AC)	1055°C / 1 hr. (AC)	845°C / 24 hrs. (AC)

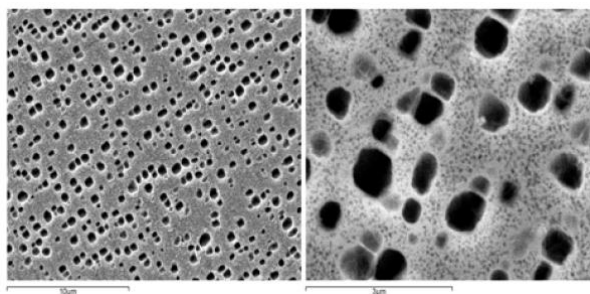
* Standard Heat-Treatment condition



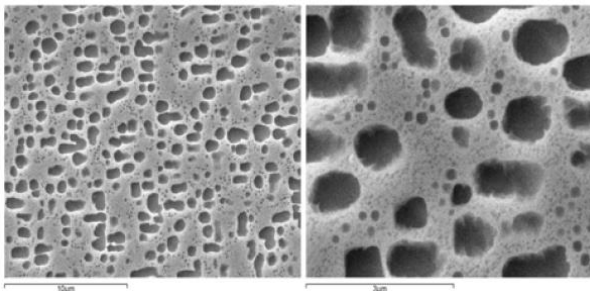
รูปที่ 0.8 ภาพ SEM แสดงสภาพตั้งต้นของชิ้นงาน GTD-111 ที่ได้รับมาหลังผ่านการใช้งานเป็นเวลานาน [12]



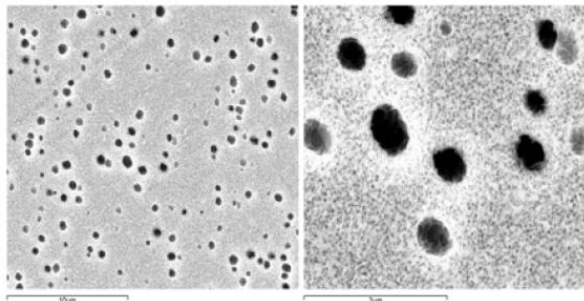
รูปที่ 0.9 ภาพ SEM หลังผ่านการทำ heat treatment ตามเงื่อนไขที่ 1 จากตารางที่ 2.7 [12]



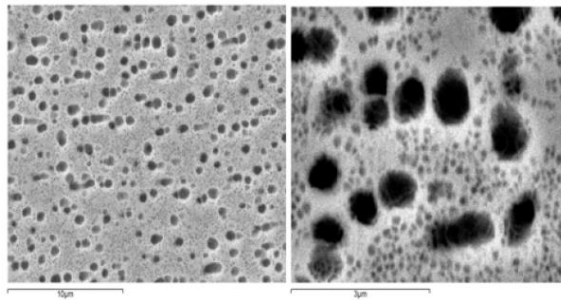
รูปที่ 0.10 SEM หลังผ่านการทำ heat treatment ตามเงื่อนไขที่ 2 จากตารางที่ 2.7 [12]



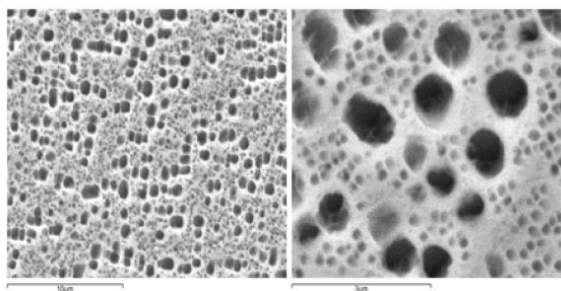
รูปที่ 0.11 ภาพ SEM หลังผ่านการทำ heat treatment ตามเงื่อนไขที่ 3 จากตารางที่ 2.7 [12]



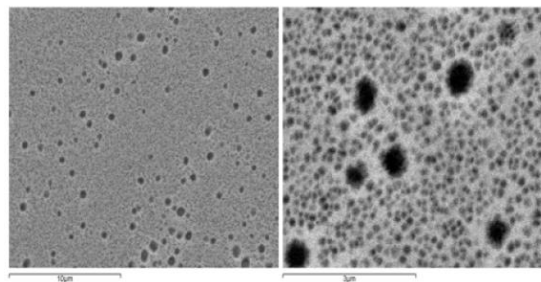
รูปที่ 0.12 ภาพ SEM หลังผ่านการทำ heat treatment ตามเงื่อนไขที่ 4 จากตารางที่ 2.7 [12]



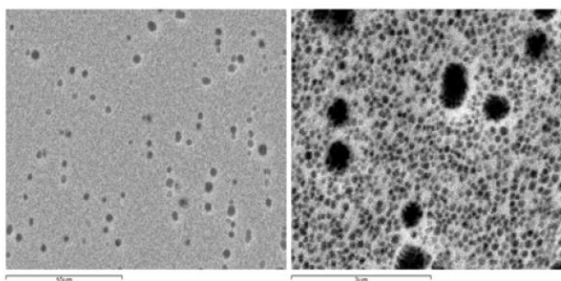
รูปที่ 0.13 ภาพ SEM หลังผ่านการทำ heat treatment ตามเงื่อนไขที่ 5 จากตารางที่ 2.7 [12]



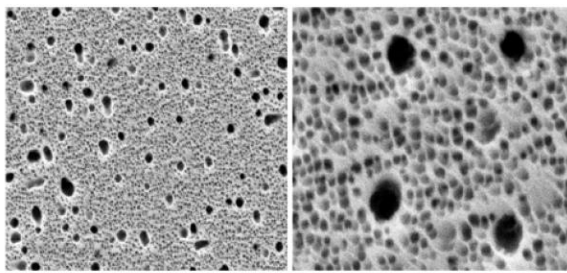
รูปที่ 0.14 ภาพ SEM หลังผ่านการทำ heat treatment ตามเงื่อนไขที่ 6 จากตารางที่ 2.7 [12]



รูปที่ 0.15 ภาพ SEM หลังผ่านการทำ heat treatment ตามเงื่อนไขที่ 7 จากตารางที่ 2.7 [12]



รูปที่ 0.16 ภาพ SEM หลังผ่านการทำ heat treatment ตามเงื่อนไขที่ 8 จากตารางที่ 2.7 [12]



รูปที่ 0.17 ภาพ SEM หลังผ่านการทำ heat treatment ตามเงื่อนไขที่ 9 จากตารางที่ 2.7 [12]

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องอื่น ๆ [13]

ผลการทดลองของงานวิจัยก่อนหน้า [13] เป็นงานที่ผู้วิจัยจะนำมาศึกษาเพิ่มเติม เพื่อต่อยอดและอ้างอิงกับผลการทดลองในงานวิจัยนี้ ซึ่งในงานวิจัยก่อนหน้า ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลของการเติมโคบอลต์และนิกเกิลในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรดจีทีดี-111 ที่เติมอะลูมิเนียม 1% โดยน้ำหนัก และเตรียมด้วยกรรมวิธีการหลอมแบบอาร์ค เพื่อดูโครงสร้างจุลภาคและความเสถียรของเฟสแกมมาไพรม์ วิธีการทดลองเริ่มจากการนำโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรดจีทีดี-111 มา 6 ชิ้น เพื่อเตรียมเป็นชิ้นงานที่ต่างกัน 6 แบบโดยแบ่งตามส่วนผสมโดยน้ำหนัก ซึ่งน้ำหนักอะลูมิเนียม, นิกเกิล และโคบอลต์เพื่อมาผสมตามสัดส่วนที่ต้องการ ดังในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 0.8 เงื่อนไขในการเติมธาตุอะลูมิเนียม โคบอลต์และนิกเกิลโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรดจีทีดี-111 [13]

ธาตุ ชิ้นงาน	(% โดยน้ำหนัก)			
	GTD-111	นิกเกิล (Ni)	โคบอลต์ (Co)	อะลูมิเนียม (Al)
S1	100	-	-	-
S2	93	6.0	0	1
S3	93	4.5	1.5	1
S4	93	3.0	3.0	1
S5	93	1.5	4.5	1
S6	93	0	6.0	1

จากนั้น นำส่วนผสมมาหลอมในเตาหลอมแบบอาร์ค จะได้ชิ้นงานออกมา 6 ชิ้นที่มีส่วนผสมต่างกัน ตามต้องการ นำชิ้นงานทั้ง 6 ไปทำละลายให้เกิดสารละลายของแข็งเนื้อเดียว (Solution treatment) ที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วนำไปบ่มแข็ง (Aging

treatment) ที่อุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นแบ่งชิ้นงานแต่ละชิ้นเป็น 2 ส่วน นำชิ้นงานส่วนหนึ่งไปจำลองการใช้งานจริง (Thermal exposure) ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และอีกส่วนนำไปทดลองที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาทั้งหมด 400 ชั่วโมง

จากผลการทดลองจะเห็นว่าทั้งอะลูมิเนียม, นิกเกิล และโคบอลต์ส่งผลต่อรูปร่างของอนุภาคแกมมาไพรม์, ขนาดของอนุภาคแกมมาไพรม์, ความหนาของแกมมาไพรม์ และสัดส่วนของแกมมาไพรม์ต่อพื้นที่ รูปร่างของอนุภาคแกมมาไพรม์นั้นหากเติมอะลูมิเนียมลงไปจะทำให้ความเหลี่ยมของอนุภาคแกมมาไพรม์เพิ่มขึ้นหลังจากผ่านการบ่มแข็ง และมีลักษณะเกาะกันเป็นแพมากขึ้นเมื่อผ่านเผาที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน ในทางกลับกันการเติมโคบอลต์นั้นส่งผลให้ความเหลี่ยมของอนุภาคแกมมาไพรม์ลดลงและการเกาะกันเป็นแพลดลง เมื่อพิจารณาขนาดของอนุภาคแกมมาไพรม์นั้น พบว่าอนุภาคแกมมาไพรม์จะมีขนาดจะเพิ่มขึ้นเมื่อเติมอะลูมิเนียมและนิกเกิล ในขณะที่เมื่อเติมโคบอลต์จะส่งผลให้อนุภาคแกมมาไพรม์มีขนาดเล็กลง สัดส่วนเชิงพื้นที่ของเฟสแกมมาไพรม์จะเพิ่มขึ้นเมื่อเติมอะลูมิเนียมและนิกเกิล แต่ในชิ้นงานที่เติมโคบอลต์จะมีค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่ของเฟสแกมมาไพรม์ลดลง หลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 0.9 สรุปผลของการเติมอะลูมิเนียม, นิกเกิล และโคบอลต์ [13]

process	+ 1 wt.% Al	+Ni	+Co
Solution treatment	Cuboidal γ' ↑		
Aging treatment	γ' size ↑ γ' phase area fraction ↑	γ' size ↑	Cuboidal γ' ↓ γ' size ↓
Heating at 900°C for 400 hours	γ' size ↑	TCP phases ↓	γ' size ↓ TCP phases ↓
Heating at 1000°C for 400 hours	Coalescence γ' ↑ γ' size ↑ γ' phase area fraction ↑	TCP phases ↓	Coalescence γ' ↓ γ' size ↓ γ' phase area fraction ↓ TCP phases ↓

บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

3.1 วัสดุ, อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้

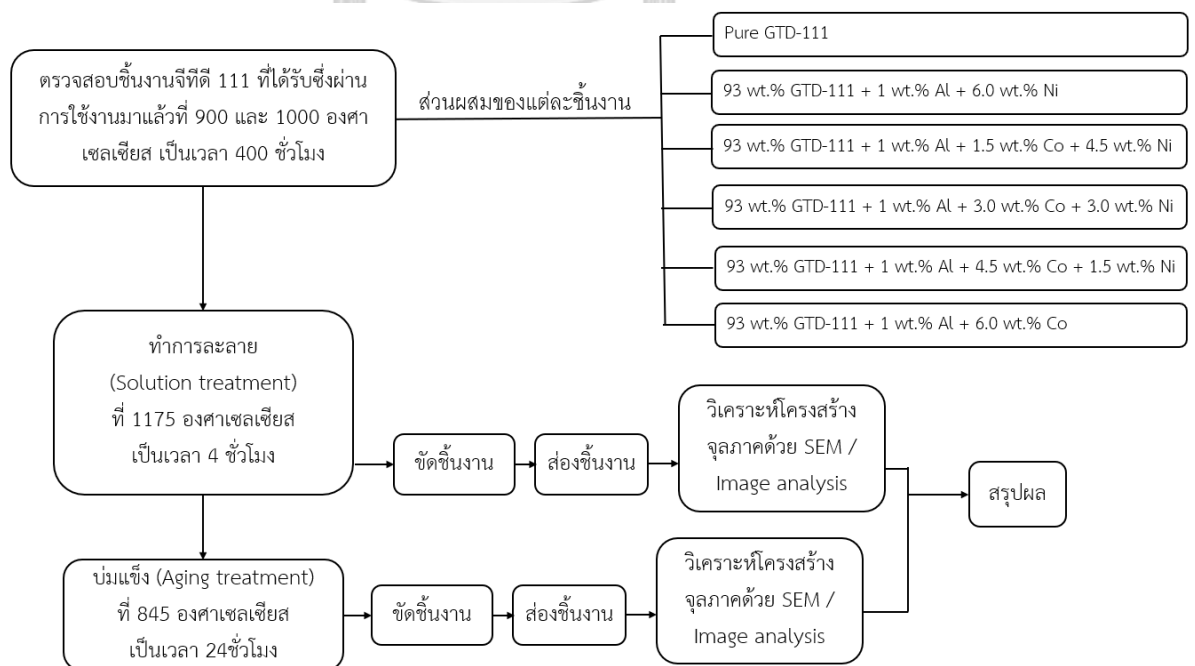
1. ชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเนื้อพินิกเกิล เกรด GTD-111 และที่มีส่วนผสมตามที่กำหนดที่ผ่านการจำลองการใช้งานมาแล้ว
2. เตาลอมสุญญากาศแบบอาร์ค (MRF model SA-200)
3. เตาเผาสำหรับการทำกรรมวิธีทางความร้อนที่ประกอบไปด้วยการทำละลายและการบ่มแข็ง
4. เครื่องขัดชิ้นงาน
5. กระดาษทรายเบอร์ 80 150 240 320 400 600 800 1000 และ 2000
6. ผงอะลูมินา
7. ผ้าสักหลาด
8. สารละลายกรดสำหรับกัดผิวชิ้นงาน (น้ำ กรดไฮโดรคลอริก (HCl) จุนสี (CuSO_4))
9. แอลกอฮอล์
10. น้ำกลั่น
11. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)
12. กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope, OM)
13. โปรแกรมวิเคราะห์ภาพ (image analysis program)

3.2 ขั้นตอนการทำการวิจัย

1. เตรียมผิวชิ้นงานโดยการขัดละเอียด (polishing) ด้วยผงอะลูมินาขนาด ไมครอน และกัดกรดชิ้นงานด้วยสารละลายหินอ่อน (Marble solution) ที่ประกอบด้วยจุนสี (CuSO_4) 10 กรัม กรดไฮโดรคลอริก (HCl) 50 มิลลิลิตร และน้ำกลั่น (H_2O) 50 มิลลิลิตร จากนั้นนำชิ้นมาล้างด้วยน้ำและแอลกอฮอล์ ก่อนเป่าให้แห้งด้วยลมร้อน
2. ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานโลหะผสมพิเศษที่นำมาปรับปรุงส่วนผสมตามรูปที่ 3.1 และได้ผ่านงานใช้งานที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศา เป็นเวลา 400 ชั่วโมงมาแล้ว โดยจะมีชิ้นงานรวม 12 ชิ้น ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (OM) และกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM)

3. นำชิ้นงานไปทำละลายให้เกิดสารละลายของแข็งเนื้อเดียว (Solution treatment) ที่ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จะได้ชิ้นงานออกมาทั้งหมด 12 ชิ้น แล้วขัดผิวชิ้นงานแบบหยาบ (grinding) ด้วยกระดาษทรายเบอร์ 80 150 240 320 400 600 800 1000 2000ตามด้วยการขัดละเอียดด้วยผงอะลูมินาตามลำดับ จากนั้นกัดกรดชิ้นงานด้วยสารละลาย Marble แล้วล้างด้วยน้ำและแอลกอฮอล์ ก่อนเป่าให้แห้งด้วยลมร้อน
4. ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคที่ได้จากการทำละลายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แล้วบันทึกผลเป็นรูปภาพ ก่อนนำไปวิเคราะห์ผลโดยใช้โปรแกรม (Image analysis™) ตรวจภาพที่ถ่ายมาได้จากชิ้นงานต่างๆ เพื่อหาขนาด สัดส่วนเชิงพื้นที่ และค่าความกลม (circularity) ของอนุภาคแกมมาไพรม์
5. นำชิ้นงานที่ได้จากข้อ 2 ไปทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้ชิ้นงานออกมาทั้งหมด 12 ชิ้น แล้วทำการขัดหยาบและขัดละเอียดผิวชิ้นงาน พร้อมทั้งกัดกรดด้วยสารละลาย Marble เช่นเดียวกันกับขั้นตอนก่อนหน้านี้ แล้วทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แล้วบันทึกผลเป็นรูปภาพ ก่อนนำไปวิเคราะห์ผลโดยใช้โปรแกรม (Image analysis™) ตรวจภาพที่ถ่ายมาได้จากชิ้นงานต่างๆ เพื่อหาขนาด สัดส่วนเชิงพื้นที่และค่าความกลม (circularity) ของอนุภาคแกมมาไพรม์
6. วิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้รับและสรุปผล

3.3 แผนผังขั้นตอนการทดลอง



รูปที่ 0.1 แผนผังขั้นตอนทำการทดลอง

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

4.1 ผลการทดลอง

4.1.1 ที่มาของชิ้นงานที่ใช้ทดลอง

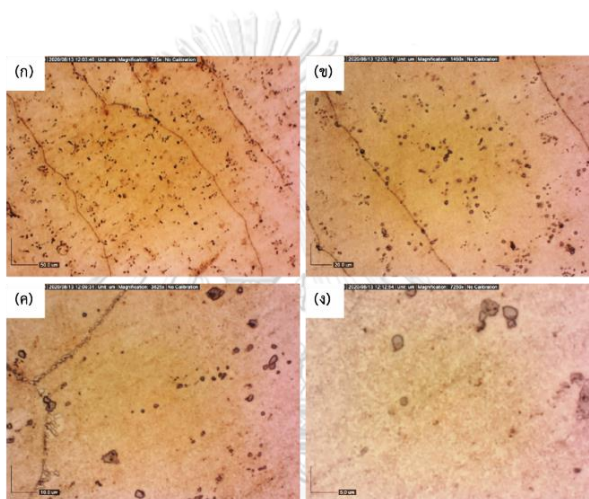
ชิ้นงานทั้งหมดมาจากงานทดลองจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ [13] ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 ที่ได้นำโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิดจีทีดี-111 มาแบ่งเป็น 6 กลุ่ม จากนั้นหลอมรวมกับอะลูมิเนียม, นิกเกิล และโคบอลต์ ด้วยอัตราส่วนโดยน้ำหนักที่ต่างกันดังในตารางที่ 2.8 ตั้งชื่อว่า S1, S2, S3, S4, S5 และ S6 และทดสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยเครื่องวิเคราะห์การกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์เรย์ (Energy dispersive X-ray spectroscopy) หลังจากนั้นแบ่งครึ่งชิ้นงานทุกชิ้น ทำให้ได้ชิ้นงาน 2 ชุด ชุดละ 6 ชิ้น รวมทั้งหมด 12 ชิ้น เพื่อนำไปจำลองการใช้งานที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 1 ชุด และ 1000 องศาเซลเซียส อีก 1 ชุด เป็นเวลานาน 400 ชั่วโมง สำหรับชิ้นงานหลังจากเผาที่ 900 องศาเซลเซียส ที่ส่วนผสมต่าง ๆ จะตั้งชื่อว่า A1, A2, A3, A4, A5 และ A6 ส่วนชิ้นงานหลังจากเผาที่ 1000 องศาเซลเซียส ที่ส่วนผสมต่าง ๆ จะตั้งชื่อว่า B1, B2, B3, B4, B5 และ B6 สำหรับส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานจะอ้างอิงค่าที่ได้จากการทดสอบในงานวิจัยก่อนหน้านี้ [13] ดังตารางที่ 4.1 จากนั้นนำชิ้นงานนำมาถ่ายรูปด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope, OM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) แล้วภาพที่ได้มาตรวจสอบ เพื่อหาค่าขนาดอนุภาคแกมมาไพรม์ (Gamma Prime area per Particle), ค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่ของเฟสแกมมาไพรม์ (Average area of gamma prime particle) และค่าความกลม (Circularity) ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ

ตารางที่ 0.1 ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงาน A1 ถึง A6 และชิ้นงาน B1 ถึง B6

Ref. [13]	ชิ้นงาน	ส่วนผสมทางเคมี (%โดยน้ำหนัก)										
		Al	Co	Ni	Cr	Mo	W	Ti	Ta	Nb	Zr	Fe
S1	A1, B1	3.20	10.07	57.91	14.09	1.85	5.25	4.63	2.66	0.17	0.30	0.21
S2	A2, B2	4.06	8.83	60.51	13.23	1.74	4.45	4.38	2.46	0.23	0.20	0.17
S3	A3, B3	3.97	10.53	58.38	12.82	1.73	4.67	4.47	2.60	0.34	0.48	0.00
S4	A4, B4	3.80	12.25	56.97	13.22	1.89	4.81	4.24	2.63	0.07	0.21	0.04
S5	A5, B5	3.96	13.06	56.49	12.77	1.75	4.77	4.23	2.35	0.30	0.33	0.09
S6	A6, B6	3.76	14.42	54.64	18.90	1.91	4.78	4.46	2.80	0.34	0.35	0.11

4.1.2 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ได้รับ (As-received samples)

โครงสร้างที่เกิดขึ้นจะเห็นได้จากการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ที่กำลังขยาย 725 เท่า, 1450 เท่า, 3625 เท่า และ 7250 เท่า จะเห็นอนุภาคแกมมาไพรม์ที่เป็นสีน้ำตาลเข้มกระจายในเนื้อพื้นแกมมาที่เป็นสีอ่อน ๆ มีเม็ดคาร์ไบด์ปฐมภูมิกระจายทั่วอยู่ภายในเกรนและคาร์ไบด์ทุติยภูมิเกาะตามขอบเกรน ซึ่งเป็นลักษณะโดยทั่วไปของงานหล่อโลหะดังรูปที่ 4.1 ทั้งนี้ การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่กำลังขยายต่ำ จะไม่สามารถเห็นความแตกต่างของโครงสร้างจุลภาคได้ชัดเจนมากนัก ถึงแม้ว่าชิ้นงานจะมีส่วนผสมทางเคมีที่ไม่เหมือนกันและผ่านการทดสอบที่สภาวะแตกต่างกันก็ตาม



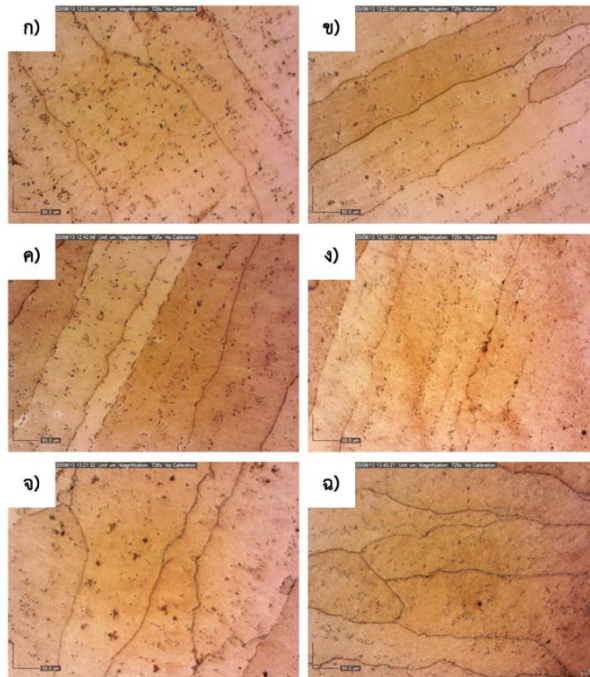
รูปที่ 0.1 ตัวอย่างภาพชิ้นงานที่ได้รับจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงของชิ้นงานที่ได้รับที่กำลังขยาย

(ก) 725 (ข) 1450 (ค) 3625 และ (ง) 7250 เท่า

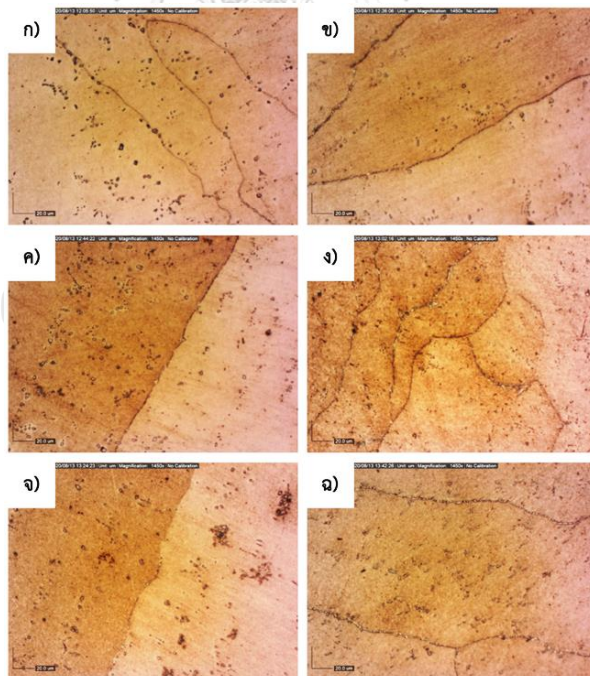
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากรูปที่ 4.2 ถึง 4.9 จะเห็นส่วนของสีน้ำตาลที่เข้มกว่า ซึ่งก็คือ อนุภาคแกมมาไพรม์ ในทุกกำลังขยาย ในภาพที่กำลังขยายต่ำ (725 เท่า) จะเห็นอนุภาคแกมมาไพรม์เป็นบริเวณสีน้ำตาลเข้ม และในบริเวณที่เป็นสีอ่อนคือเนื้อพื้นแกมมา ในภาพที่กำลังขยายสูงขึ้นไปจะเริ่มเห็นแกมมาไพรม์ในลักษณะที่เป็นเม็ดเกาะรวมกันเป็นแพ และ/หรือ เป็นเม็ดกระจายอยู่ทั่วเนื้อพื้น

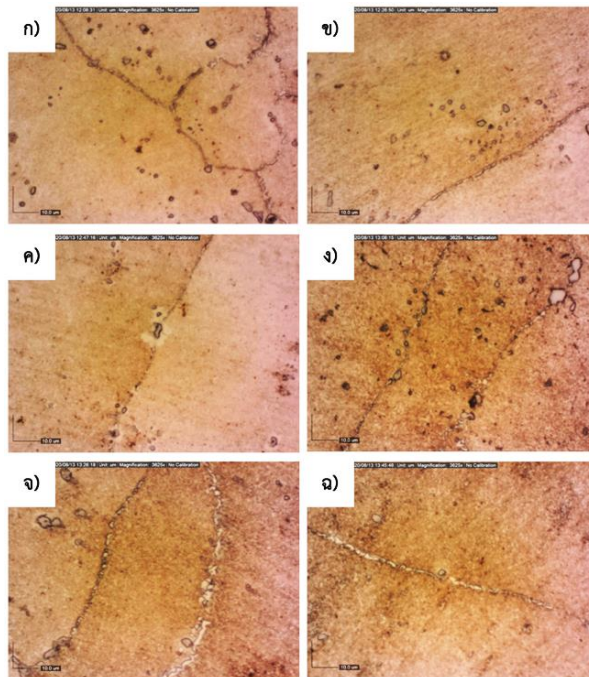
นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบอนุภาคแกมมาไพรม์ที่ชิ้นงานระหว่างชิ้นงานชุด A1 ถึง A6 และ B1 ถึง B6 จากรูปถ่ายที่กำลังขยาย 7250 เท่า (รูปที่ 4.5 และ 4.9) จะเห็นได้ว่าอนุภาคแกมมาไพรม์ในชิ้นงานชุด B1 ถึง B6 มีขนาดใหญ่กว่าชิ้นงานชุด A1 ถึง A6 อย่างชัดเจน



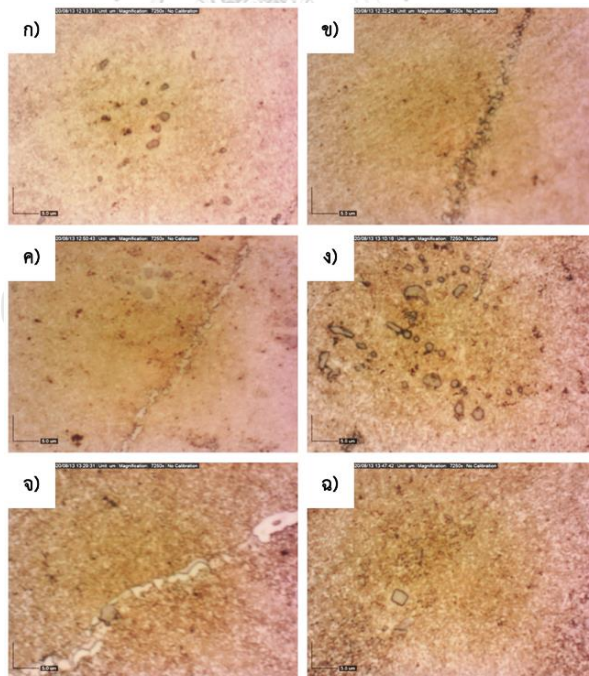
รูปที่ 0.2 ภาพ OM ของชิ้นงานที่ได้รับ A1 ถึง A6 ที่กำลังขยาย 725 เท่า
โดยที่ ก) A1, ข) A2, ค) A3, ง) A4, จ) A5, ฉ) A6



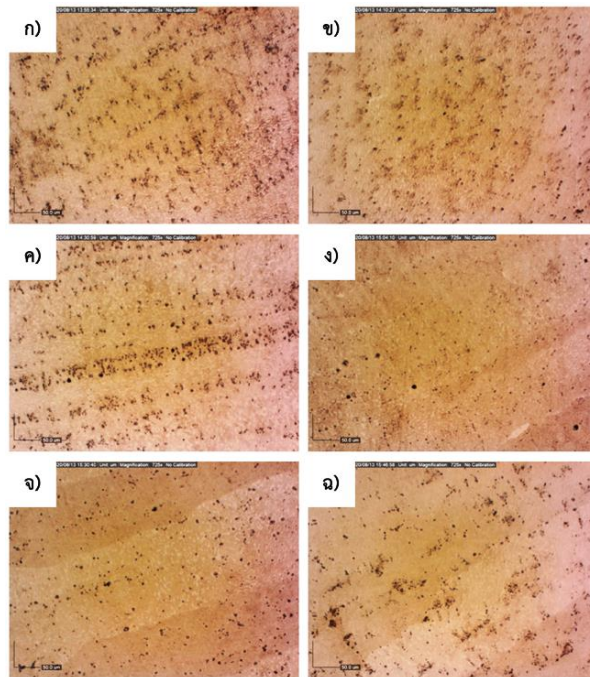
รูปที่ 0.3 ภาพ OM ของชิ้นงานที่ได้รับ A1 ถึง A6 ที่กำลังขยาย 1450 เท่า
โดยที่ ก) A1, ข) A2, ค) A3, ง) A4, จ) A5, ฉ) A6



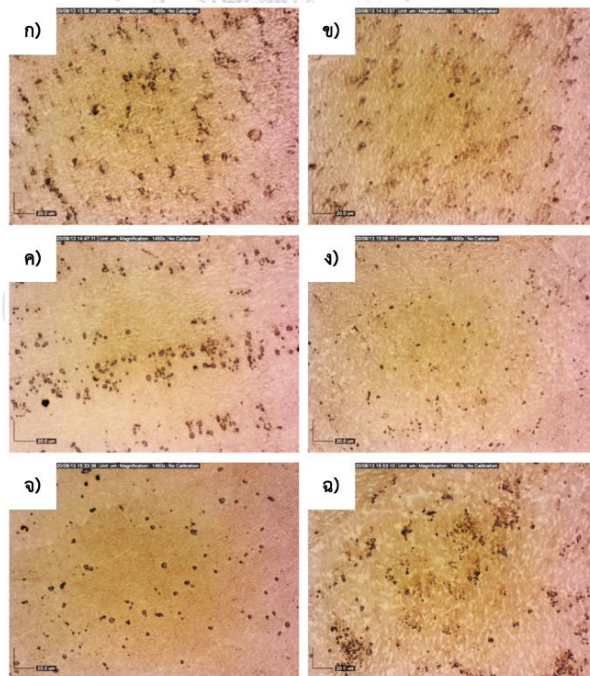
รูปที่ 0.4 ภาพ OM ของชิ้นงานที่ได้รับ A1 ถึง A6 ที่กำลังขยาย 3625 เท่า
โดยที่ ก) A1, ข) A2, ค) A3, ง) A4, จ) A5, ฉ) A6



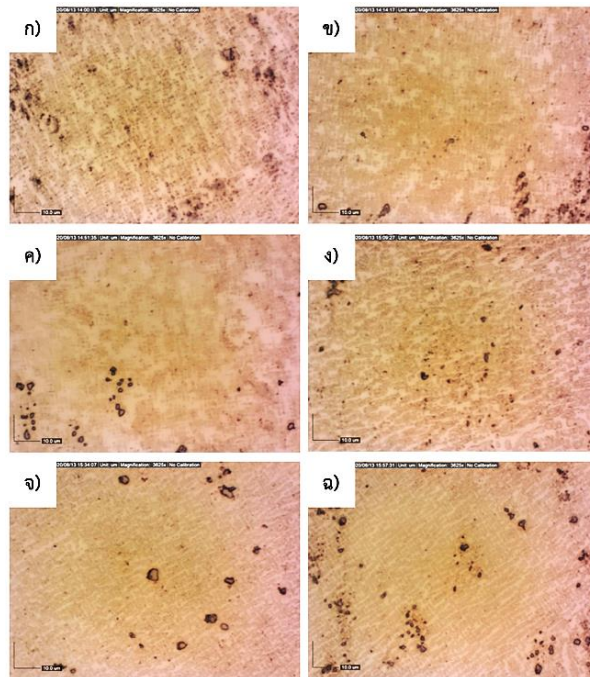
รูปที่ 0.5 ภาพ OM ของชิ้นงานที่ได้รับ A1 ถึง A6 ที่กำลังขยาย 7250 เท่า
โดยที่ ก) A1, ข) A2, ค) A3, ง) A4, จ) A5, ฉ) A6



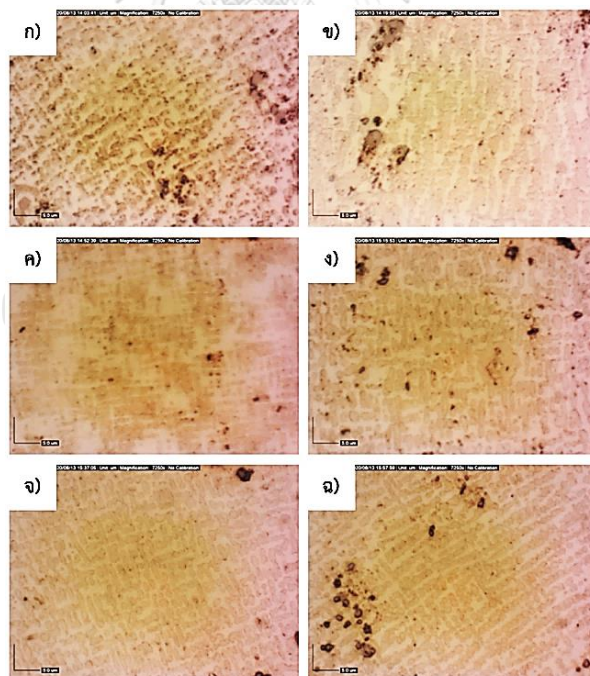
รูปที่ 0.6 ภาพ OM ของชิ้นงานที่ได้รับ B1 ถึง B6 ที่กำลังขยาย 725 เท่า
โดยที่ ก) B1, ข) B2, ค) B3, ง) B4, จ) B5, ฉ) B6



รูปที่ 0.7 ภาพ OM ของชิ้นงานที่ได้รับ B1 ถึง B6 ที่กำลังขยาย 1450 เท่า
โดยที่ ก) B1, ข) B2, ค) B3, ง) B4, จ) B5, ฉ) B6

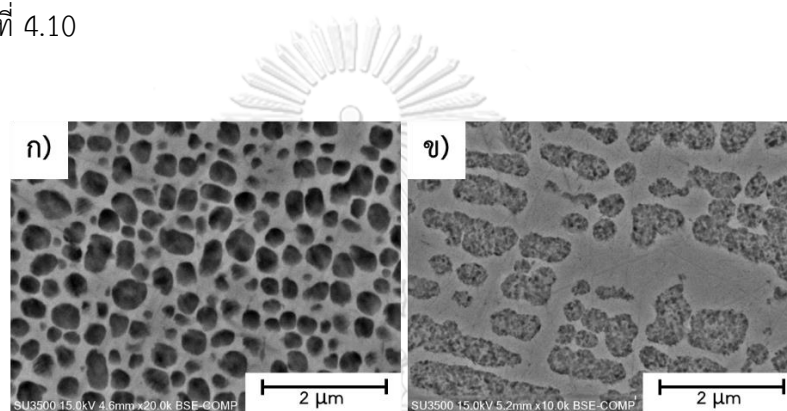


รูปที่ 0.8 ภาพ OM ของชิ้นงานที่ได้รับ B1 ถึง B6 ที่กำลังขยาย 3625 เท่า
โดยที่ ก) B1, ข) B2, ค) B3, ง) B4, จ) B5, ฉ) B6



รูปที่ 0.9 ภาพ OM ของชิ้นงานที่ได้รับ B1 ถึง B6 ที่กำลังขยาย 7250 เท่า
โดยที่ ก) B1, ข) B2, ค) B3, ง) B4, จ) B5, ฉ) B6

อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกำลังขยายที่สูงมากขึ้น จากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าภาพโครงสร้างจุลภาคที่แตกต่างออกไปจากแบบกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงอย่างสิ้นเชิง เนื่องจากมีการใช้กำลังขยายในการถ่ายรูปที่สูงกว่ามาก (กำลังขยาย 10000 เท่า สำหรับชิ้นงานชุด B1 ถึง B6 และ 20000 เท่า สำหรับ ชิ้นงานชุด A1 ถึง A6) ภาพที่ได้จะเป็นสีเข้ดำ เห็นอนุภาคแกมมาไพรม์ชัดเจน มีสเกลบอกขนาดเทียบกับขนาดอนุภาคจริง สามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อหาค่าขนาดอนุภาคแกมมาไพรม์และค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่ของเฟสแกมมาไพรม์ได้จากโปรแกรม ImageJ™ จากภาพถ่าย SEM อนุภาคแกมมาไพรม์จะมีสี่เหลี่ยมหรือทรงแฉ (ระดับความเข้มขึ้นอยู่กับการกักรตผิวชิ้นงาน) ตกตะกอนอยู่ในเนื้อพื้นแกมมาที่มีสีเทาอ่อน ดังในรูปที่ 4.10

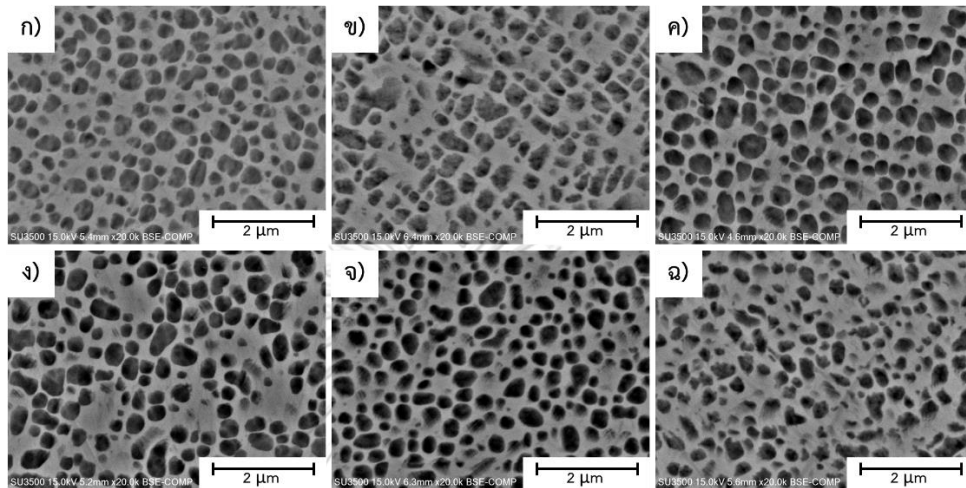


รูปที่ 0.10 ตัวอย่างภาพ SEM (ก) ที่กำลังขยาย 20000 เท่า และ (ข) ที่กำลังขยาย 10000 เท่า

รูปที่ได้จากภาพถ่าย SEM ของแต่ละชิ้นงานได้เรียงตามลำดับจากส่วนผสมที่แตกต่างกันที่ผ่านการเผาให้ความร้อนเป็นระยะเวลา 400 ชั่วโมง ที่ 900 องศาเซลเซียส โดยใช้กำลังขยาย 20000 เท่า เป็นชิ้นงาน A1, A2, A3, A4, A5 และ A6 ดังรูปที่ 4.11 และเผาที่ 1000 องศาเซลเซียส ใช้กำลังขยาย 10000 เท่า เป็นชิ้นงาน B1, B2, B3, B4, B5 และ B6 ดังรูปที่ 4.12 สาเหตุที่ใช้กำลังขยายเป็น 10000 เท่า ในการถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน 1000 องศาเซลเซียส เนื่องจากหากใช้กำลังขยาย 20000 เท่า อนุภาคแกมมาไพรม์จะมีขนาดใหญ่มากเกินไปจนไม่สามารถสังเกตเห็นลักษณะรูปร่างจริงของอนุภาคเหล่านี้ได้

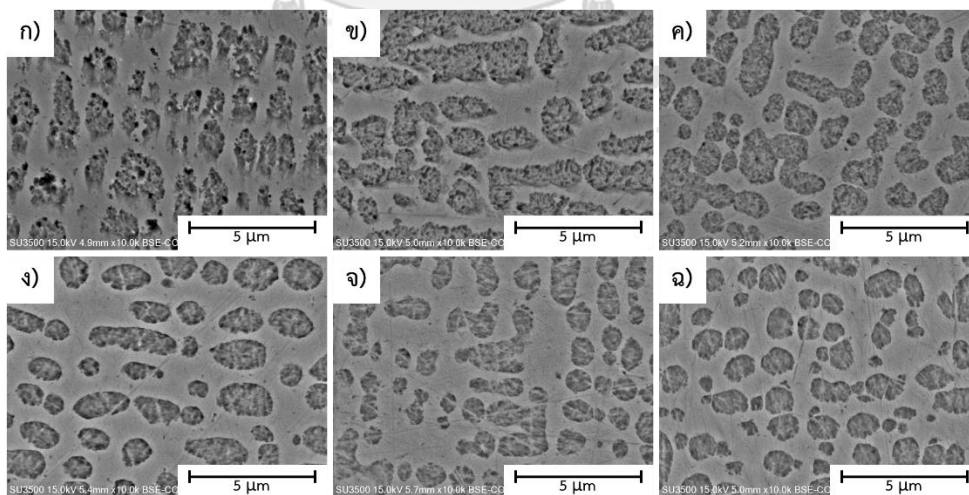
เมื่อพิจารณารูป SEM ในรูปที่ 4.11 ที่เป็นชิ้นงานผ่านการเผาที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 400 ชั่วโมง พบว่าอนุภาคแกมมาไพรม์โดยรวมของชิ้นงาน A1 ถึง A6 มีรูปร่างค่อนข้างกลมและกระจายตัวค่อนข้างสม่ำเสมอ เมื่อเทียบกับอนุภาคแกมมาไพรม์ในรูปที่ 4.12 ที่ผ่านการเผา 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 400 ชั่วโมง อนุภาคโดยรวมของชิ้นงาน B1 ถึง B6 ที่มีขนาดใหญ่และรูปร่างแตกต่างกัน โดยที่อนุภาคแกมมาไพรม์ของชิ้นงานในช่วงที่เดิมอะลูมิเนียมและนิกเกิลเพิ่มขึ้น เช่น อนุภาคแกมมาไพรม์ในชิ้นงาน B2 ถึง B3 จะมีลักษณะเชื่อมติดกันมากเป็นกลุ่มก้อนยาวขนาดใหญ่

ซึ่งสามารถเห็นได้ชัดเจนในรูปที่ 4.12ก และ 4.12ข ในขณะที่ชิ้นงานที่มีการเติมโคบอลต์มาก เช่น B5 ถึง B6 อนุภาคแกมมาไพโรรมีการเชื่อมติดกันน้อยและกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอมากกว่าชิ้นงานที่เติมอะลูมิเนียมและนิกเกิล จากโครงสร้างจุลภาคในรูปที่ 4.11 และ 4.12 แสดงให้เห็นว่าการใช้อุณหภูมิที่สูงกว่าในการเผาเป็นเวลานานจะมีผลกระทบต่อการโตของอนุภาคแกมมาไพโรรมอย่างชัดเจน



รูปที่ 0.11 ภาพโครงสร้างจุลภาคจากการถ่ายภาพ SEM ของชิ้นงาน A1 ถึง A6 กำลังขยาย 20000 เท่า ที่ได้รับมาหลังการเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 400 ชั่วโมง ที่ส่วนผสมต่าง ๆ โดยที่

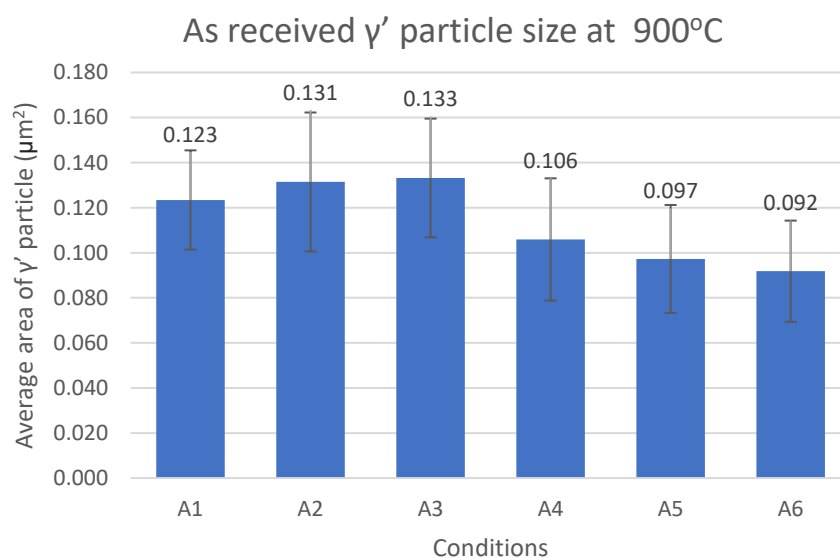
ก) A1, ข) A2, ค) A3, ง) A4, จ) A5 และ ฉ) A6



รูปที่ 0.12 ภาพโครงสร้างจุลภาคจากการถ่ายภาพ SEM ของชิ้นงาน B1 ถึง B6 กำลังขยาย 10000 เท่า ที่ได้รับมาหลังการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 400 ชั่วโมง ที่ส่วนผสมต่าง ๆ โดยที่

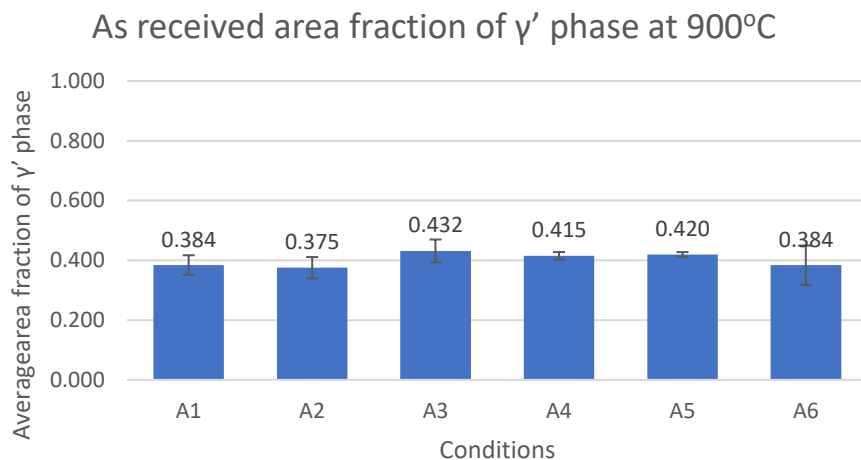
ก) B1, ข) B2, ค) B3, ง) B4, จ) B5, ฉ) B6

จากรูป 4.13 ที่แสดงค่าขนาดอนุภาคแกมมาไพรม์ในชิ้นงาน A1 ถึง A6 ที่ได้รับมา พบว่าขนาดอนุภาคแกมมาไพรม์ของชิ้นงาน A1 ที่ยังไม่มีการเติมธาตุผสม จะมีค่าขนาดอนุภาคแกมมาไพรม์ต่ำกว่าชิ้นงานที่มีการเติมธาตุอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้น 1% โดยน้ำหนัก ชิ้นงานที่มีค่าขนาดของอนุภาคแกมมาไพรม์สูงสุดคือ ชิ้นงาน A3 และจะมีแนวโน้มลดลงจากชิ้นงาน A3 ถึงชิ้นงาน A6 เนื่องจากปริมาณที่ลดลงของธาตุ निकิลที่ช่วยในการตกตะกอนของอนุภาคแกมมาไพรม์ร่วมกับธาตุอะลูมิเนียม ทำให้อนุภาคแกมมาไพรม์ในชิ้นงานที่มีปริมาณ निकิลน้อยกว่าเกิดการโตได้ช้ากว่า นอกจากนี้การเพิ่มธาตุโคบอลต์ส่งผลให้ขนาดอนุภาคแกมมาไพรม์ลดลงได้เช่นเดียวกัน เนื่องจากโคบอลต์ลดอัตราการโตของอนุภาคแกมมาไพรม์ได้ [13] ทำให้อนุภาคแกมมาไพรม์ในชิ้นงาน A2 ถึง A3 มีขนาดใหญ่กว่า เพราะปริมาณของ निकิลมากขึ้นและโคบอลต์ลดลง ในทางกลับกันเมื่อปริมาณ निकิลลดลงและโคบอลต์เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้อนุภาคแกมมาไพรม์ในชิ้นงาน A4 ถึง A6 มีค่าขนาดเล็กลง



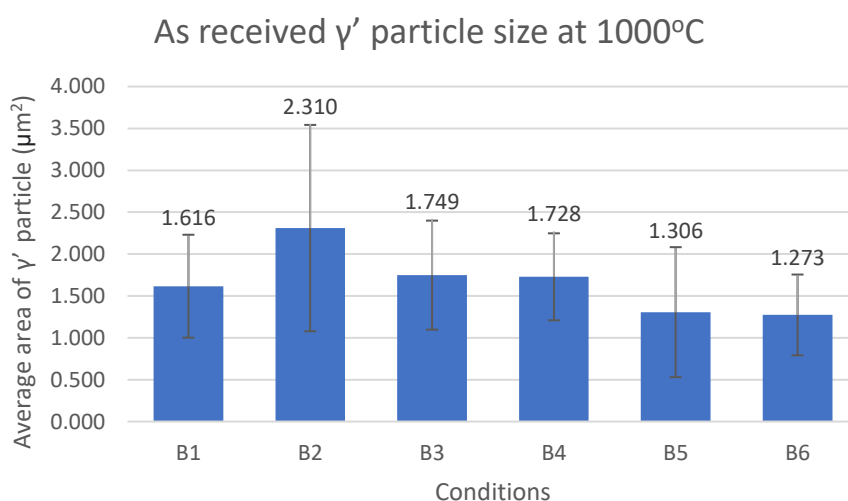
รูปที่ 0.13 ขนาดแกมมาไพรม์เฉลี่ยของชิ้นงานที่ได้รับมา A1 ถึง A6

จากรูป 4.14 ที่แสดงค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่ของแกมมาไพรม์ในชิ้นงานที่ได้รับมา A1 ถึง A6 พบว่าชิ้นงานที่มีค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่สูงสุดคือ ชิ้นงาน A3 กราฟจะยังคงมีผลกระทบจากการเติมธาตุผสมอะลูมิเนียมให้เห็นอยู่ คือส่วนใหญ่แล้วชิ้นงานที่เติมอะลูมิเนียม 1% จะมีค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่มากกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้เติม ซึ่งก็คือ A1 แต่หากค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่ของชิ้นงาน A2 เพิ่มขึ้นมากกว่านี้ อาจทำให้สรุปได้ชัดเจนขึ้นว่ามีผลของการเติมธาตุ निकิลและโคบอลต์ด้วย จากการที่ निकิลเป็นธาตุที่ช่วยเพิ่มค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่ แต่โคบอลต์เป็นธาตุที่ลดค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่ ทำให้ชิ้นงานที่มี निकิลมากและโคบอลต์น้อยจะมีค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่มากกว่าชิ้นงานที่มีปริมาณ निकิลน้อยและโคบอลต์มาก จึงส่งผลให้ชิ้นงาน A3 ถึง A6 มีแนวโน้มการลดลงของสัดส่วนเชิงพื้นที่ของเฟสแกมมาไพรม์เล็กน้อย



รูปที่ 0.14 ค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่ของเฟสแกมมาไพรม์ของชิ้นงานที่ได้รับมา A1 ถึง A6

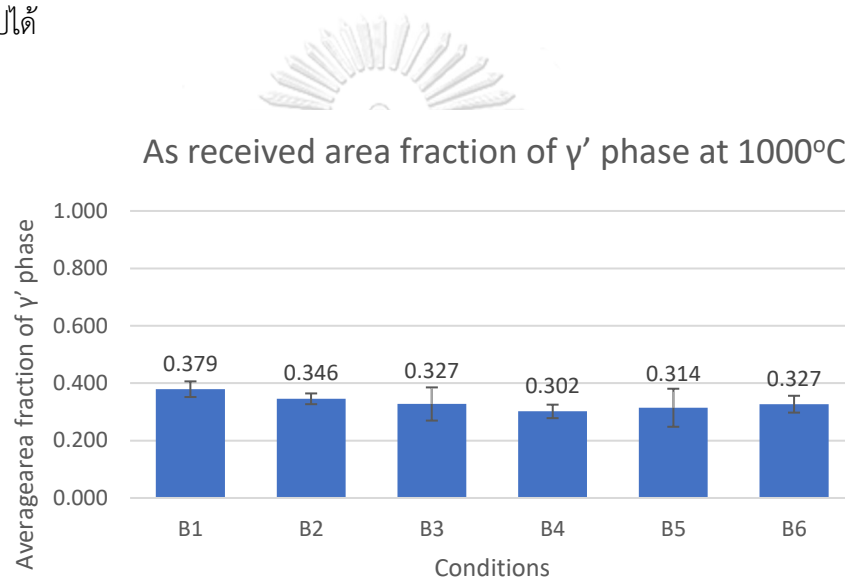
จากรูป 4.15 ที่แสดงค่าขนาดอนุภาคแกมมาไพรม์ในชิ้นงาน B1 ถึง B6 ที่ได้รับมา พบว่าชิ้นงาน B1 ที่ยังไม่มีการเติมธาตุผสมจะมีค่าขนาดอนุภาคแกมมาไพรม์ต่ำกว่าชิ้นงาน B2 ที่มีการเติมธาตุผสมแล้ว ชิ้นงานที่มีค่าขนาดของอนุภาคแกมมาไพรม์สูงสุดคือ ชิ้นงาน B2 และขนาดของอนุภาคเหล่านี้จะมีแนวโน้มลดลงจากชิ้นงาน B2 ถึงชิ้นงาน B6 ซึ่งผลที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มเดียวกันกับชิ้นงาน A1 ถึง A6 เนื่องจากผลของการลดปริมาณนิกเกิลและการเพิ่มปริมาณโคบอลต์



รูปที่ 0.15 ขนาดแกมมาไพรม์เฉลี่ยของชิ้นงานที่ได้รับมา B1 ถึง B6

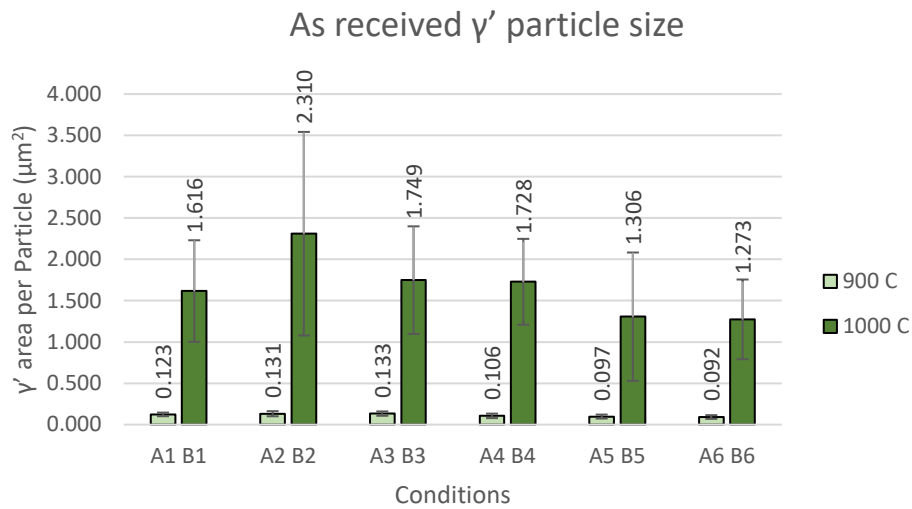
จากรูป 4.16 ที่แสดงค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่ของแกมมาไพรม์ในชิ้นงานที่ได้รับมา B1 ถึง B6 พบว่าชิ้นงานที่มีค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่สูงสุดคือ ชิ้นงาน B1 ที่น่าสนใจคือ ชิ้นงานนี้ดูเหมือนจะไม่มีผล

ของอะลูมิเนียม ซึ่งปกติจะเพิ่มค่าขนาดอนุภาคแกมมาไพรม์ แต่ในกราฟนี้ ส่วนที่มีการเติมธาตุผสมกลับมีค่าขนาดอนุภาคแกมมาไพรม์น้อยกว่าทั้งหมด โดยอาจเกิดกรณีนี้ได้จากผลของการใช้งานที่อุณหภูมิสูงมาก ซึ่งก็คือที่ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน ทำให้เกิดการรวมตัวเป็นก้อนใหญ่ ของอนุภาคแกมมาไพรม์ จึงทำให้สัดส่วนเชิงพื้นที่ของเฟสแกมมาไพรม์ลดลงและการที่อนุภาคแกมมาไพรม์โตอย่างรวดเร็วเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูง อีกทั้งบางส่วนละลายกลับเนื้อพื้นไปอยู่ในรูปสารละลายของแข็ง (solid solution) ไม่เกิดการตกตะกอนเป็นอนุภาค (precipitate particles) โดยรวมจึงมีค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่ของแกมมาไพรม์ต่ำลง หากนำบริเวณเนื้อพื้นไปตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีเพิ่มเติม อาจทำให้พบธาตุผสมต่าง ๆ ได้แก่ อะลูมิเนียม, นิกเกิล และโคบอลต์ ในปริมาณมากกว่าปกติก็มีความเป็นไปได้

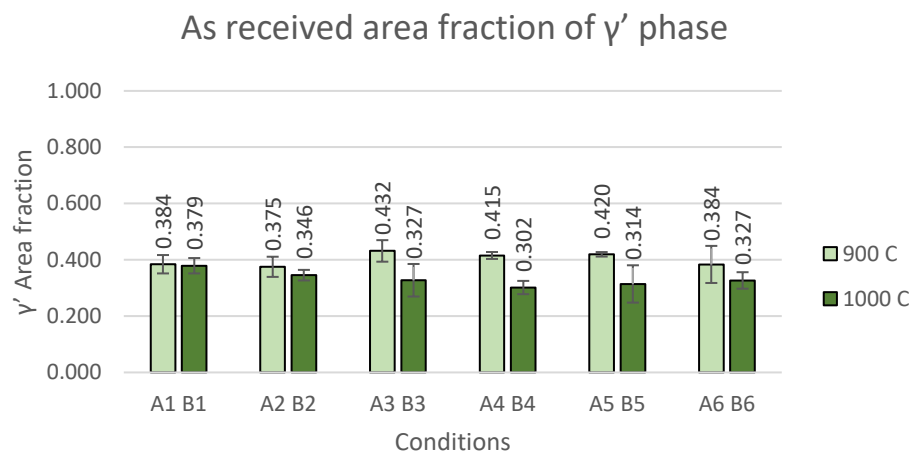


รูปที่ 0.16 ค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่ของเฟสแกมมาไพรม์ของชิ้นงานที่ได้รับมา B1 ถึง B6

กราฟในรูปที่ 4.13 ถึง 4.16 แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณโคบอลต์เพิ่มขึ้นและนิกเกิลลดลง (จากชิ้นงาน A2 ถึง A6 และชิ้นงาน B2 ถึง B6) ส่งผลให้ขนาดอนุภาคแกมมาไพรม์และสัดส่วนเชิงพื้นที่ของเฟสแกมมาไพรม์มีค่าลดลง โดยเฉพาะในกรณีของชิ้นงานที่เผาที่ 1000 องศาเซลเซียส (ชิ้นงาน B2 ถึง B6) ซึ่งเห็นได้ชัดในกราฟที่เปรียบเทียบผลการทดลองที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบขนาดอนุภาคแกมมาไพรม์และค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่ของเฟสแกมมาไพรม์ตามลำดับ



รูปที่ 0.17 ขนาดอนุภาคแกมมาไพรม์ที่ผ่านการเผาที่ 900 องศาเซลเซียสเปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส



รูปที่ 0.18 ค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่ของเฟสแกมมาไพรม์ที่ผ่านการเผาที่ 900 องศาเซลเซียสเปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.17 ที่แสดงการเปรียบเทียบขนาดอนุภาคแกมมาไพรม์ระหว่างชิ้นงานชุด A1 ถึง A6 และ ชิ้นงานชุด B1 ถึง B6 จะเห็นว่าชิ้นงานทั้งสองชุด เมื่อลดปริมาณนิกเกิลและเติมโคบอลต์ โดยพิจารณาเรียงจากชิ้นงาน A2 และ B2 ไปจนถึง A6 และ B6 ตามลำดับนั้น ขนาดของอนุภาคจะมีการลดลงจากในกราฟที่ผ่านการตรวจสอบด้วย ImageJ™ แต่โดยรวม ชุดชิ้นงานที่ผ่านการเผาเป็นเวลานานที่ 900 องศาเซลเซียส (ชิ้นงาน A1 ถึง A6) จะมีขนาดอนุภาคแกมมาไพรม์น้อยกว่าชุดที่ผ่านการเผาเป็นเวลานานที่ 1000 องศาเซลเซียส (ชิ้นงาน B1 ถึง B6) อย่างชัดเจน

ในขณะที่รูปที่ 4.18 ที่แสดงการเปรียบเทียบสัดส่วนเชิงพื้นที่ของเฟสแกมมาไพโรรมะหว่างชิ้นงานชุด A1 ถึง A6 และชิ้นงานชุด B1 ถึง B6 จะเห็นว่าผลที่ได้จากชิ้นงานทั้งสองชุด มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก โดยชุดที่ผ่านการเผาที่ 1000 องศาเซลเซียส มีค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่โดยรวมค่อนข้างต่ำกว่าชุดที่ผ่านการเผาเป็นเวลานานที่ 900 องศาเซลเซียส

ในส่วนของชิ้นงานที่ได้รับมา เมื่อได้ทำการตรวจสอบและวิเคราะห์ผลออกมาใหม่ สามารถสรุปผลการทดลองที่สำคัญได้ดังต่อไปนี้ โครงสร้างจุลภาคจากการถ่ายภาพ SEM ที่ได้รับมาหลังการเผาเป็นเวลานานที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส ดังแสดงผลในรูปที่ 4.11 และ 4.12 ของทุกชิ้นงานที่ให้เงื่อนไขของการเติมธาตุผสมที่ต่างกัน โดยพบว่าอนุภาคแกมมาไพโรรมีโครงสร้างหยาบและมีการแพร่กระจายอย่างทั่วถึง ในชิ้นงานที่ A1 ถึง A6 สามารถสรุปได้ว่าการให้ความร้อนกับอนุภาคแกมมาไพโรรมัทำให้เสียรูปร่างและมีขนาดเปลี่ยนไปจากเดิม สำหรับชิ้นงาน B1 ถึง B6 นั้นที่มีการเพิ่มอุณหภูมิเป็น 1000 องศาเซลเซียส ทำให้ขนาดอนุภาคแกมมาไพโรรมีขนาดใหญ่กว่า โดยส่วนใหญ่แล้วอนุภาคแกมมาไพโรรมักจะอยู่ในทรงกลม บางอนุภาคมีการเชื่อมติดกัน อนุภาคแกมมาไพโรรมีลักษณะการเกาะกันเป็นแพในชิ้นงาน B1 ถึง B6 ในรูปที่ 4.2 ทำให้ยืนยันได้ว่าอุณหภูมิที่สูงกว่าในการเผาเป็นระยะเวลาสั้น จะทำให้มีผลต่อการโตของแกมมาไพโรรมที่เด่นชัดมากขึ้นเมื่อเทียบกับการเผาที่อุณหภูมิต่ำกว่า

จากรูปที่ 4.17 และ 4.18 จะเห็นได้ว่าการเติมธาตุผสมโคบอลต์มากขึ้นและนิกเกิลที่ลดลง (ชิ้นงาน A2 ถึง A6 และชิ้นงาน B2 ถึง B6) ส่งผลให้ขนาดของอนุภาคแกมมาไพโรรมและค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่ของเฟสแกมมาไพโรรมลดลง โดยเฉพาะชิ้นงานที่ผ่านการเผาเป็นเวลานานที่ 1000 องศาเซลเซียส เนื่องจากโคบอลต์มีค่าคงที่การแพร่ต่ำกว่าของนิกเกิล ซึ่งจะช่วยให้ลด และ/หรือ หน่วงกระบวนการแพร่ระหว่างการตกตะกอนและการโตของอนุภาคแกมมาไพโรรม ทำให้อนุภาคแกมมาไพโรรมโตช้าลง อีกทั้งโคบอลต์ยังเป็นธาตุที่ลดอัตราการแยกตัว (partition ratio) ระหว่างอนุภาคแกมมาไพโรรมและเนื้อพื้นแกมมาของพวกธาตุโลหะทนไฟ (refractory elements) เช่น โครเมียม โมลิบดีนัม และทังสแตน โดยการละลายอนุภาคแกมมาไพโรรมบางส่วนกลับสู่เนื้อพื้น เพื่อรักษาความเสถียรของเฟสแกมมาไพโรรมขณะใช้งานที่อุณหภูมิสูงเป็นนาน ๆ [14] [15] ด้วยเหตุผลเหล่านี้ จึงทำให้ขนาดอนุภาคแกมมาไพโรรมและสัดส่วนเชิงพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพโรรมลดลง ดังรูปที่ 4.17 และ 4.18 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผา

นอกจากนี้การลดลงของธาตุผสมนิกเกิลแสดงให้เห็นถึงขนาดของอนุภาคแกมมาไพโรรมที่เล็กลง รวมถึงค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่ของเฟสแกมมาไพโรรมที่ลดลง รวมทั้งการลดลงของการก่อตัวของอนุภาคแกมมาไพโรรม เป็นที่สังเกตว่าการใส่อะลูมิเนียมมีผลต่อการเพิ่มขนาดของอนุภาคแกมมาไพโรรมให้ใหญ่ขึ้นและเพิ่มสัดส่วนเชิงพื้นที่ของแกมมาไพโรรม อีกทั้งยังเพิ่มการก่อตัวของอนุภาคแกมมาไพโรรม นั้นทำให้ชิ้นงาน A2 ถึง A3 และชิ้นงาน B2 ถึง B4 ที่มีอะลูมิเนียมสูงขึ้นไป มีอนุภาคของแกมมาไพโรรมที่โตง่าย

กว่า และมีขนาดใหญ่กว่าเมื่อเทียบกับชิ้นงาน A1 และ B1 อย่างไรก็ตามผลการทดลองในชิ้นงาน A2 และ B2 ที่มีการเติมอะลูมิเนียมและปริมาณนิกเกิลสูงสุด แสดงให้เห็นถึงผลของการก่อตัวของอนุภาคแกมมาไพรม์หยาบที่มีมากกว่า และผลกระทบต่อการก่อตัวของอนุภาคแกมมาไพรม์จะลดลงเมื่อลดปริมาณนิกเกิล จึงทำให้อนุภาคแกมมาไพรม์ในชิ้นงาน A2 และ B2 สามารถก่อตัวและมีขนาดใหญ่กว่าชิ้นงานอื่น ๆ รวมทั้งการที่ในชิ้นงาน A มีค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่ของเฟสแกมมาไพรม์ที่มีมากกว่าในชิ้นงาน B ดังแสดงในรูปที่ 4.17 และ 4.18

การเปรียบเทียบขนาดของอนุภาคแกมมาไพรม์ในรูปที่ 4.17 ของชิ้นงานที่ผ่านการเผาเป็นเวลานานที่ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส ขนาดชิ้นงานที่ผ่านการเผาเป็นเวลานานที่ 1000 องศาเซลเซียส จะมีขนาดใหญ่กว่าอย่างชัดเจน เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่เผาเป็นเวลานานที่ 900 องศาเซลเซียสในทุก ๆ ชิ้นงาน เหตุผลมาจากการที่ทำการจำลองการเผาเป็นเวลานานที่อุณหภูมิต่างกัน ที่อุณหภูมิต่ำกว่า จะเกิดการแพร่ช้ากว่า ปัจจัยนี้จะทำให้โครงสร้างเสถียรมากขึ้น การขยายตัวของอนุภาคแกมมาไพรม์เกิดช้าลง ขนาดของอนุภาคในชิ้นงานที่เผาเป็นเวลานานที่ 900 องศาเซลเซียส จึงมีขนาดเล็กกว่าอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ถูกเผานานที่ 1000 องศาเซลเซียส ตามทฤษฎีของสมการ Arrhenius ที่อธิบายผลของอุณหภูมิต่อการแพร่ของอนุภาคแกมมาไพรม์ในเนื้อพื้นแกมมา ดังสมการที่ 4.1

$$D = D_0 \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (4.1)$$

D = Diffusion coefficient

D_0 = Diffusion constant

Q = Activation energy for diffusion

R = Gas constant

T = Temperature

จากสมการที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าสัมประสิทธิ์การแพร่กับอุณหภูมิมีความสัมพันธ์แบบ exponential แสดงดังสมการที่ 4.2

$$D \propto \exp(T) \quad (4.2)$$

จากสมการที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ทำการเผาเป็นเวลานานเพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้การแพร่เพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกัน นอกจากนี้ยังมีผลจากโคบอลต์ที่เพิ่มขึ้น จะช่วยให้เกิดการแพร่ลดลง เพราะโคบอลต์เป็นธาตุที่เพิ่มความเสถียรชิ้นงานและเกิดการลดอัตราการโตของแกมมาไพรม์อย่างชัดเจน ทำให้อนุภาคแกมมาไพรม์ในชิ้นงานที่มีปริมาณโคบอลต์มากจะมีขนาดเล็กลงด้วย

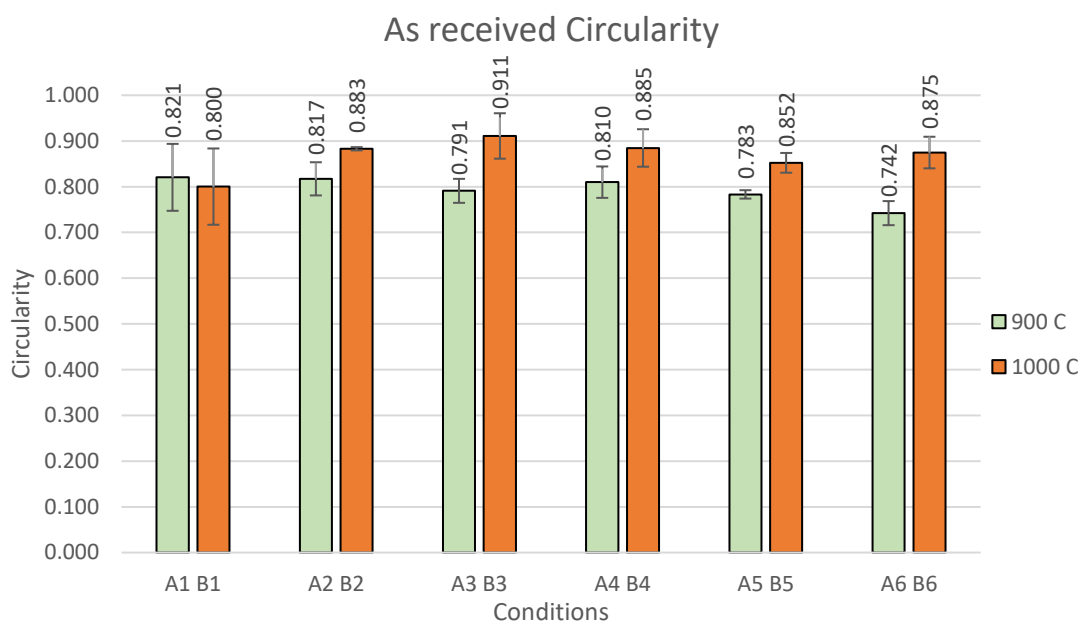
การเปรียบเทียบค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่ของแกมมาไพรม์ในรูปที่ 4.18 ของชิ้นงานที่ผ่านการเผาเป็นเวลานานที่ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส การที่ในชิ้นงานซึ่งเผามาเป็นเวลานาน มีค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่ของแกมมาไพรม์ของที่ 1000 องศาเซลเซียส ต่ำกว่าที่ 900 องศาเซลเซียส ในทุกชิ้นงาน อาจเกิดขึ้นได้ เนื่องจากผลของ Ostwald ripening ซึ่งกล่าวถึงเป้าหมายหลักในการรักษาสมดุลของระบบโดยการลดพลังงานพื้นผิว (Surface Energy) ซึ่งการใช้งานที่อุณหภูมิสูงขึ้น จะทำให้พลังงานในระบบไม่เสถียร เพื่อเป็นการรักษาสมดุลของระบบ ระบบจึงลดพลังงานโดยที่อนุภาคแกมมาไพรม์ขนาดเล็กจะสลายตัวกลับสู่นิวพื้นแกมมา แล้วอะตอมเหล่านี้จะแพร่ไปรวมกับอนุภาคแกมมาไพรม์ขนาดใหญ่ ทำให้อนุภาคแกมมาไพรม์มีขนาดใหญ่มากขึ้น ดังในรูปที่ 4.19 และเมื่ออนุภาคแกมมาไพรม์โตจนกระทั่งมีขนาดใหญ่มากเกินไป อนุภาคแกมมาไพรม์บางส่วนจะละลายกลับสู่นิวพื้นแกมมา เพื่อรักษาความเสถียรของระบบไว้ ทั้งหมดนี้ทำให้ค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่ลดลง ดังนั้นเมื่อใช้ที่อุณหภูมิสูงกว่า ค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่ของแกมมาไพรม์จึงอาจมีค่าที่ต่ำกว่าได้



รูปที่ 0.19 กลไกของ Ostwald ripening [13]

จากรูปที่ 4.20 ซึ่งแสดงค่าความกลมของชิ้นงาน A1 ถึง A6 และชิ้นงาน B1 ถึง B6 หลังจากผ่านการเผาเป็นเวลานาน พบว่ามีรูปร่างกลมมากขึ้น เมื่ออุณหภูมิการเผาสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบผลของการเติมธาตุผสมต่อค่าความกลมของอนุภาคแกมมาไพรม์ พบว่าทั้งชิ้นงานชุด A และ ชุด B มีค่าความกลมใกล้เคียงกัน จากภาพ SEM จะเห็นคล้ายว่า แนวโน้มจากชิ้นงาน A1 ถึง A6 และ B1 ถึง B6 จะมีรูปร่างค่อนข้างกลมมากขึ้นและเหล็มน้อยลง แต่จากค่าที่ได้จาก image analysis ดังแสดงในกราฟ แสดงให้เห็นว่าค่าที่ได้มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ชิ้นงานที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า (1000 องศาเซลเซียส) จะมีค่าความกลมอนุภาคแกมมาไพรม์มากกว่าในทุกชิ้นงาน เพื่อเป็นการรักษาสมดุลระบบ จึงต้องลดค่าพลังงานผิว (surface energy) ตาม Ostwald Ripening ค่าความกลมของ

อนุภาคแกมมาไพรม์ลดลง เพราะพยายามรักษาการเปลี่ยนรูปร่างจากลูกบาศก์เป็นทรงกลมให้ช้าลง กล่าวคือลดอัตราการใช้ของอนุภาคแกมมาไพรม์

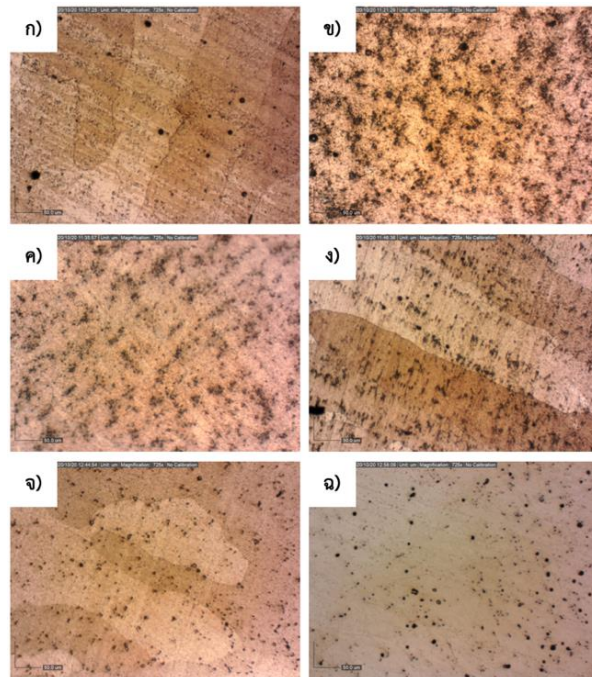


รูปที่ 0.20 ค่าความกลมของอนุภาคแกมมาไพรม์ที่ผ่านการเผาที่ 900 องศาเซลเซียสเปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส

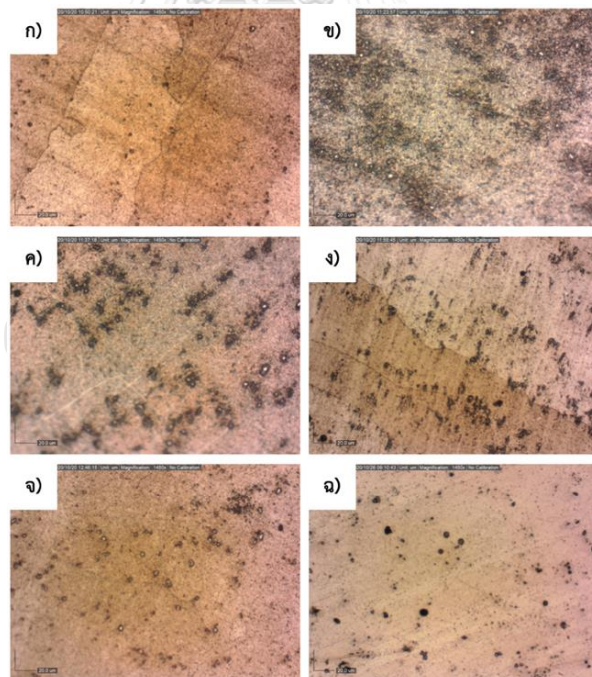
4.1.3 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการทำละลาย (Solutioning)

นำชิ้นงานที่ได้รับไปเผาที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง โดยปกติแล้วกระบวนการนี้ควรทำให้อนุภาคแกมมาไพรม์ ละลายกลับเข้าไปในเนื้อพื้นแกมมา แต่จากการนำชิ้นงานไปเผาแล้วนำมาวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค พบว่าอนุภาคแกมมาไพรม์ละลายกลับเข้าไปในเนื้อพื้นไม่หมด สามารถสังเกตเห็นได้จากรูป OM และ SEM ดังแสดงในรูปที่ 4.21-4.28 และ 4.29-4.30 ตามลำดับ

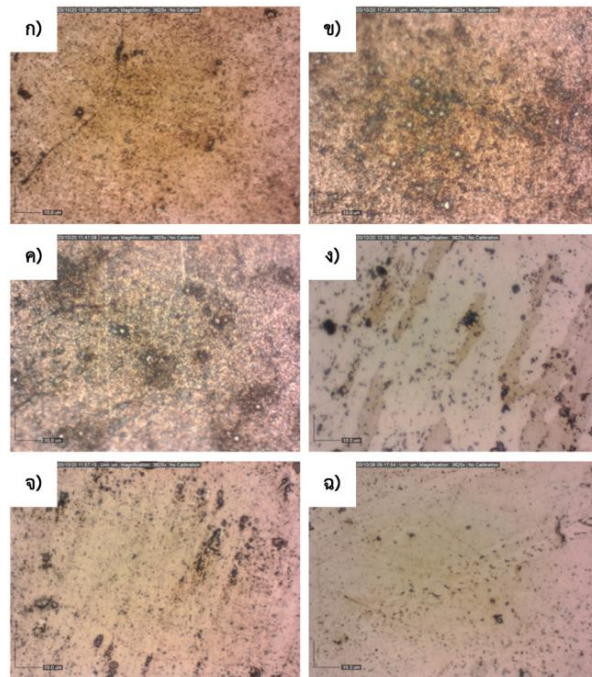
จากรูปที่ 4.21 ถึง 4.24 ที่เป็นภาพ OM ของชิ้นงานชุด A และรูปที่ 4.25 ถึง 4.28 ที่เป็นภาพ OM ของชิ้นงานชุด B พบว่าอนุภาคแกมมาไพรม์เป็นสีเข้มและเนื้อพื้นแกมมาเป็นสีอ่อน ซึ่งในชิ้นงาน A ก็ไม่ค่อยเห็นความต่างจากชิ้นงาน B มากนัก เพราะกำลังขยายต่ำเกินไป อีกทั้งยังไม่ได้ต่างกันมากนัก เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ได้รับมา (As received)



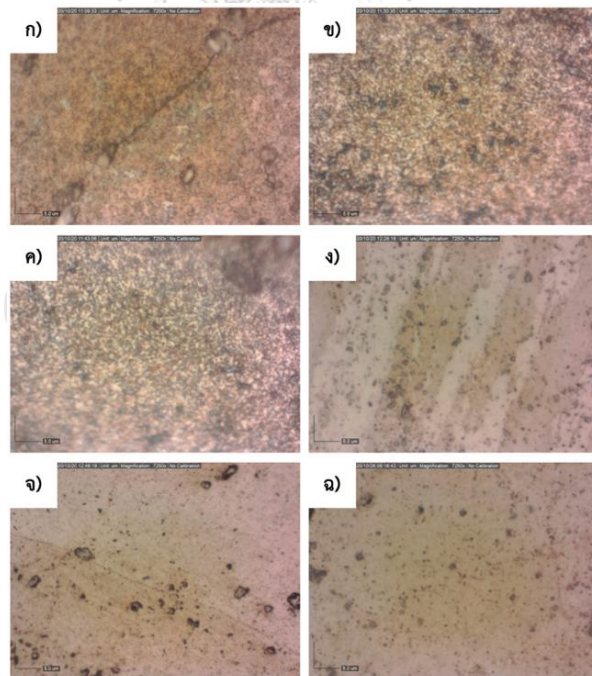
รูปที่ 0.21 ภาพ OM ของชิ้นงานที่ผ่านการทำละลาย A1 ถึง A6 ที่กำลังขยาย 725 เท่า โดยที่ ก) A1, ข) A2, ค) A3, ง) A4, จ) A5 และ ฉ) A6



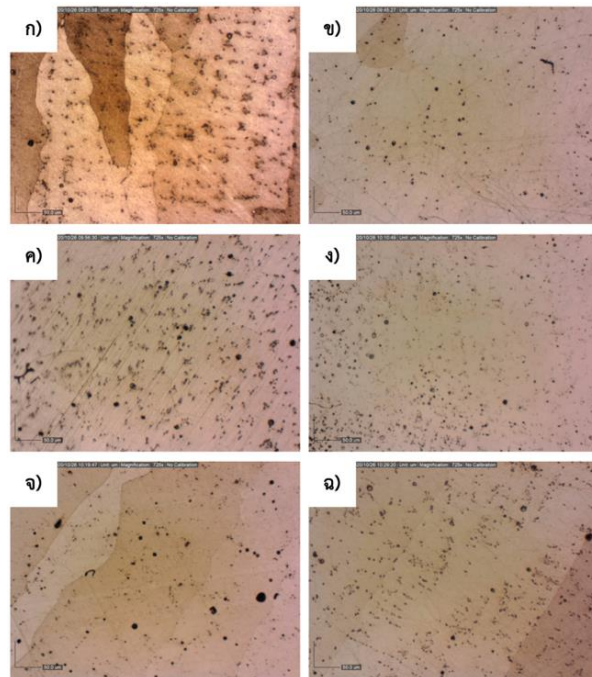
รูปที่ 0.22 ภาพ OM ของชิ้นงานที่ผ่านการทำละลาย A1 ถึง A6 ที่กำลังขยาย 1450 เท่า โดยที่ ก) A1, ข) A2, ค) A3, ง) A4, จ) A5 และ ฉ) A6



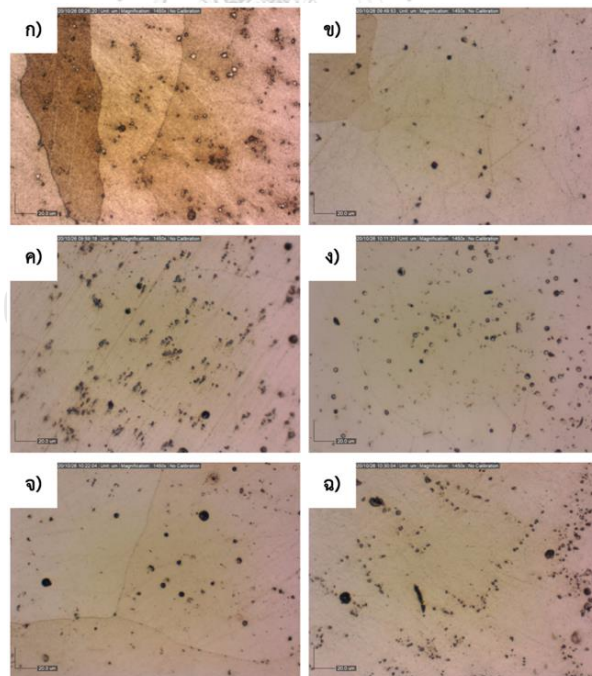
รูปที่ 0.23 ภาพ OM ของชิ้นงานที่ผ่านการทำละลาย A1 ถึง A6 ที่กำลังขยาย 3625 เท่า โดยที่ ก) A1, ข) A2, ค) A3, ง) A4, จ) A5 และ ฉ) A6



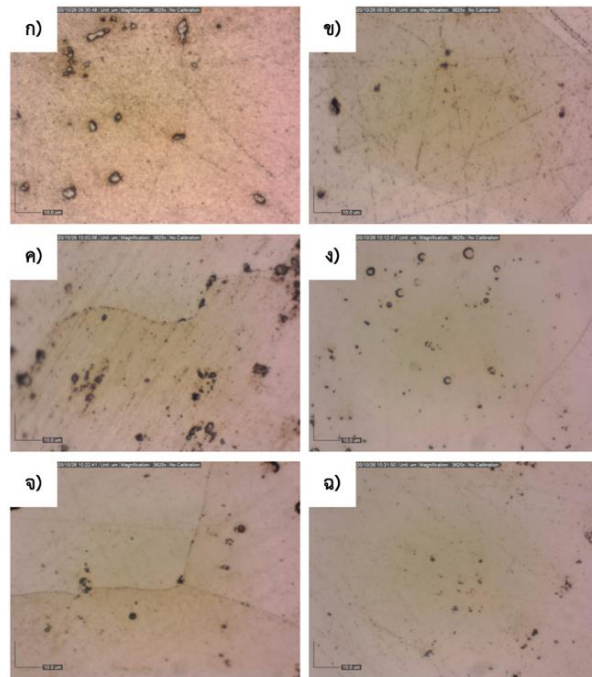
รูปที่ 0.24 ภาพ OM ของชิ้นงานที่ผ่านการทำละลาย A1 ถึง A6 ที่กำลังขยาย 7250 เท่า โดยที่ ก) A1, ข) A2, ค) A3, ง) A4, จ) A5 และ ฉ) A6



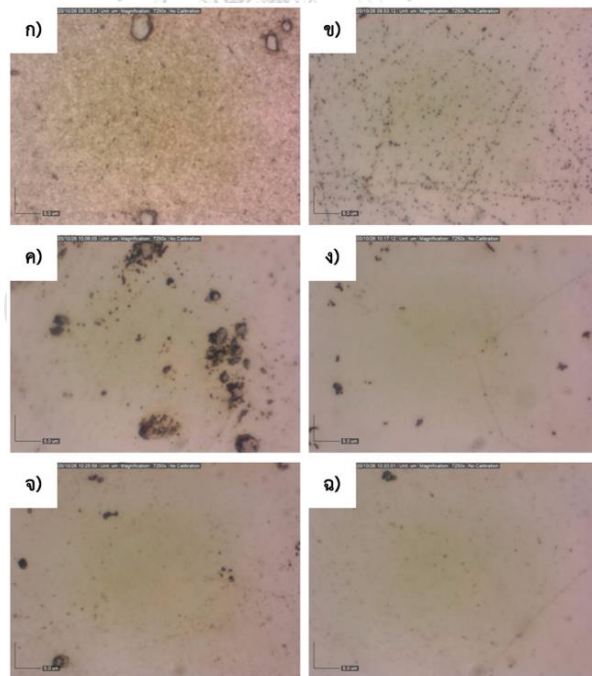
รูปที่ 0.25 ภาพ OM ของชิ้นงานที่ผ่านการทำละลาย B1 ถึง B6 ที่กำลังขยาย 725 เท่า โดยที่ ก) B1, ข) B2, ค) B3, ง) B4, จ) B5 และ ฉ) B6



รูปที่ 0.26 ภาพ OM ของชิ้นงานที่ผ่านการทำละลาย B1 ถึง B6 ที่กำลังขยาย 1450 เท่า โดยที่ ก) B1, ข) B2, ค) B3, ง) B4, จ) B5 และ ฉ) B6

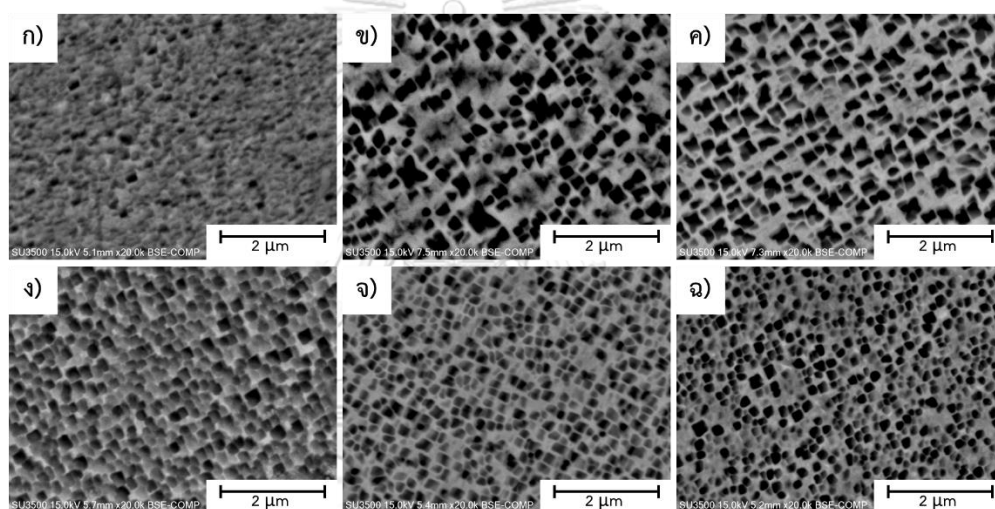


รูปที่ 0.27 ภาพ OM ของชิ้นงานที่ผ่านการทำละลาย B1 ถึง B6 ที่กำลังขยาย 3625 เท่า โดยที่ ก) B1, ข) B2, ค) B3, ง) B4, จ) B5 และ ฉ) B6

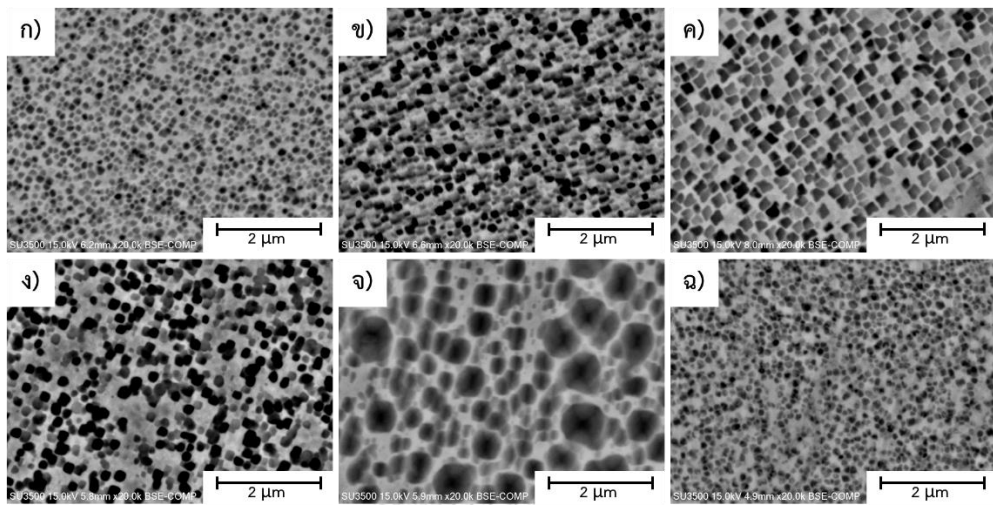


รูปที่ 0.28 ภาพ OM ของชิ้นงานที่ผ่านการทำละลาย B1 ถึง B6 ที่กำลังขยาย 7250 เท่า โดยที่ ก) B1, ข) B2, ค) B3, ง) B4, จ) B5 และ ฉ) B6

จากการสังเกตภาพ SEM จากรูป 4.29 และ 4.30 จะเห็นโดยรวมว่าลักษณะรูปร่างและขนาดอนุภาคแกมมาไพรม์มีความแตกต่างไปจากชิ้นงานก่อนการทำละลายมาก โดยชิ้นงานที่ผ่านการเผาเป็นเวลานานที่ 900 องศาเซลเซียส ตั้งแต่ชิ้นงานที่ A2 ถึง A5 มีลักษณะของแกมมาไพรม์ที่ค่อนข้างเป็นทรงลูกบาศก์มากขึ้น และมีการละลายกลับเนื้อพื้นน้อยกว่าที่ควรจะเป็น มีรูปร่างที่ไม่ต้องการใน A2 เนื่องจากใหญ่กว่าปกติแบบไม่สม่ำเสมอ และ A4 ที่มีความหนาแน่นของอนุภาคผิดปกติ ในส่วนของชิ้นงานที่ผ่านการเผาเป็นเวลานานที่ 1000 องศาเซลเซียส ตั้งแต่ชิ้นงานที่ B1 ถึง B6 ยกเว้น B5 มีรูปร่างเป็นทรงกลมขนาดเล็กและมีการกระจายตัวสม่ำเสมอ โดยรวมอนุภาคแกมมาไพรม์มีขนาดเล็กกว่าชิ้นงานที่ผ่านการเผาเป็นเวลานานที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ยกเว้นชิ้นงาน B5 ซึ่งมีความผิดปกติของอนุภาคที่ทำให้ใหญ่มากกว่าปกติ จับตัวเป็นก้อน ๆ และกระจายไม่สม่ำเสมอ

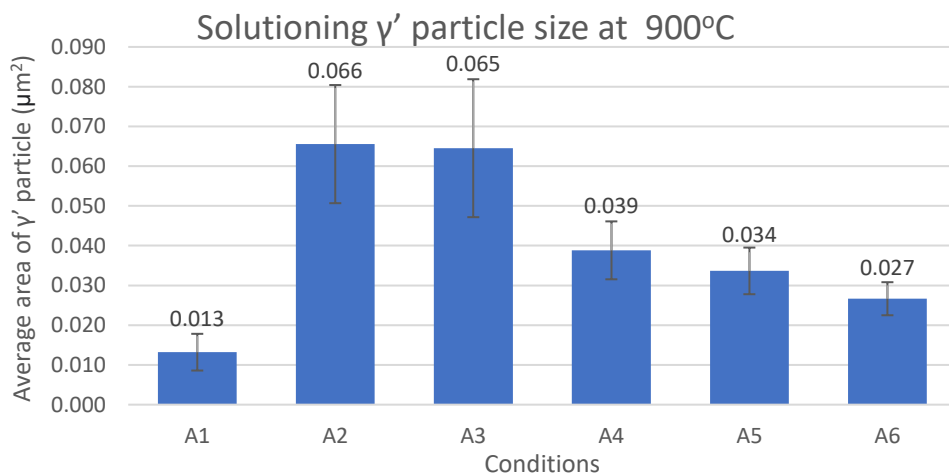


รูปที่ 0.29 ภาพโครงสร้างจุลภาคจากการถ่ายภาพ SEM ของชิ้นงาน A1 ถึง A6 กำลังขยาย 20000 เท่า เผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส มาผ่านกระบวนการทำละลาย โดยที่ ก) A1, ข) A2, ค) A3, ง) A4, จ) A5 และ ฉ) A6



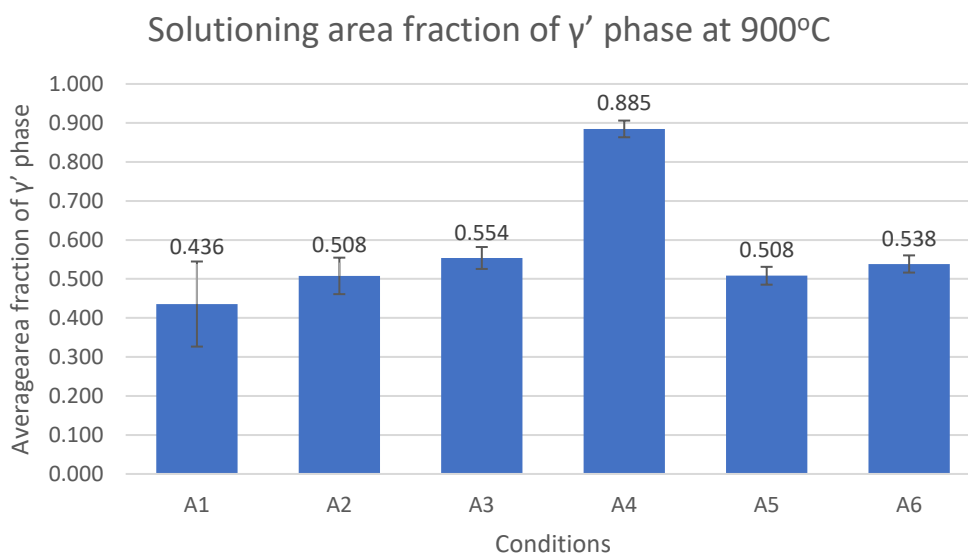
รูปที่ 0.30 ภาพโครงสร้างจุลภาคจากการถ่ายภาพ SEM ของชิ้นงาน B1 ถึง B6 กำลังขยาย 20000 เท่า เหนือที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส มาผ่านกระบวนการทำละลาย โดยที่ ก) B1, ข) B2, ค) B3, ง) B4, จ) B5 และ ฉ) B6

รูปที่ 4.31 จะเห็นผลของธาตุผสมอะลูมิเนียมได้ชัดเจนมากจากการเทียบชิ้นงาน A1 กับชิ้นงานอื่น ๆ จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณอะลูมิเนียมซึ่งตามทางทฤษฎีแล้ว จะทำให้ค่าอุณหภูมิโซลิวชันของแกมมาไพรม์เพิ่มขึ้นอย่างมาก ทำให้อนุภาคแกมมาไพรม์ในชิ้นงานที่ A2 ถึง A6 ยังไม่สามารถละลายกลับไป ในเนื้อพื้นได้ และยังทำให้พบว่าอนุภาคแกมมาไพรม์มีขนาดใหญ่ขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับ ชิ้นงาน A1 ที่ไม่ได้เติมอะลูมิเนียม 1 % เมื่อเทียบแนวโน้มโดยรวมของชิ้นงาน A2 ถึง A6 พบว่ากราฟ มีค่าลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณของนิกเกิลลดลงหรือโคบอลต์เพิ่มขึ้นจะทำให้ขนาดอนุภาค แกมมาไพรม์มีขนาดเล็กลง



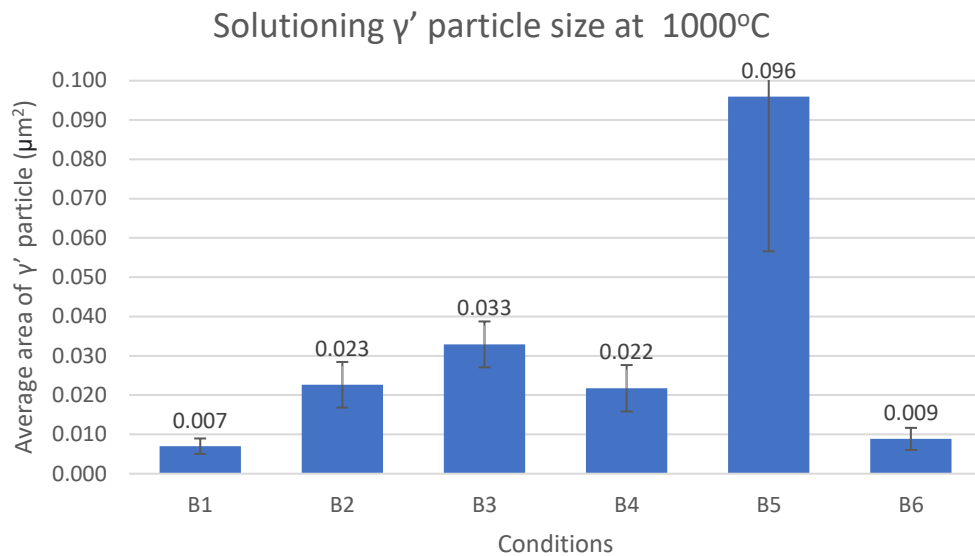
รูปที่ 0.31 ขนาดแกมมาไพรม์เฉลี่ยของชิ้นงานที่ผ่านการทำละลาย A1 ถึง A6

รูปที่ 4.32 เป็นการแสดงค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่ของแกมมาไพรม์ของชิ้นงาน A1 ถึง A6 ที่ผ่านการทำละลาย ซึ่งพบว่าไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจนจากการเติมธาตุ นิกเกิล และ โคบอลต์ ต่อค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่ของแกมมาไพรม์ ถ้าไม่พิจารณาชิ้นงาน A4 ที่มีความหนาแน่นของอนุภาคแกมมาไพรม์มากกว่าปกติ และเห็นได้ว่าค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่ที่สูงสุด ในขณะที่ชิ้นงาน A1 ละลายแกมมาไพรม์กลับเนื้อพื้นได้มากที่สุด ชิ้นงานอื่นโดยรวมพอจะละลายแกมมาไพรม์กลับได้บ้างเพียงเล็กน้อย จึงยังมีปริมาณแกมมาไพรม์เหลือมากพอที่จะเห็นค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรใกล้เคียงกันและมากกว่าของชิ้นงาน A1 นอกจากนี้ในส่วน of ชิ้นงานที่มีการเติมอะลูมิเนียม ยังคงมีผลจากการเติมอะลูมิเนียมอยู่คือ เพิ่มค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่ของแกมมาไพรม์ให้มากขึ้น มากกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้เติมธาตุผสม



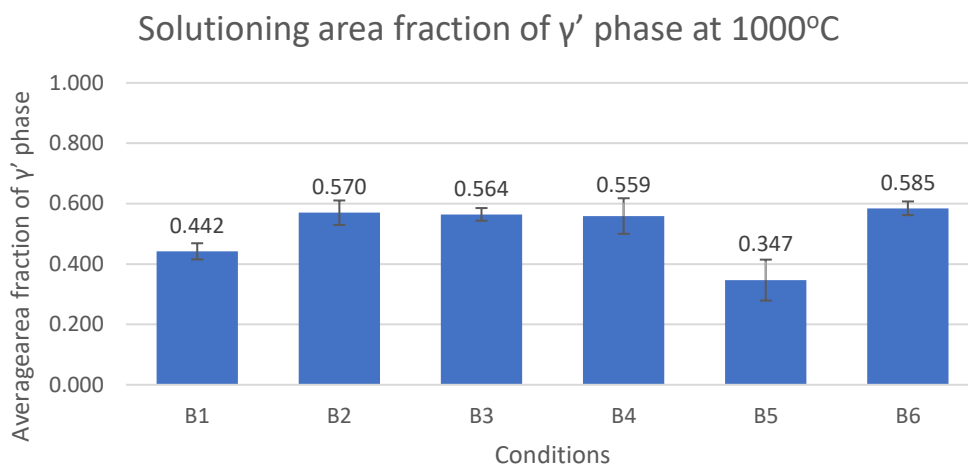
รูปที่ 0.32 ค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่ของเฟสแกมมาไพรม์ของชิ้นงานที่ผ่านการทำละลาย A1 ถึง A6

รูปที่ 4.33 ที่แสดงผลของธาตุผสมที่เติมลงไปต่อขนาดอนุภาคแกมมาไพรม์ ยังคงเห็นผลจากการเติมอะลูมิเนียมในชิ้นงาน B1 เมื่อเทียบกับ B2 ถึง B6 คือเมื่อเติมอะลูมิเนียมแล้วค่าเฉลี่ยขนาดอนุภาคแกมมาไพรม์จะใหญ่ขึ้น ถ้าดูแค่ B3, B4 และ B6 ก็จะเป็นแนวโน้มธาตุผสมคล้ายกราฟอื่น แต่ก็สรุปแน่นอนไม่ได้ ควรถ่ายภาพ SEM ให้มีจำนวนที่มากขึ้นเพื่อนำมาวิเคราะห์เพิ่มเติม อาจทำให้เห็นผลจากการเติมนิกเกิลและโคบอลต์ชัดเจนขึ้นคือ มีความเป็นไปได้ว่า ขนาดอนุภาคแกมมาไพรม์จะมีขนาดลดลงเมื่อลดปริมาณนิกเกิลหรือเพิ่มปริมาณโคบอลต์ ยกเว้นชิ้นงาน B5 ที่มีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคแกมมาไพรม์ในชิ้นงานอื่น ๆ มาก ซึ่งเห็นได้ตั้งแต่ในภาพ SEM รูปที่ 4.30 โดยจะส่งผลให้กราฟขนาดแกมมาไพรม์ของ B5 สูงกว่าปกติมาก



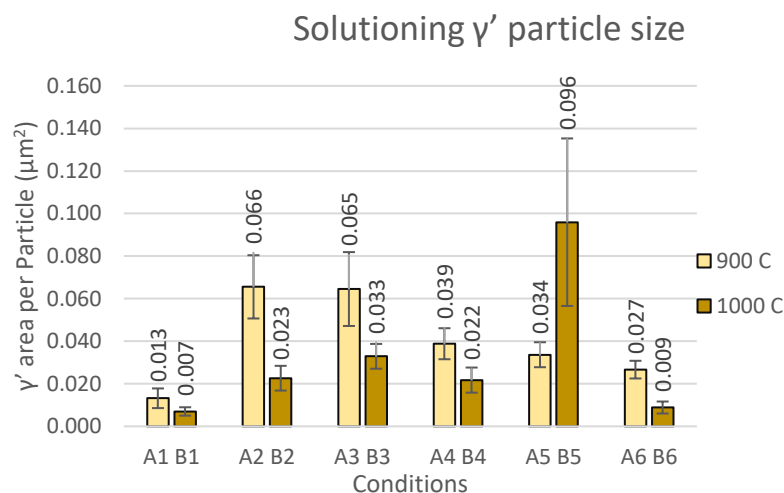
รูปที่ 0.33 ขนาดแกมมาไพรม์เฉลี่ยของชิ้นงานที่ผ่านการทำละลาย B1 ถึง B6

รูปที่ 4.34 แสดงค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่ของเฟสแกมมาไพรม์ที่เห็นได้ว่ามีค่าใกล้เคียงกัน ยกเว้นชิ้นงาน B5 ที่มีค่าน้อยกว่าชิ้นงานอื่น ๆ ซึ่งมีค่าเพียง 0.374 เนื่องจากถ้าขนาดอนุภาคแกมมาไพรม์ใหญ่ จะส่งผลให้ค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่ของแกมมาไพรม์เล็กลง เพราะการที่แกมมาไพรม์ไปเกาะรวมกันเป็นก้อนมาก ๆ จะทำให้เหลือเนื้อที่ของเนื้อพื้นแกมมาเพิ่ม ส่วนการเพิ่มอะลูมิเนียมนั้น ถ้าไม่นับชิ้นงาน B5 ที่ค่าจะต่ำกว่าปกติ จะเห็นว่าการเติมอะลูมิเนียม 1% มีผลให้ค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่ของแกมมาไพรม์มีค่าเพิ่มขึ้น แต่สำหรับธาตุผสมนิกเกิลและโคบอลต์ ไม่มีผลที่ชัดเจนต่อค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่ของเฟสแกมมาไพรม์



รูปที่ 0.34 ค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่ของเฟสแกมมาไพรม์ของชิ้นงานที่ผ่านการทำละลาย B1 ถึง B6

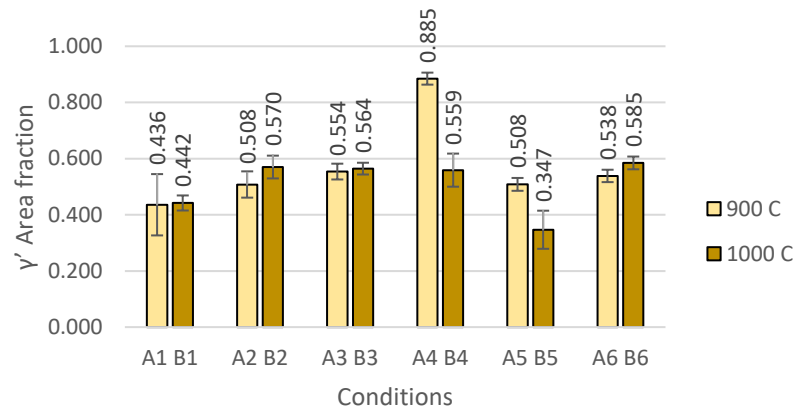
ในส่วนของชิ้นงานที่ได้ผ่านการทำละลายและได้ทำการตรวจสอบและวิเคราะห์ผลแล้ว สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้ จากรูปที่ 4.29 และ 4.30 ที่ได้จากการถ่าย SEM เป็นชิ้นงานที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงแตกต่างกันเป็นเวลานาน และได้ทำการละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากผลลัพธ์ทั้งหมดพบว่าการทำละลายสามารถช่วยละลายอนุภาคแกมมาไพรม์หยาบบางส่วนลงในเนื้อพื้นได้ แกมมาไพรม์มีความละเอียดมากขึ้นทำให้ขนาดเล็กลง และมีค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่ลดลง โดยเฉพาะในชิ้นงาน A1 และ B1 ที่ไม่ได้มีการเติมธาตุอะลูมิเนียมเพิ่มลงไป สำหรับในชิ้นงานอื่นพบว่าการละลายกลับเนื้อพื้นน้อยกว่าที่ควร ดังแสดงในรูปที่ 4.35 และ 4.36 ทำให้เห็นว่าโครงสร้างจุลภาคของทั้งกลุ่มแรกและกลุ่มที่สอง ที่ผ่านการทำละลายในอุณหภูมิที่ได้เลือกมานี้ ส่งผลต่อการทำละลายและให้ลักษณะของอนุภาคแกมมาไพรม์ที่ได้ไม่ดีมากพอ และมีความใกล้เคียงน้อยเมื่อเทียบของชิ้นงานเริ่มต้นหลังการทำการรวมวิธีทางความร้อนในงานวิจัยก่อนหน้านี้ [13] โดยสรุป การทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมงนั้น อุณหภูมิมีค่าสูงไม่เพียงพอต่อการละลายอนุภาคแกมมาไพรม์หยาบกลับเข้าไปในเนื้อพื้น ให้มีขนาดเล็กลงและแพร่กระจายอย่างเป็นระเบียบ ในกรณีส่วนใหญ่ รูปร่างของอนุภาคแกมมาไพรม์หยาบที่ผ่านการเผาเป็นเวลานานทั้งสองอุณหภูมิดังกล่าว จะเปลี่ยนรูปร่างจากทรงกลมไปเป็นทรงลูกบาศก์มากขึ้น ดังที่เห็นในค่าความกลมในรูปที่ 4.37



รูปที่ 0.35 ขนาดอนุภาคแกมมาไพรม์ที่ผ่านการเผาที่ 900 องศาเซลเซียสเปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.35 ค่าขนาดอนุภาคโดยรวม อนุภาคแกมมาไพรม์ที่ผ่านการเผาที่ 1000 องศาเซลเซียส จะเล็กกว่าที่อนุภาคแกมมาไพรม์ที่ผ่านการเผาที่ 900 องศาเซลเซียส หากไม่นับชิ้นงาน B5 โดยเป็นผลจากธาตุผสมอะลูมิเนียมที่ช่วยเพิ่มขนาดแกมมาไพรม์เป็นหลัก สำหรับธาตุ निकเกิลและโคบอลต์ยังคงส่งผลปกติคือ ทำให้กราฟขนาดของอนุภาคมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณ निकเกิลที่ลดลงและโคบอลต์ที่มากขึ้น สำหรับชิ้นงานที่ผ่านการเผาที่ 900 องศาเซลเซียส แกมมาไพรม์จะโตช้าและเสถียร เพราะมีการแพร่ช้ากว่า กล่าวคือทำให้มีขนาดใหญ่กว่าชิ้นงานที่ผ่านการเผาที่ 1000 องศาเซลเซียส ตามสมการของ Arrhenius equation ดังสมการที่ 4.1 อนุภาคแกมมาไพรม์ของชิ้นงานที่ผ่านการเผาที่ 1000 องศาเซลเซียสจะแพร่กลับเนื้อพื้นได้มากกว่าเพราะใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่า ฤกษ์ละลายมากกว่า จึงน่าจะกระจายตัวกลับเนื้อพื้นได้มากกว่า

Solutioning area fraction of γ' phase

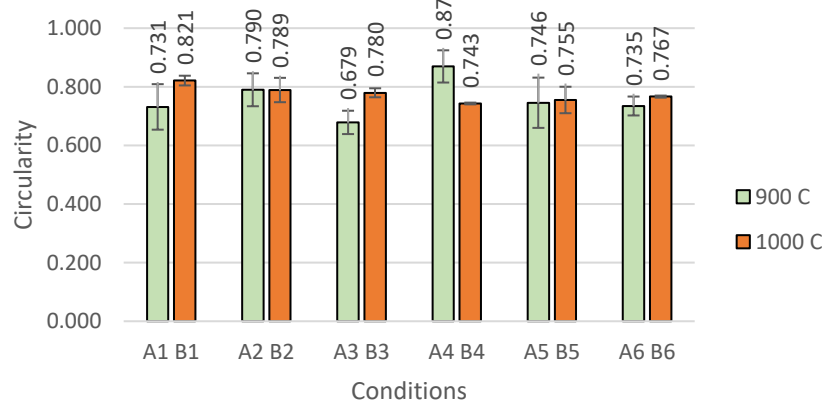


รูปที่ 0.36 ค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่ของเฟสแกมมาไพร์มที่ผ่านการเผาที่ 900 องศาเซลเซียสเปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.36 ค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่ของชิ้นงานทั้งสองกลุ่มไม่มีแนวโน้มเกี่ยวกับผลของการเติมธาตุผสมต่าง ๆ ที่ชัดเจนมากนัก แต่หากพิจารณาโดยละเอียด จะพบว่าชิ้นงาน 4 ชิ้น จาก 6 ชิ้นที่พอจะมีแนวโน้ม คือชิ้นงานที่ 1, 2, 3 และ 6 โดยที่ไม่นับชิ้นงานที่ 4 และ 5 ชิ้นงานที่ผ่านการเผาที่ 1000 องศาเซลเซียสจะมีค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่ของแกมมาไพร์มมากกว่าชิ้นงานที่ผ่านการเผาที่ 900 องศาเซลเซียส เนื่องจากที่ 1000 องศาเซลเซียส มีขนาดอนุภาคแกมมาไพร์มน้อยกว่า จึงกระจายทั่วจนมีสัดส่วนเชิงพื้นที่ของแกมมาไพร์มมากกว่า นอกจากนี้ ยังมีผลของอะลูมิเนียมที่ช่วยเพิ่มการตกตะกอนของอนุภาคแกมมาไพร์มยิ่งขึ้นในกรณีของชิ้นงานชุดที่ห้า (ชิ้นงาน A5 และ B5)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Solutioning Circularity



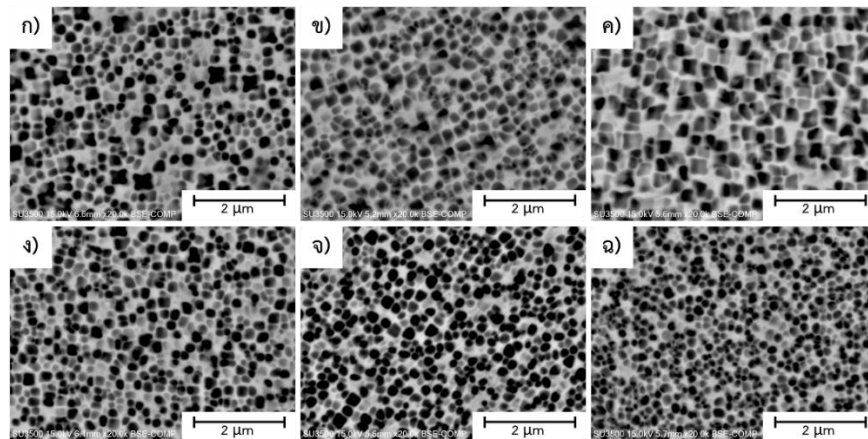
รูปที่ 0.37 ค่าความกลมของอนุภาคแกมมาไพร์มที่ผ่านการเผาที่ 900 องศาเซลเซียสเปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส

นอกจากนี้ยังเห็นได้ว่าภายหลังการทำละลาย ขนาดของอนุภาคแกมมาไพโรมในชิ้นงาน A1 ถึง A6 นั้นสูงกว่า B1 ถึง B6 ดังในรูปที่ 4.35 นั้นอาจเกี่ยวกับการเผาเป็นระยะเวลาานานที่ 900 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดการแพร่ของอนุภาคช้ากว่าและมีการโตของอนุภาคแกมมาไพโรมลดลง นั้นเพราะมีอัตราการโตของอนุภาคแกมมาไพโรมต่ำกว่า เมื่อเทียบกับการโตอย่างรวดเร็วของอนุภาคแกมมาไพโรมหยาบภายใต้อุณหภูมิการเผาที่สูงกว่า (1000 องศาเซลเซียส) การมีองค์ประกอบทางเคมีที่อาจจะแตกต่างกันของอนุภาคแกมมาไพโรมภายใต้อุณหภูมิที่ใช้ต่างกัน อาจส่งผลที่แตกต่างกันในด้านความเสถียรของเฟสแกมมาไพโรม นั้นทำให้การโตของอนุภาคแกมมาไพโรมที่มีเฟสคงที่มากกว่าจะละลายกลับในกระบวนการทำละลายน้อยกว่า นำไปสู่ขนาดที่ใหญ่กว่าของอนุภาคแกมมาไพโรม เมื่อเปรียบเทียบกับการทำละลายของชิ้นงานที่ผ่านการเผาเป็นเวลานานที่อุณหภูมิสูงกว่า

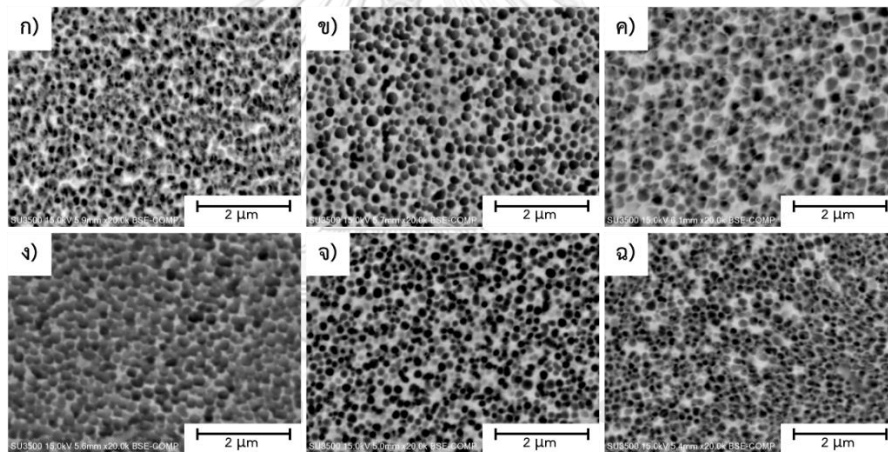
จากรูปที่ 4.37 มีชิ้นงานที่ให้ค่าแปลกไปจากที่ควรจะเป็นของชิ้นงาน A3 และ A4 แต่ถึงจะไม่นับชิ้นงาน 2 อันนี้ ข้อสรุปจากแนวโน้มกราฟก็ยังขัดกับค่าขนาดอนุภาคแกมมาไพโรมและค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่ของแกมมาไพโรม ซึ่งขัดกันกับข้อมูลที่ได้จากรูปที่ 4.35 และ 4.36 อยู่ดี โดยรวมจึงสรุปแนวโน้มจากกราฟได้ไม่มาก

4.1.4 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็ง (Aging)

การบ่มแข็งคือการนำชิ้นงานมาเผาที่ 845 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดการตกตะกอนของอนุภาคแกมมาไพโรมในเนื้อพื้นแกมมามากขึ้น เมื่อพิจารณารูป SEM ดังแสดงในรูปที่ 4.38 และ 4.39 พบอนุภาคแกมมาไพโรมที่กระจายค่อนข้างสม่ำเสมอมากขึ้น และชิ้นงานโดยรวมมีอนุภาคแกมมาไพโรมกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอมากขึ้นกว่าชิ้นงานในขั้นตอนการทำละลายแบบค่อนข้างชัดเจน



รูปที่ 0.38 ภาพโครงสร้างจุลภาคจากการถ่ายภาพ SEM ของชิ้นงาน A1 ถึง A6 กำลังขยาย 20000 เท่า เเผที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส มาผ่านกระบวนการบ่มแข็ง โดยที่ ก) A1, ข) A2, ค) A3, ง) A4, จ) A5 และ ฉ) A6

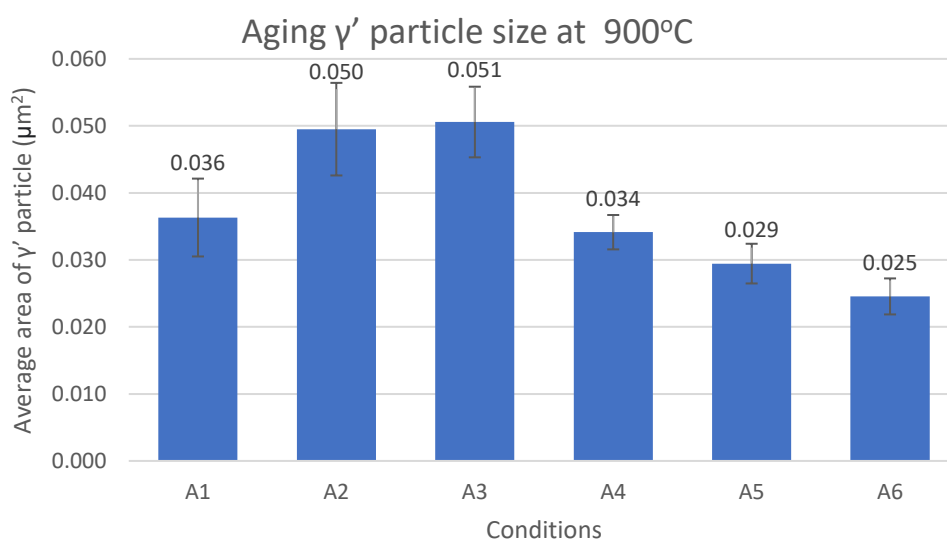


รูปที่ 0.39 ภาพโครงสร้างจุลภาคจากการถ่ายภาพ SEM ของชิ้นงาน B1 ถึง B6 กำลังขยาย 20000 เท่า เเผที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส มาผ่านกระบวนการบ่มแข็ง โดยที่ ก) B1, ข) B2, ค) B3, ง) B4, จ) B5 และ ฉ) B6

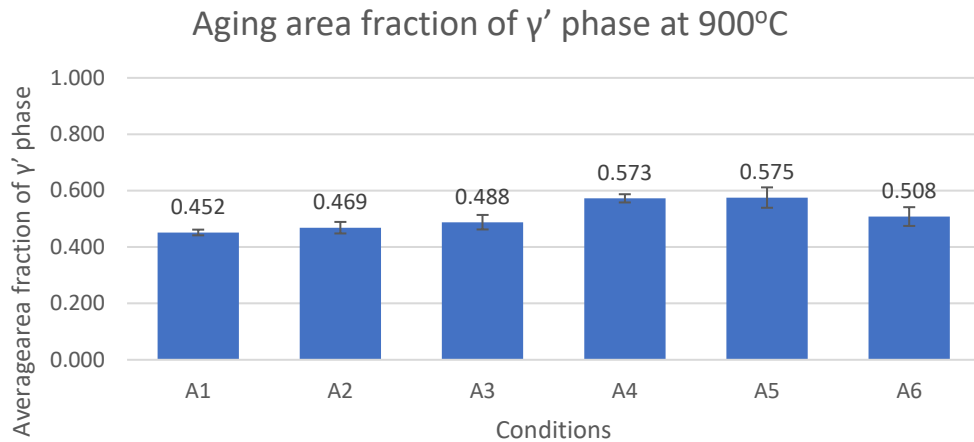
จากรูปที่ 4.38 เป็นรูป SEM จากชิ้นงานที่ผ่านการเผาเป็นเวลานานที่ 900 องศาเซลเซียส จะเห็นว่า หลังการบ่มแข็ง ชิ้นงานมีลักษณะลูกบาศก์มากขึ้นทั้งในชิ้นงาน A2 ถึง A5 แล้วพอเป็น A6 ก็มีลักษณะเป็นทรงค่อนข้างกลมเป็นส่วนใหญ่ ส่วนรูปที่ 4.39 ที่ผ่านการเผาเป็นเวลานานที่ 1000 องศาเซลเซียส ชิ้นงาน B1 ถึง B6 อนุภาคส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นทรงกลมมากกว่าและขนาดโดยรวมเล็กกว่าเมื่อเทียบกับของชิ้นงานที่ผ่านการเผาเป็นเวลานานที่ 900 องศาเซลเซียส

เมื่อนำรูปที่ได้จากการส่องด้วยกล้อง SEM มาวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Image Analysis (ImageJ™) จะได้เป็นกราฟของขนาดอนุภาคแกมมาไพร์ม และค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่ของเฟสแกมมาไพร์ม ของชิ้นงาน A1 ถึง A6 และชิ้นงาน B1 ถึง B6 ที่ผ่านการทำละลายและการตกตะกอนแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 4.40-4.41 และ 4.42-4.43 ตามลำดับ

รูปที่ 4.40 ในชิ้นงานที่ A2 ถึง A6 ค่อนข้างเป็นแนวโน้มที่ชัดเจนว่า เมื่อเพิ่มปริมาณโคบอลต์หรือลดปริมาณนิกเกิล มีผลที่ชัดเจนจะทำให้ขนาดของอนุภาคแกมมาไพร์มโดยเฉลี่ยมีขนาดลดลง ชิ้นงานที่มีขนาดอนุภาคแกมมาไพร์มใหญ่ที่สุดคือ A3 ส่วนผลของอะลูมิเนียมและนิกเกิลนั้นเห็นได้เมื่อเทียบ A1 กับ A2 และ A3 ว่าเมื่อมีอะลูมิเนียมและนิกเกิลมีปริมาณที่สูงแล้วส่งผลให้ค่าของขนาดแกมมาไพร์มเพิ่มขึ้น กราฟค่าขนาดอนุภาคของแกมมาไพร์มมากในช่วง A2 และ A3 นั้นเนื่องจากการเติมอะลูมิเนียมและนิกเกิล จะเพิ่มค่าอุณหภูมิโซลิวส์ของเฟสแกมมาไพร์ม จากที่ ทำการละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียสควรจะทำละลายแกมมาไพร์มได้หมด แต่หากค่าอุณหภูมิโซลิวส์ของเฟสแกมมาไพร์มเพิ่ม ก็จะทำให้แกมมาไพร์มมีความเสถียรเพิ่มขึ้น และถูกละลายได้น้อยลงกว่าเดิม จึงยังอยู่ในรูปอนุภาคแกมมาไพร์มที่ไม่ละลายกลับเข้าเนื้อพื้นแกมมา ดังนั้นหลังทำการบ่มแข็งจึงทำให้อนุภาคแกมมาไพร์มโตขึ้นอีกเล็กน้อยเท่านั้น เนื่องจากไม่มี precipitate มาตกตะกอนเพิ่ม ในชิ้นงาน A4 ถึง A6 มีปริมาณโคบอลต์มาก แม้ว่าจะทำให้ค่าอุณหภูมิโซลิวส์ของแกมมาไพร์มต่ำลง และควรตกตะกอนได้ง่ายขึ้น แต่พบว่ามีการตกตะกอนที่น้อยลงกว่าเมื่อเทียบกับชิ้นงาน A2 และ A3 เนื่องจากมีปริมาณของนิกเกิลที่น้อยกว่า เลยฟอร์มเป็นอนุภาคแกมมาไพร์มที่มีขนาดน้อยกว่า

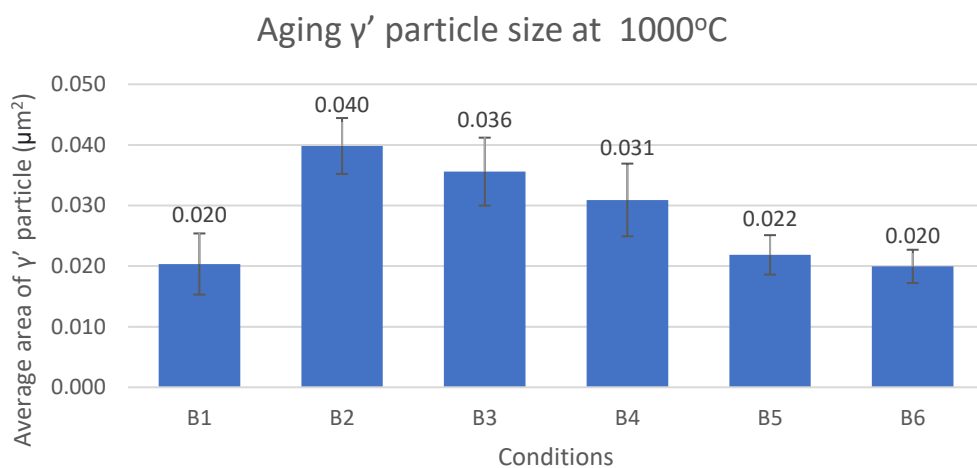


รูปที่ 0.40 ขนาดแกมมาไพร์มเฉลี่ยของชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็ง A1 ถึง A6

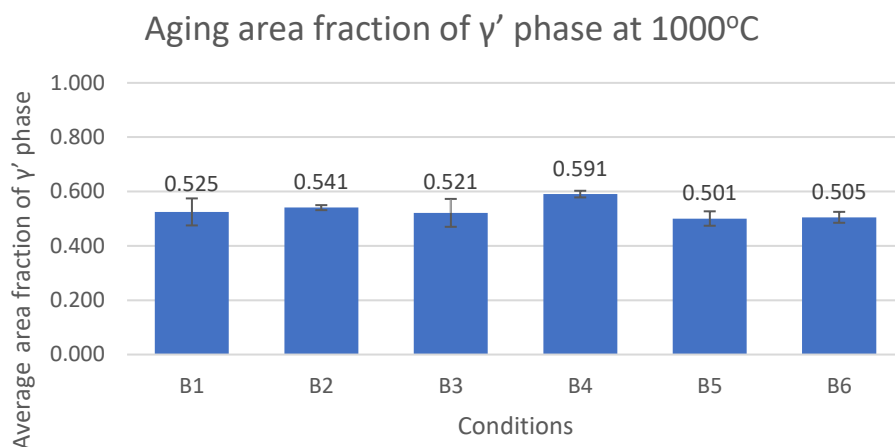


รูปที่ 0.41 ค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่ของเฟสแกมมาไพรม์ของชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็ง A1 ถึง A6

รูปที่ 4.41 มีค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่ของแกมมาไพรม์ใกล้เคียงกัน โดยมีแนวโน้มว่าจะเพิ่มเล็กน้อยจากชิ้นงาน A1 ถึง A6 ค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่ที่เกิดขึ้นจะอยู่ระหว่าง 0.452-0.575 กราฟจะมีค่ามากขึ้นเล็กน้อยที่ A4 และ A5 ผลของอะลูมิเนียม ยังคงเพิ่มค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่ของเฟสแกมมาไพรม์อยู่ ดูได้จากชิ้นงาน A2 ถึง A6 จะมีค่าสูงกว่า A1 ทั้งหมด สำหรับ A2-A3 จะต่ำกว่าปกติเพราะอุณหภูมิโซลวัสของแกมมาไพรม์ ต้องใช้อุณหภูมิในการทำละลายและ/หรือการบ่มแข็งสูงกว่านี้ แต่โดยรวมแล้วธาตุผสมนิกเกิลและโคบอลต์ ไม่มีผลที่ชัดเจนต่อค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่ของเฟสแกมมาไพรม์



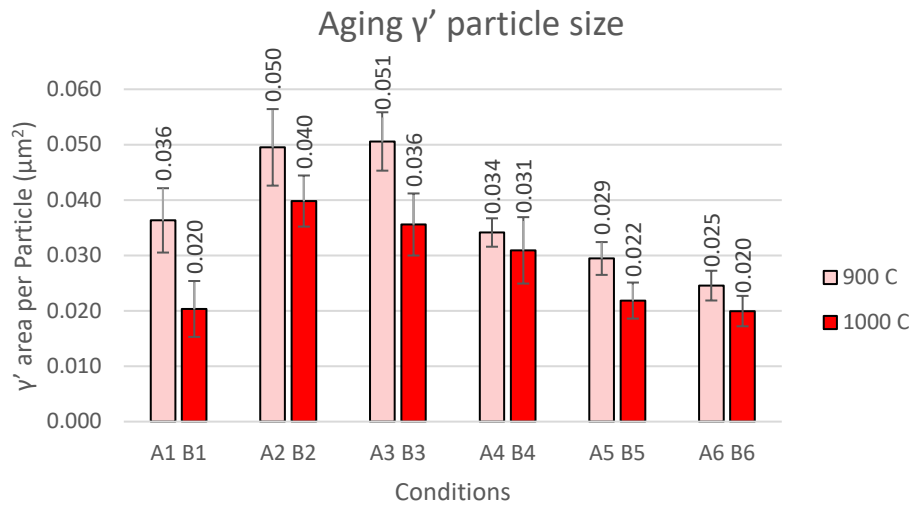
รูปที่ 0.42 ขนาดแกมมาไพรม์เฉลี่ยของชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็ง B1 ถึง B6



รูปที่ 0.43 ค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่ของเฟสแกมมาไพร์มของชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็ง B1 ถึง B6

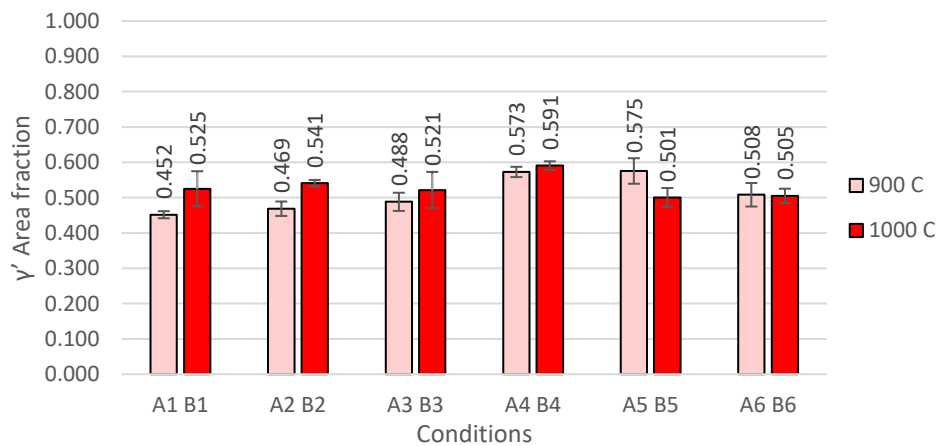
รูปที่ 4.42 จะแสดงผลของธาตุผสมแต่ละชนิดอย่างชัดเจน ทั้งอะลูมิเนียมเมื่อเทียบชิ้นงาน A1 ที่ไม่เติมอะลูมิเนียมเพิ่ม กับชิ้นงาน A2 ถึง A6 ที่มีการเติมอะลูมิเนียมเพิ่มเติมจะมีขนาดอนุภาคแกมมาไพร์มเฉลี่ยมากกว่าอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้ยังเห็นแนวโน้มของนิกเกิลและโคบอลต์ได้จากชิ้นงานที่ A2 ถึง A6 คือเมื่อลดปริมาณนิกเกิลและเพิ่มปริมาณโคบอลต์จะทำให้ขนาดอนุภาคแกมมาไพร์มโดยเฉลี่ยเล็กลง

รูปที่ 4.43 แสดงค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่ของเฟสแกมมาไพร์มของชิ้นงานที่มีค่าใกล้เคียงกันตั้งแต่ 0.501-0.591 ซึ่งไม่ค่อยแตกต่างกันนักในแต่ละเงื่อนไขของปริมาณธาตุผสมที่เติมลงไป โดยปกติการเติมอะลูมิเนียมจะเพิ่มค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่ของแกมมาไพร์ม แต่ในรูปนี้จะแสดงผลที่ไม่ชัดเจน อาจแสดงให้เห็นว่าการเติมธาตุผสมอะลูมิเนียม, นิกเกิล และ โคบอลต์ ไม่มีผลที่ชัดเจนต่อค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่ของเฟสแกมมาไพร์มในกรณีนี้



รูปที่ 0.44 ขนาดอนุภาคแกมมาไพรม์ที่ผ่านการเผาที่ 900 องศาเซลเซียสเปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส

Aging area fraction of γ' phase

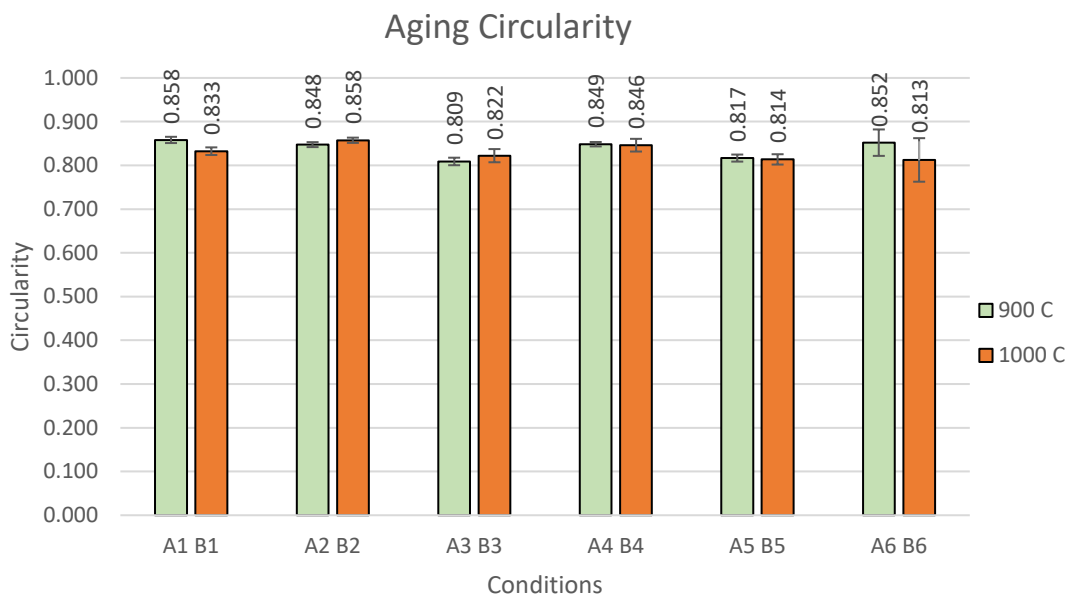


รูปที่ 0.45 ค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่ของเฟสแกมมาไพรม์ที่ผ่านการเผาที่ 900 องศาเซลเซียสเปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส

ในส่วนของชิ้นงานที่ได้ผ่านการทำละลายและการบ่มแข็งเพื่อให้อนุภาคแกมมาไพรม์ตกตะกอนใหม่อีกครั้งหนึ่ง ได้ถูกทำการตรวจสอบและวิเคราะห์ผลใหม่ สามารถสรุปสาระที่สำคัญได้ดังต่อไปนี้ จากรูปที่ 4.38 และ 4.39 ที่แสดงภาพ SEM ของชิ้นงานภายหลังการทำละลายและการบ่มแข็ง จากผลการทดลองพบว่าโครงสร้างจุลภาคนั้นประกอบด้วยแกมมาไพรม์ขนาดเล็ก ที่มีการแพร่กระจายอย่างเป็นระเบียบ

รูปที่ 4.44 และ 4.45 แสดงขนาดอนุภาคแกมมาไพรม์และค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่ของเฟสแกมมาไพรม์ที่ผ่านการทำละลายและการบ่มแข็ง จากรูปเหล่านี้จะเห็นผลจากธาตุผสมส่งผลต่อแนวโน้มของการตกตะกอนและการโตของอนุภาคแกมมาไพรม์ที่มีความใกล้เคียงกับการทำละลายในทุกชิ้นงานยกเว้นขนาดของ B5 และค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่ของ A4 การให้การบ่มแข็งในชิ้นงานที่ผ่านการเผาที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 400 ชั่วโมง จะมีโครงสร้างจุลภาคที่ใหญ่กว่าชิ้นงานที่ผ่านการเผาที่ 1000 องศาเซลเซียส ในชิ้นงานส่วนใหญ่ดังแสดงในรูปที่ 4.44 อย่างชัดเจน ทั้งนี้ เนื่องจากการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงที่ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลานานนั้น อาจส่งผลให้อะตอมของธาตุต่างๆบางธาตุหรือมากกว่าที่อยู่เนื้อพื้นแกมมาเกิดการจัดเรียงตัวเป็นกลุ่มก้อนบางอย่างอยู่ในเนื้อพื้นแกมมา ซึ่งจะทำหน้าที่ขัดขวาง ไม่ให้อะตอมของธาตุที่ฟอร์มอนุภาคแกมมาไพรม์สามารถแพร่ไปได้ไกล ดังนั้นจึงไม่สามารถไปรวมตัวตกตะกอนเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้นในช่วงการตกตะกอน ที่สามารถตกตะกอนโดยมีอนุภาคแกมมาไพรม์ขนาดเล็กกว่าแต่มีปริมาณหรือสัดส่วนเชิงพื้นที่ที่มากขึ้นในเกือบทุกกรณี เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่มีการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงที่ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลานาน ยกเว้นในชิ้นงาน B5

อย่างไรก็ตาม นอกจากนี้ยังพบว่าโดยส่วนใหญ่แล้ว ขนาดโดยเฉลี่ยของอนุภาคแกมมาไพรม์ที่ผ่านการบ่มแข็งมีค่าที่ต่ำกว่าของชิ้นงานที่ผ่านการทำละลายเล็กน้อย ซึ่งไม่ตรงกับหลักปฏิบัติมาตรฐานหรือสอดคล้องตามทฤษฎี และความน่าจะเป็น ทั้งนี้อาจเกิดขึ้นเนื่องมาจากจำนวนการวัดที่น้อยไป เนื่องจากไม่สามารถถ่ายภาพด้วย SEM ในปริมาณที่มากเพียงพอ รวมทั้งอาจเกิดร่วมกับสาเหตุที่บริเวณชิ้นงานส่วนที่ถ่ายด้วยเทคนิค SEM นั้น มีการกระจายตัวของธาตุต่าง ๆ ในบางบริเวณของชิ้นงานไม่สม่ำเสมอ ซึ่งเป็นจุดด้อยของเทคนิคการหลอมแบบสูญญากาศด้วยเตา Arc melting จึงทำให้ธาตุที่ฟอร์มเป็นอนุภาคแกมมาไพรม์ในบริเวณนั้นมีปริมาณต่ำกว่าส่วนอื่น ๆ และ/หรือ บริเวณนั้นอาจมีธาตุบางธาตุที่ขัดขวางการแพร่ของธาตุอื่น ๆ ที่สามารถรวมตัวเป็นเฟสแกมมาไพรม์ในปริมาณที่สูงกว่าปกติ



รูปที่ 4.46 ค่าความกลมของอนุภาคแกมมาไพรม์ของชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งที่ 900 องศาเซลเซียส
เปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส

จากรูป 4.46 ซึ่งแสดงค่าความกลมพบว่าทั้งสองเงื่อนไขของการเผา นั้น พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันมากใน
แต่ละธาตุผสม โดยส่วนใหญ่ค่าความกลมหลังจากกระบวนการบ่มแข็งจะสูงกว่าของชิ้นงานที่ผ่าน
กระบวนการทำละลาย การบ่มแข็งเปลี่ยนรูปร่างของอนุภาคแกมมาไพรม์ให้เป็นทรงกลมมากขึ้น ค่า
ความกลมที่น้อยที่สุดพบในชิ้นงาน A3 ซึ่งยังคงมีอนุภาคแกมมาไพรม์ในลักษณะที่เข้าใกล้ทรง
ลูกบาศก์ที่สุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

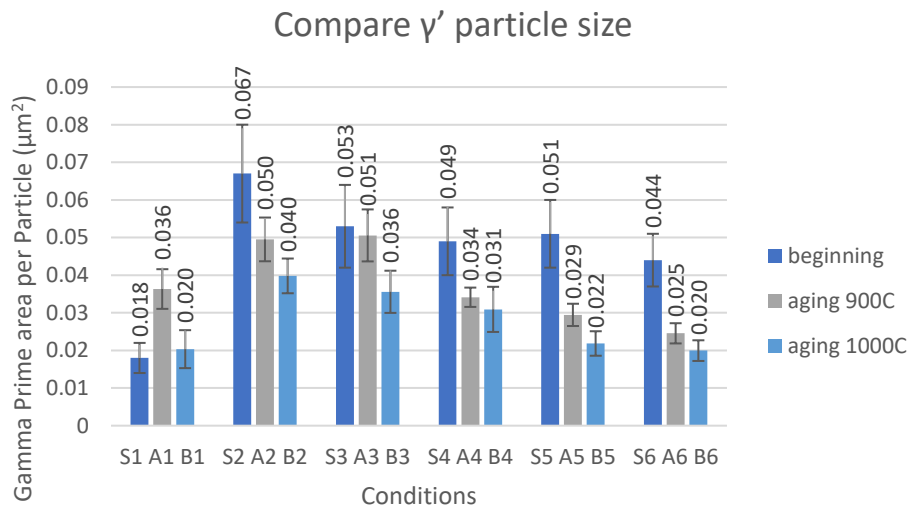
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.2 การวิเคราะห์ผลโดยรวม

จากการนำผลการทดลองมารวบรวมและเทียบกันใน 3 เงื่อนไข ได้แก่

- 1.) ชิ้นงานตั้งต้นก่อนการเผาเป็นเวลานาน (ชิ้นงาน S1 ถึง S6) [13],
- 2.) ชิ้นงานที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส นาน 400 ชั่วโมงและผ่านกรรมวิธีทางความร้อนในการฟื้นฟูโครงสร้างจุลภาค (ชิ้นงาน A1 ถึง A6) และ
- 3.) ชิ้นงานที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส นาน 400 ชั่วโมงและผ่านกรรมวิธีทางความร้อนในการฟื้นฟูโครงสร้างจุลภาค ได้แก่ ชิ้นงาน B1 ถึง B6

ดังแสดงในรูปที่ 4.47 และ 4.48 โดยมีการเปรียบเทียบขนาดอนุภาคเฉลี่ยของแกมมาไพรม์และค่า
สัดส่วนเชิงพื้นที่เฉลี่ยของแกมมาไพรม์



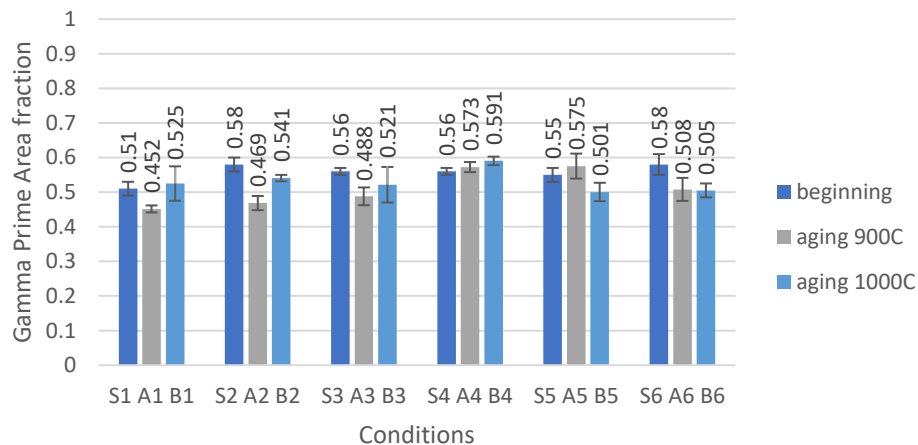
รูปที่ 0.47 เปรียบเทียบขนาดอนุภาคแกมมาไพรม์ใน 3 สภาวะ ได้แก่ ชีงงานตั้งต้นก่อนการเผาผ่านการเผาที่ 900 องศาเซลเซียสและผ่านการฟื้นฟูโครงสร้างด้วยกรรมวิธีทางความร้อน และผ่านการเผาที่ 1000 องศาเซลเซียสและผ่านการฟื้นฟูโครงสร้างด้วยกรรมวิธีทางความร้อน

จากผลการทดลองทั้งหมดที่สรุปได้ในรูป 4.47 จะเห็นว่าขนาดอนุภาคแกมมาไพรม์หลังการทำกรรมวิธีทางความร้อนซ้ำของทั้ง 2 เงื่อนไขคือที่ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส ชีงงานที่มีส่วนผสมเหมือนกันแต่ผ่านการให้ความร้อนมาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส มีขนาดอนุภาคแกมมาไพรม์เล็กกว่าของชีงงานที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส นั้นเป็นเพราะอนุภาคแกมมาไพรม์ที่ 1000 องศาเซลเซียสนั้น จะฟอร์มเป็นอนุภาคแกมมาไพรม์ที่มีขนาดใหญ่ได้ยากขึ้นดังเหตุผลที่ได้อธิบายไปก่อนหน้านี้ เมื่อเทียบกับของชีงงานที่ผ่านการใช้งานที่ 900 องศาเซลเซียส แนวโน้มของกราฟทั้งชีงงานที่เผาที่ 900 และ 1000 องศาเซลเซียสนั้นใกล้เคียงกันกับชีงงานตั้งต้นก่อนเผาแต่มีค่าน้อยกว่า อย่างไรก็ตาม สามารถสรุปได้ว่าชีงงานที่ผ่านการเผาเป็นเวลานานที่ 900 องศาเซลเซียสมีความเหมาะสมกว่ากับเงื่อนไขที่ให้ไปผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อฟื้นฟูอนุภาคแกมมาไพรม์ โดยจะเห็นว่าขนาดอนุภาคแกมมาไพรม์ที่ผ่านการเผาที่ 900 องศาเซลเซียสนั้นใกล้เคียงกับขนาดอนุภาคชีงงานตั้งต้นก่อนเผา นอกจากนั้น ยังสรุปได้ว่าการให้กรรมวิธีทางความร้อนซ้ำนั้น เหมาะกับชีงงาน A3 เป็นอย่างมากภายใต้การผ่านการเผาเป็นเวลานานที่ 900 องศาเซลเซียส โดยรวมนั้นจะเห็นได้ว่าผลของการเติมธาตุผสมต่าง ๆ ในงานวิจัยนี้ (Al, Ni และ/หรือ Co) นั้น มีแนวโน้มที่ขนาดอนุภาคแกมมาไพรม์จะมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกันระหว่างชีงงานตั้งต้นก่อนเผาและชีงงานหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อฟื้นฟูโครงสร้างจุลภาค การเติมอะลูมิเนียมไว้ 1% และนิกเกิลที่เพิ่มปริมาณมากขึ้นจะส่งผลให้แกมมาไพรม์มีขนาดใหญ่ขึ้น แต่การทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 24

ชั่วโมงนั้น ไม่เพียงพอต่อการทำให้เกิดอนุภาคแกมมาไพรม์ในชิ้นงานที่มีธาตุผสมมาก แต่เหมาะสมกับชิ้นงานที่ไม่มีธาตุผสม นั่นคือชิ้นงาน A1 หลังผ่านการเผาเป็นเวลานานที่ 900 องศาเซลเซียส ผลของธาตุผสม อะลูมิเนียมจะทำให้เกิดการแพร่ในชิ้นงานที่อุณหภูมิสูงหลังผ่านการเผาเป็นเวลานานที่ 1000 องศาเซลเซียสได้มากกว่าหรือไปได้ไกลกว่า อนุภาคแกมมาไพรม์ละลายไปที่เนื้อพื้นและแพร่ไปยังขอบเกรนหลังการทำการรมวิธีทางความร้อนอีกครั้งจึงดึงธาตุที่ฟอร์มเฟสแกมมาไพรม์กลับมาให้ตกตะกอนอีกครั้งได้ไม่เหมือนหรือเท่าเดิมในขั้นตอนการบ่มแข็ง จึงเกิดการตกตะกอนของเฟสแกมมาไพรม์น้อยกว่าปกติ ปริมาณโคบอลต์ที่มากขึ้น จะทำให้อนุภาคแกมมาไพรม์ตกตะกอนออกมาได้น้อยกว่าจึงทำให้ขนาดของอนุภาคแกมมาไพรม์มีขนาดเล็กกว่า ส่วนนิกเกิลช่วยเพิ่มความเสถียรของเฟสแกมมาไพรม์ตั้งในชิ้นงานที่ 2 และ 3

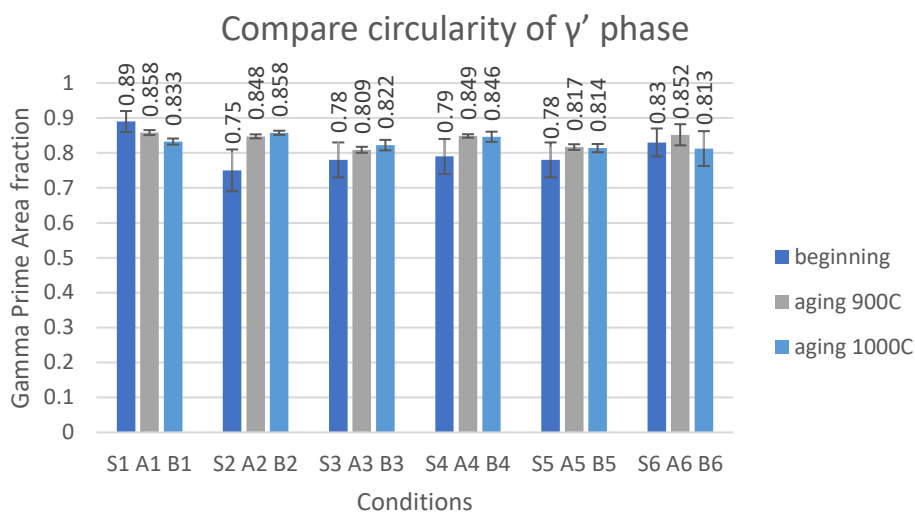


Compare area fraction of γ' phase



รูปที่ 4.48 เปรียบเทียบค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่ของอนุภาคแกมมาไพรม์ใน 3 สภาวะ ได้แก่ ชิ้นงานตั้งต้นก่อนการเผา, ผ่านการเผาที่ 900 องศาเซลเซียสและผ่านการฟื้นฟูโครงสร้างด้วยกรรมวิธีทางความร้อน และผ่านการเผาที่ 1000 องศาเซลเซียสและผ่านการฟื้นฟูโครงสร้างด้วยกรรมวิธีทางความร้อน

จากรูปที่ 4.48 แสดงให้เห็นถึงค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่ของเฟสแกมมาไพรม์ จากผลการทดลองจะพบว่าผลทั้งหมดออกมาใกล้เคียงกัน ไม่มีนัยสำคัญของการเติมธาตุผสม อย่างไรก็ตาม ในทุกกรณีการเติมธาตุผสมโดยรวมนั้น ทำให้เห็นว่าทำให้ค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่ของแกมมาไพรม์มีค่าที่เพิ่มขึ้นในชิ้นงานที่มีส่วนผสมเดียวกัน



รูปที่ 0.49 เปรียบเทียบค่าความกลมของอนุภาคแกมมาไพรม์ใน 3 สภาวะ ได้แก่ ขึ้นงานตั้งต้นก่อนการเผา, ผ่านการเผาที่ 900 องศาเซลเซียสและผ่านการฟื้นฟูโครงสร้างด้วยกรรมวิธีทางความร้อน และผ่านการเผาที่ 1000 องศาเซลเซียสและผ่านการฟื้นฟูโครงสร้างด้วยกรรมวิธีทางความร้อน

รูปที่ 4.49 แสดงผลของการเปรียบเทียบค่าความกลมของอนุภาคแกมมาไพรม์ใน 3 สภาวะ ได้แก่ ขึ้นงานตั้งต้นก่อนการจำลองการเผาเป็นเวลานาน ผ่านการเผาที่ 900 องศาเซลเซียสและผ่านการฟื้นฟูโครงสร้างด้วยกรรมวิธีทางความร้อน และผ่านการเผาที่ 1000 องศาเซลเซียสและผ่านการฟื้นฟูโครงสร้างด้วยกรรมวิธีทางความร้อนที่ประกอบไปด้วยการทำละลายและการบ่มแข็งมาแล้ว จากผลการทดลองทั้งหมดสามารถเห็นแนวโน้มได้ว่า การเติมธาตุผสมต่าง ๆ ลงไปทั้งในชิ้นงานกลุ่ม A (ผ่านการเผาที่ 900 องศาเซลเซียส) และ ชิ้นงานกลุ่ม B (ผ่านการเผาที่ 1000 องศาเซลเซียส) ส่งผลให้ชิ้นงานเหล่านี้เมื่อผ่านการให้ความร้อนแบบมาตรฐานเพื่อฟื้นฟูสภาพโครงสร้างจุลภาคให้กลับไปมีลักษณะใกล้เคียงชิ้นงานหลังการทำกรรมวิธีทางความร้อนก่อนขึ้นตอนการเผาเป็นระยะเวลาในงานวิจัยก่อนหน้า [13] จะทำให้อนุภาคแกมมาไพรม์ตกตะกอนออกมามีลักษณะเป็นทรงกลมที่มากขึ้นในชิ้นงานที่ A2 ถึง A6 และ B2 ถึง B6 ส่วนชิ้นงานที่ไม่มีการเติมธาตุผสมอะไรเพิ่มเติมในชิ้นงาน A1 และ B1 นั้น อนุภาคแกมมาไพรม์ที่ตกตะกอนออกมามีลักษณะเป็นทรงกลมลดลง หรือ มีความเป็นลูกบาศก์ที่มากขึ้น ดังนั้นจึงสรุปตรงส่วนนี้ได้ว่า ผลของการเติมธาตุผสม อะลูมิเนียม นิกเกิล และ โคบอลต์ ส่งผลให้อนุภาคแกมมาไพรม์ที่ตกตะกอนออกมามีลักษณะเป็นทรงกลมมากขึ้น ภายหลังจากจำลองการใช้งานโดยการเผายาวที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบมาตรฐานเพื่อคืนสภาพโครงสร้างจุลภาค

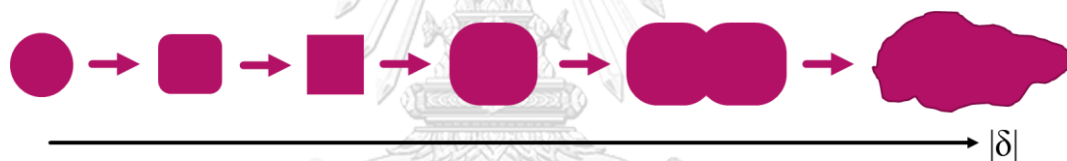
นอกจากนี้ยังสรุปได้ว่า A3 เป็นชิ้นงานที่ฟื้นฟูสภาพกลับมาใกล้เคียงเดิมมากที่สุด เพราะดูจากขนาดอนุภาคแกมมาไพรม์ใกล้เคียงของเดิมมากที่สุด และค่าความกลมอนุภาคแกมมาไพรม์เพิ่มเพียงเล็กน้อย

ส่วนค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่ไม่ต่างกันมาก จึงสรุปว่าชิ้นงาน 3 จะสามารถถูกทำให้พื้นสภาพกลับมาใกล้เคียงลักษณะเดิมมากที่สุด

กลไกในการเปลี่ยนรูปร่างของแกมมาไพรม์ [2] สามารถอธิบายได้ด้วยหลักการของค่าความแตกต่างของค่าโครงผลึกสัมบูรณ์ (Absolute lattice misfit; $|\delta|$) โดยค่านี้จะแปรผันตามตัวแปรของโครงผลึก (Lattice parameter; a) ทั้งของเนื้อพื้นแกมมาและอนุภาคแกมมาไพรม์ ดังสมการที่ 4.3

$$|\delta| = \frac{2|a_{\gamma'} - a_{\gamma}|}{a_{\gamma'} + a_{\gamma}} \quad (4.3)$$

จากสมการที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าเมื่อค่าความแตกต่างของค่าโครงผลึกสัมบูรณ์มีค่าน้อย ๆ (เข้าใกล้ 0) อนุภาคแกมมาไพรม์จะมีลักษณะเป็นทรงกลม และเมื่อค่านี้มีค่าเพิ่มมากขึ้น อนุภาคแกมมาไพรม์จะเริ่มเปลี่ยนเป็นทรงลูกบาศก์ แต่หากค่าความแตกต่างของค่าโครงผลึกสัมบูรณ์มากเกินไป อนุภาคแกมมาไพรม์จะเกิดการรวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่และเกิดลักษณะเป็นแพได้



รูปที่ 0.50 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างแกมมาไพรม์ [2]

โคบอลต์จะส่งผลต่อเนื้อพื้นแกมมาเป็นหลัก และอะลูมิเนียมจะส่งผลต่อเฟสแกมมาไพรม์เป็นหลัก การที่โคบอลต์ลดลง หรือ อะลูมิเนียมมากขึ้น จะทำให้ค่าความแตกต่างของค่าโครงผลึกสัมบูรณ์มีค่ามากขึ้น ในการทดลองของชิ้นงานที่ผ่านการเผาเป็นเวลานานที่ 900 องศาเซลเซียส การเติมอะลูมิเนียมและนิกเกิลเพิ่มขึ้นจะคงความเหลี่ยมของอนุภาคแกมมาไพรม์ไว้ได้ แต่การเพิ่มปริมาณโคบอลต์จะส่งผลให้รูปร่างมีความเป็นทรงกลมมากขึ้น หลังจำลองการเผาเป็นเวลานานที่ 1000 องศาเซลเซียส จะพบว่าผลจากการเพิ่มปริมาณอะลูมิเนียมและนิกเกิลจะส่งผลให้เกิดการเชื่อมกันของอนุภาคมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้เสียสมบัติเชิงกลของชิ้นงานได้ แต่ถ้าเพิ่มปริมาณโคบอลต์มากขึ้นตั้งในชิ้นงานที่ 5 หรือ 6 ส่งผลให้ยังคงรักษาความเสถียรของเฟสแกมมาไพรม์ไว้ได้ เนื่องจากโคบอลต์ช่วยลดค่าความแตกต่างของค่าโครงผลึกสัมบูรณ์ และช่วยลดการสูญเสียค่าความเป็น coherency ระหว่างเนื้อแกมมาและอนุภาคแกมมาไพรม์ รวมถึงยับยั้งการเชื่อมกันของอนุภาคแกมมาไพรม์ได้อีกด้วย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาผลการทดลองของผลกระทบจากกรรมวิธีทางความร้อนในการฟื้นฟูโครงสร้างจุลภาคในโลหะผสมพิเศษเบสนิกเกิลที่ได้จากการหล่อและผ่านการให้ความร้อนมาเป็นระยะเวลาานานหลังจากขึ้นงานผ่านการทำละลายและบ่มแข็งได้ดังนี้

1. เจือไนที่นำมาใช้ในการทดลองที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนเพื่อฟื้นฟูโครงสร้างจุลภาคที่ผ่านการใช้งานเป็นเวลานานนั้น ไม่สามารถฟื้นฟูได้ถึง 100%

2. ในช่วงการทำละลาย ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ขึ้นสูงไม่พอ และ/หรือ เวลาไม่นานพอที่จะสามารถทำการละลายอนุภาคแกมมาไพรม์หายาบที่ผ่านการใช้งานเป็นเวลานานทั้งหมดกลับไปเนื้อพื้นแกมมาได้อย่างสมบูรณ์ทั้งในชิ้นงานทั้ง 2 กลุ่มที่ผ่านการให้ความร้อนเป็นเวลานานมาแล้ว

3. ผลของการเติมธาตุผสม โดยเฉพาะอะลูมิเนียม สามารถเพิ่มอุณหภูมิโซลิวส์ของเฟสแกมมาไพรม์ได้ ดังนั้น การเลือกอุณหภูมิในการบ่มแข็งนั้นค่อนข้างต่ำไปหรือไม่สูงพอต่อการทำให้การตกตะกอนของอนุภาคให้มีขนาดใหญ่ใกล้เคียงกับของชิ้นงานดั้งเดิมที่ไม่มีการเติมธาตุใดๆ

4. การเลือกเจือไนในการทำกรรมวิธีทางความร้อนในการฟื้นฟูโครงสร้างนั้นเหมาะสม กับชิ้นงานที่ผ่านการเผาเป็นเวลานานที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสมากกว่าที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส และเหมาะสมที่สุดในชิ้นงาน A3

5. ภายหลังจากเลือกเจือไนในการทำกรรมวิธีทางความร้อนในการฟื้นฟูโครงสร้าง การฟื้นฟูสภาพของโครงสร้างจุลภาคเสียลักษณะจากทรงลูกบาศก์และกลายเป็นทรงกลมมากขึ้น โดยเฉพาะชิ้นงานที่ผ่านการใช้งานเป็นเวลานานที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส

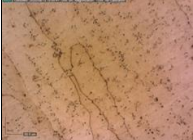
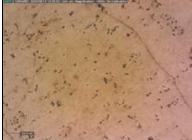
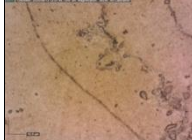
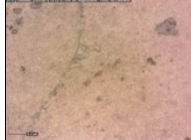
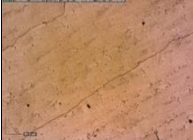
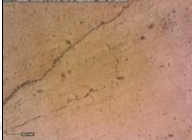
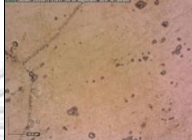


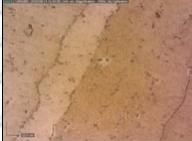
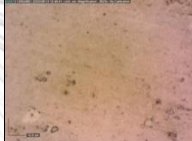
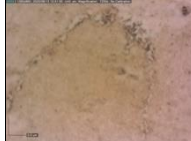
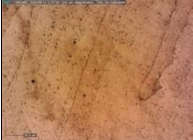

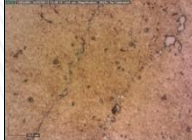
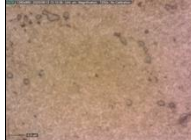
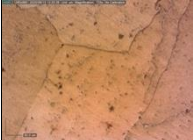
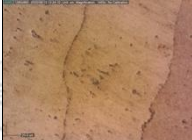
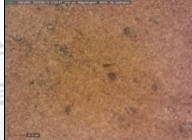
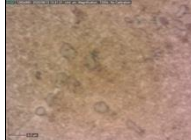
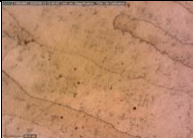
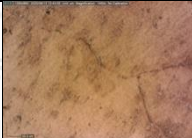


5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรปรับปรุงเจือไนของอุณหภูมิให้สูงขึ้น และ/หรือ ใช้เวลาที่ใช้ในการทำละลายที่นานขึ้น ในขั้นตอนกรรมวิธีทางความร้อนในการฟื้นฟูโครงสร้างจุลภาค เพื่อให้โครงสร้างจุลภาคสุดท้ายที่ผ่านการฟื้นคืนสภาพใกล้เคียงกันของตั้งต้นให้ได้มากที่สุด



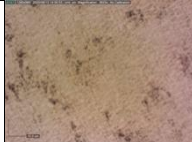
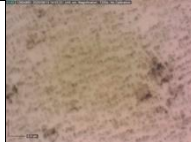

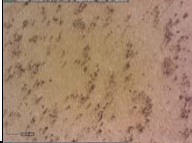
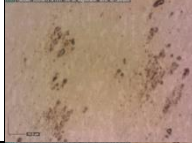
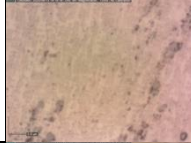
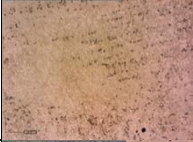

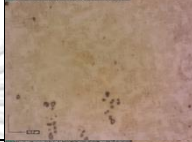


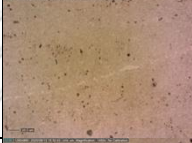
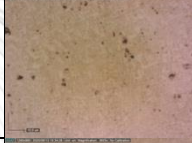
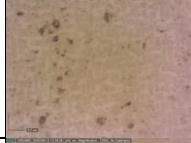
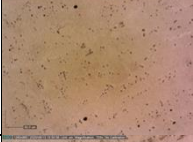
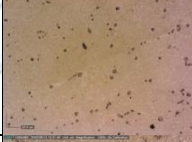
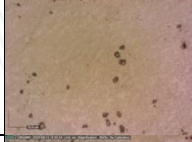
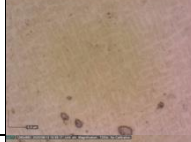


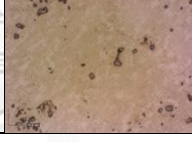

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก ภาพถ่าย OM ของชิ้นงานที่ได้รับ (As Received)

ก1 ชิ้นงาน A

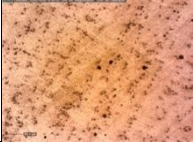
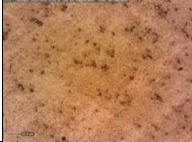
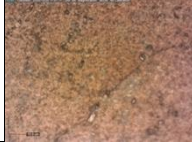
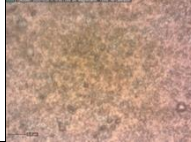



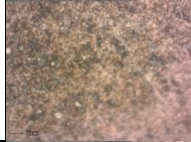








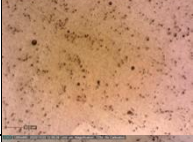
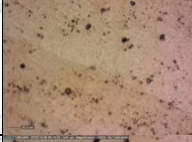

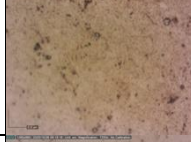
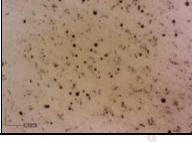
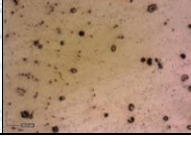
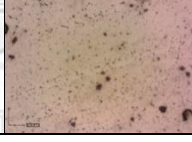
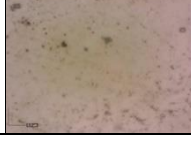
ชิ้นงาน	ภาพถ่าย OM			
	×725	×1450	×3625	×7250
A1				
A2				
A3				
A4				
A5				
A6				

ก2 ชิ้นงาน B


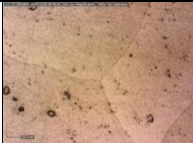
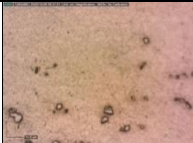
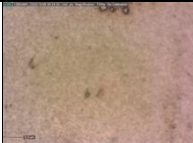
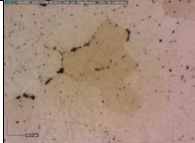
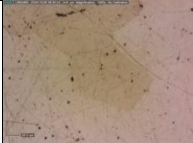
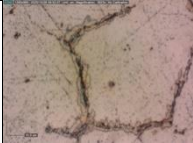
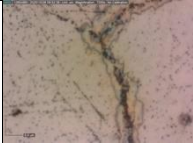
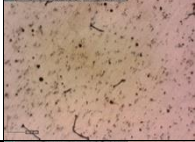
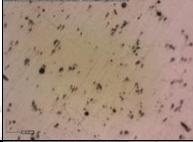
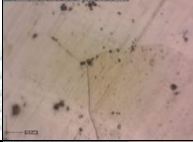
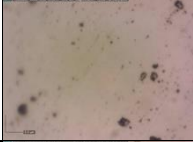
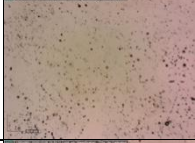
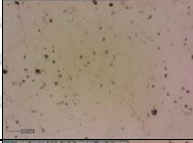
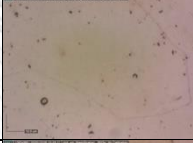

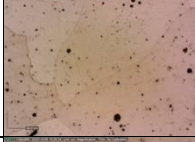
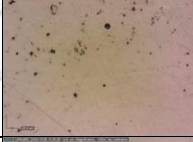
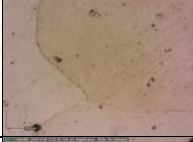
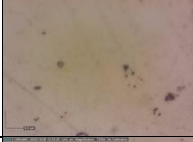

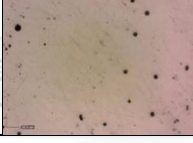


ชิ้นงาน	ภาพถ่าย OM			
	x725	x1450	x3625	x7250
B1				
B2				
B3				
B4				
B5				
B6				

ภาคผนวก ข ภาพถ่าย OM ของชิ้นงานที่ผ่านการทำละลาย (Solutioning)

ข1 ชิ้นงาน A

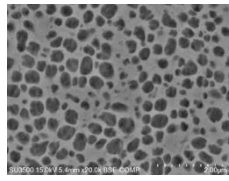
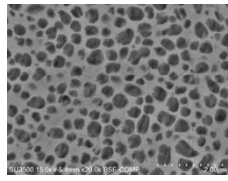
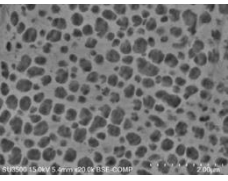
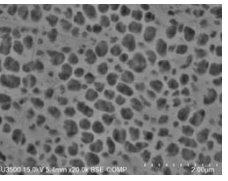
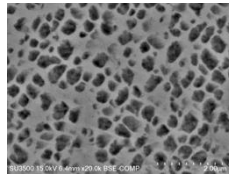
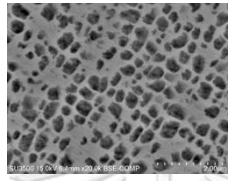
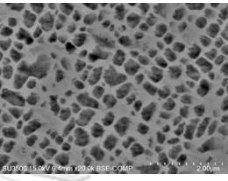
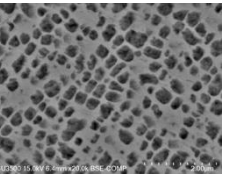
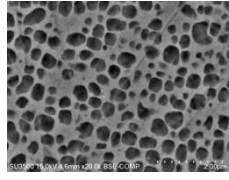
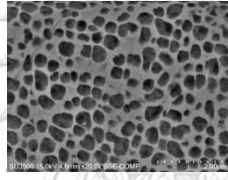
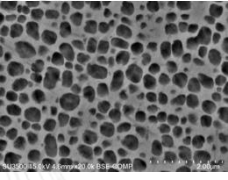
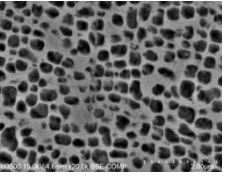
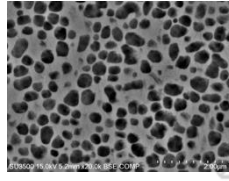
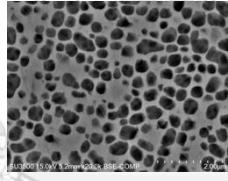
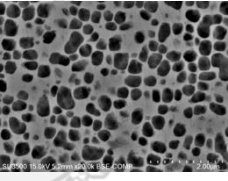
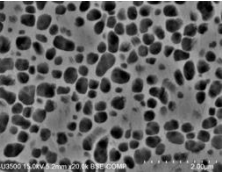
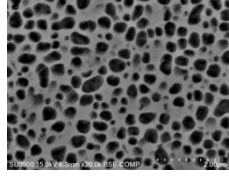
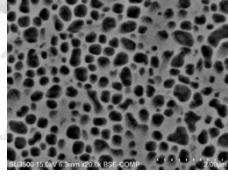
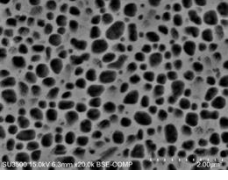
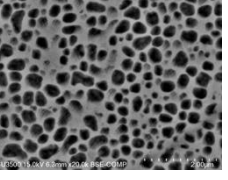
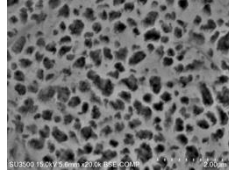
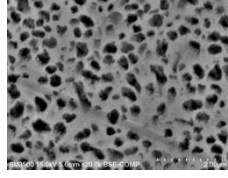
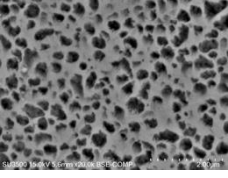
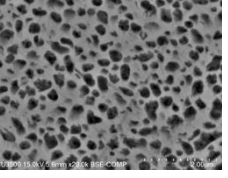
ชิ้นงาน	ภาพถ่าย OM			
	×725	×1450	×3625	×7250
A1				
A2				
A3				
A4				
A5				
A6				

ข2 ชิ้นงาน B

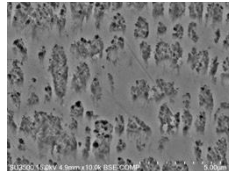
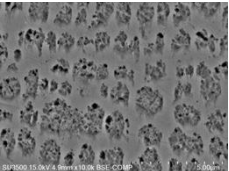
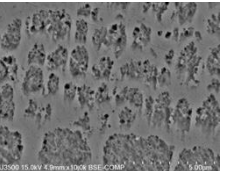
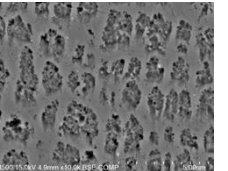
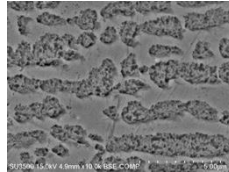
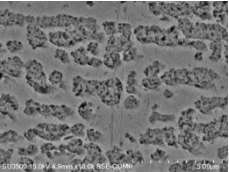
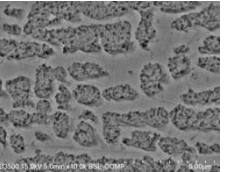
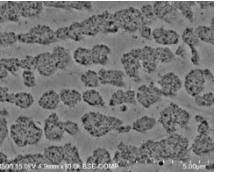
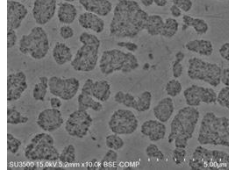
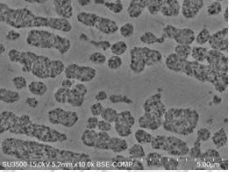
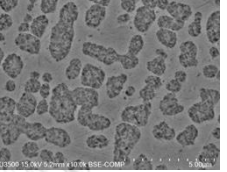
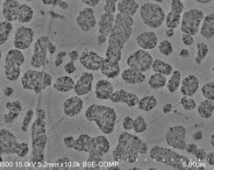
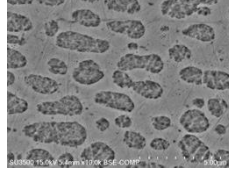
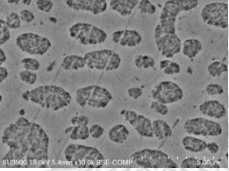
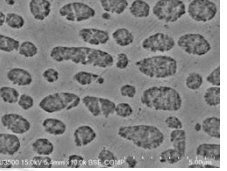
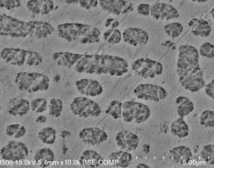
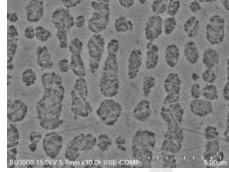
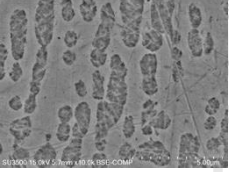
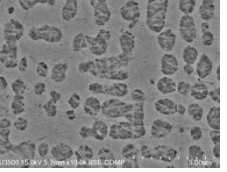
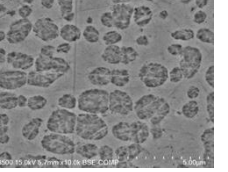
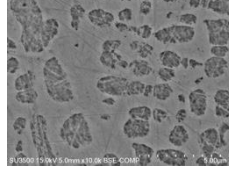
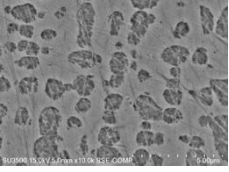
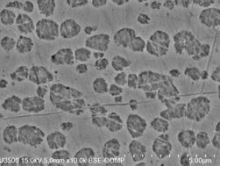
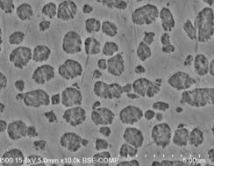
ชิ้นงาน	ภาพถ่าย OM			
	×725	×1450	×3625	×7250
B1				
B2				
B3				
B4				
B5				
B6				

ภาคผนวก ค ภาพถ่าย SEM ของชิ้นงานที่ได้รับ (As Received)

ค1 ชิ้นงาน A

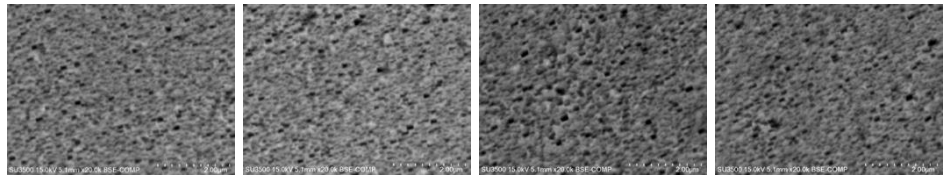
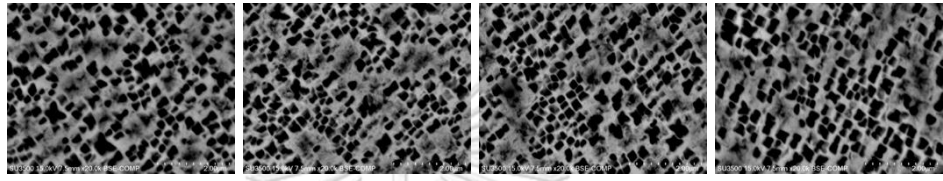
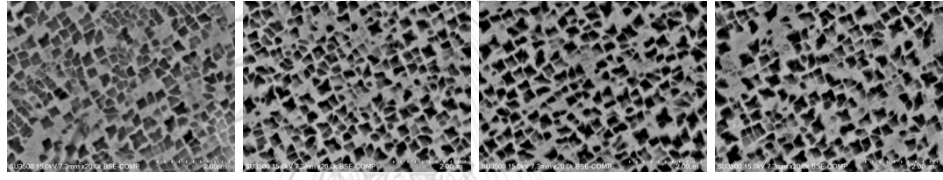
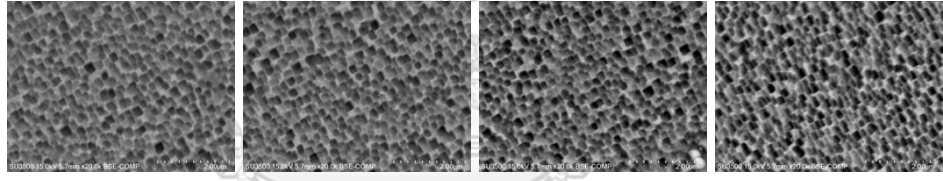
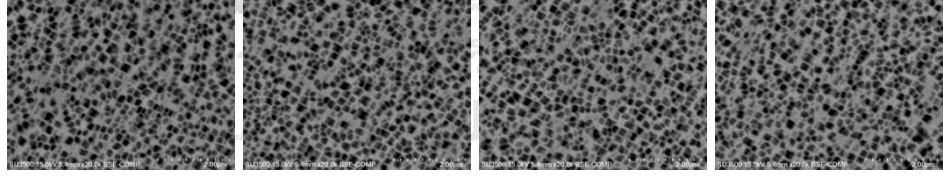
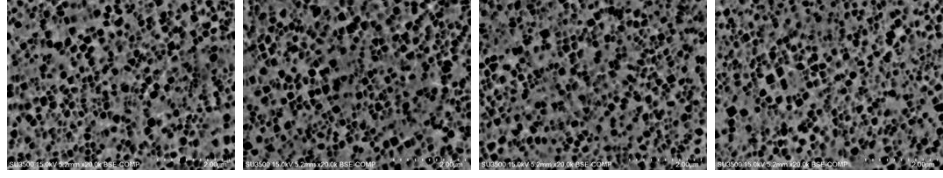
ชิ้นงาน	ภาพถ่าย SEM			
A1				
A2				
A3				
A4				
A5				
A6				

ค2 ชิ้นงาน B

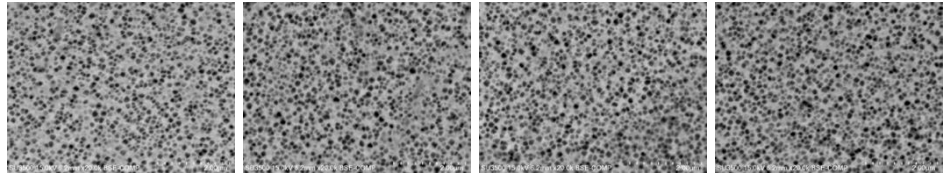
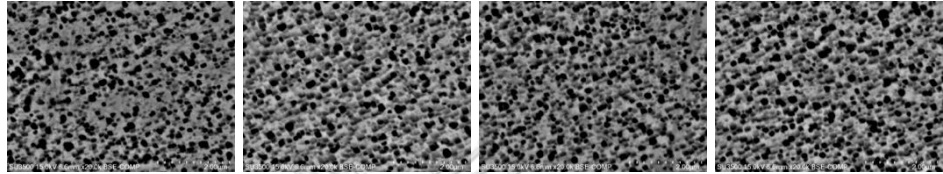
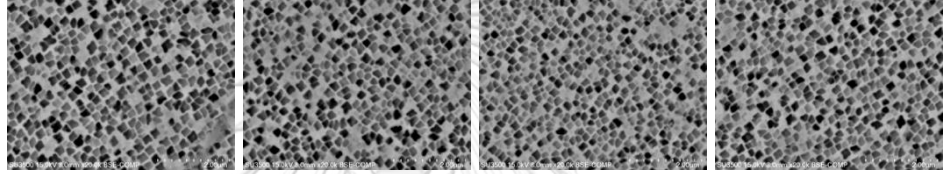
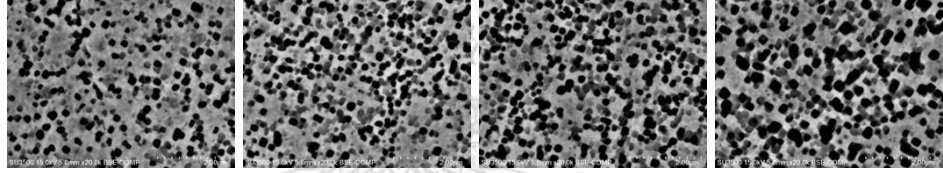
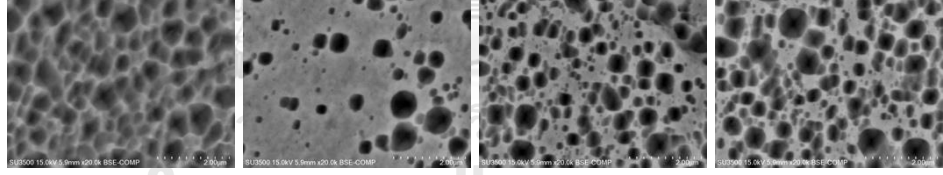
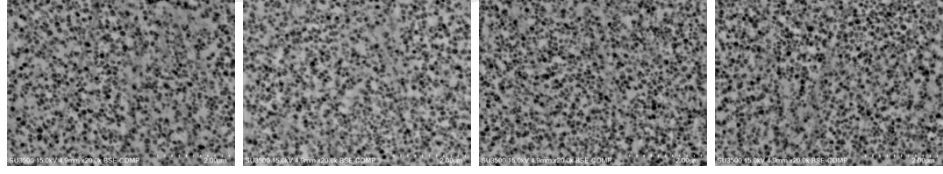
ชิ้นงาน	ภาพถ่าย SEM			
B1				
B2				
B3				
B4				
B5				
B6				

ภาคผนวก ง ภาพถ่าย SEM ของชิ้นงานที่ผ่านการทำละลาย (Solutioning)

ง1 ชิ้นงาน A

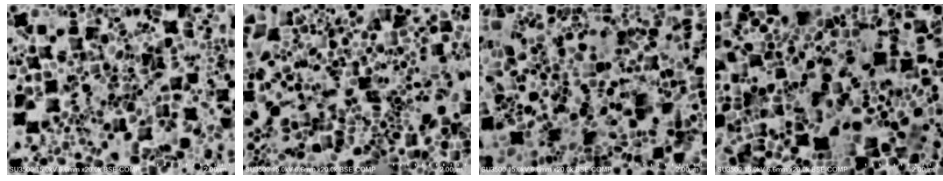
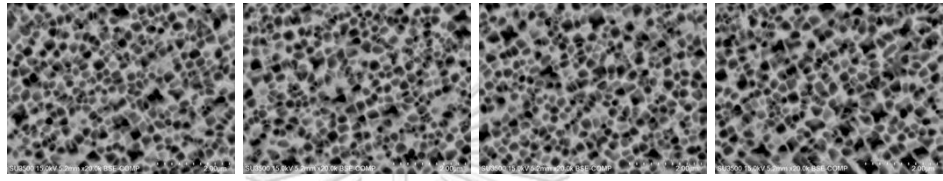
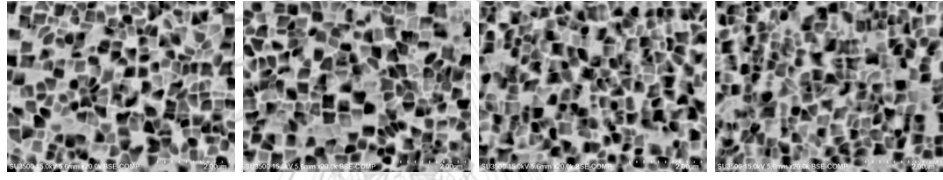
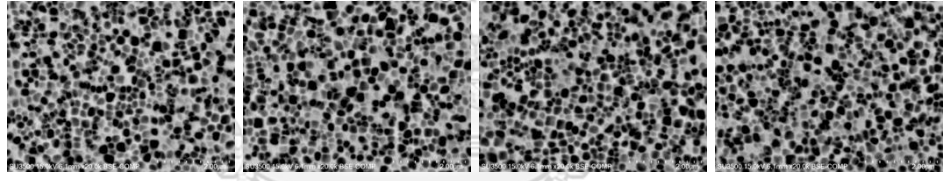
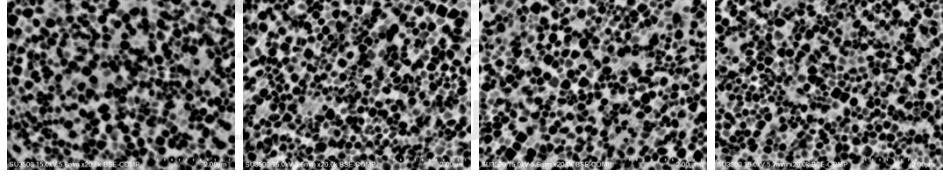
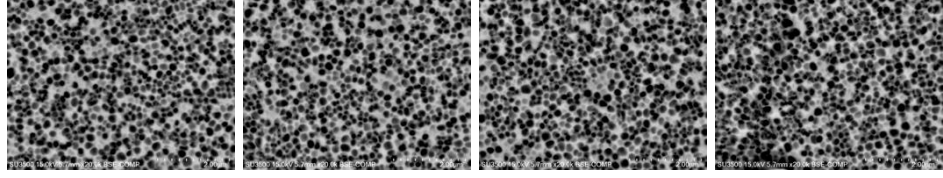
ชิ้นงาน	ภาพถ่าย SEM			
A1				
A2				
A3				
A4				
A5				
A6				

ง2 ชิ้นงาน B

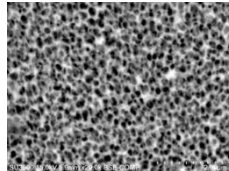
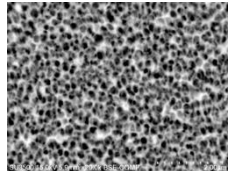
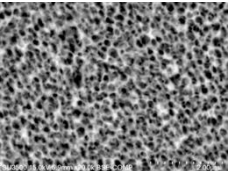
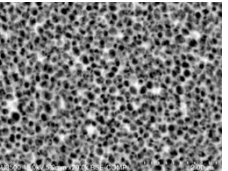
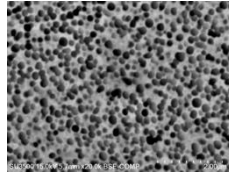
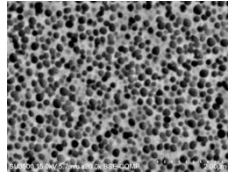
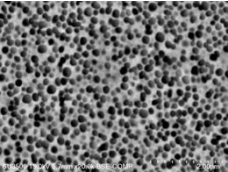
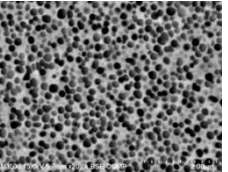
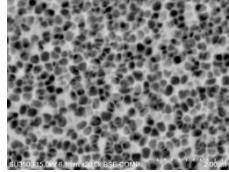
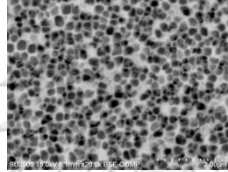
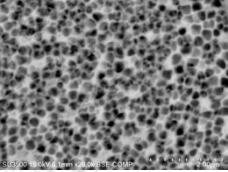
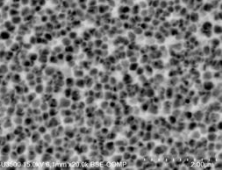
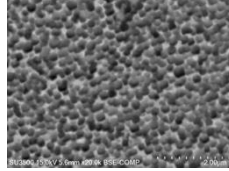
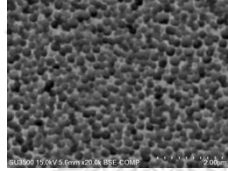
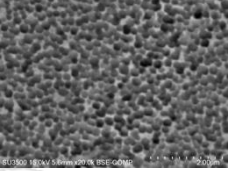
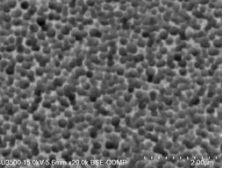
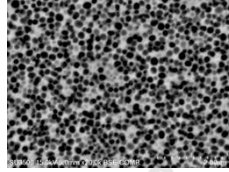
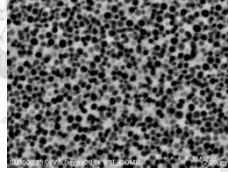
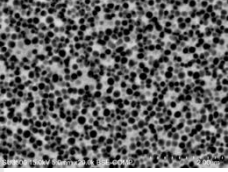
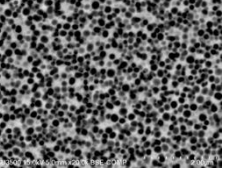
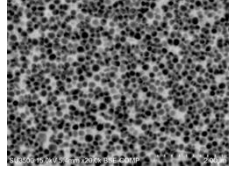
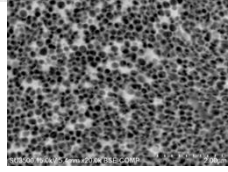
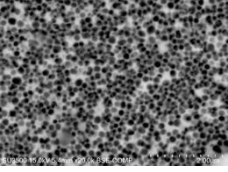
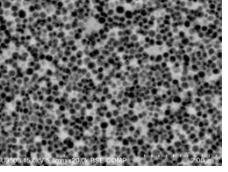
ชิ้นงาน	ภาพถ่าย SEM			
B1				
B2				
B3				
B4				
B5				
B6				

ภาคผนวก จ ภาพถ่าย SEM ของชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็ง (Aging)

จ1 ชิ้นงาน A

ชิ้นงาน	ภาพถ่าย SEM			
A1				
A2				
A3				
A4				
A5				
A6				

จ2 ชิ้นงาน B

ชิ้นงาน	ภาพถ่าย SEM			
B1				
B2				
B3				
B4				
B5				
B6				

ภาคผนวก ฉ ชิ้นงานที่ได้รับมา (As Received)

ฉ1 ขนาดอนุภาคแกมมาไพรม์โดยใช้โปรแกรม Image Analysis

ชิ้นงาน	ขนาดอนุภาคแกมมาไพรม์ (μm^2)				
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	วัดครั้งที่ 4	เฉลี่ย
A1	0.1234	0.144	0.1013	0.1249	0.1234
A2	0.1217	0.1358	0.1562	0.1119	0.1314
A3	0.146	0.1276	0.1443	0.1148	0.13318
A4	0.1055	0.0967	0.1112	0.1102	0.1059
A5	0.1007	0.097	0.0919	0.0993	0.09723
A6	0.0979	0.1069	0.0912	0.0712	0.0918
B1	1.8232	1.7053	1.2988	1.637	1.61608
B2	2.8444	2.0384	2.2421	2.1159	2.3102
B3	1.8032	1.8129	1.6294	-	1.7485
B4	1.7085	1.621555556	1.7651	1.8183	1.72836
B5	1.6803	1.6549	0.8601	1.0293	1.30615
B6	1.6637	1.0598	1.2407	1.1292	1.27335

ฉ2 ค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่โดยใช้โปรแกรม Image Analysis

ชิ้นงาน	ขนาดอนุภาคแกมมาไพรม์ (μm^2)				
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	วัดครั้งที่ 4	เฉลี่ย
A1	33.568	39.796	40.562	39.814	38.435
A2	32.71	37.248	41.137	38.994	37.522
A3	39.477	43.858	48.208	41.101	43.161
A4	41.755	41.392	43.012	40.021	41.545
A5	42.188	42.978	41.519	41.153	41.96
A6	43.984	34.783	43.803	30.88	38.363
B1	41.938	35.929	36.953	36.774	37.899
B2	37.044	32.536	34.061	34.57	34.553
B3	36.933	26.144	35.152	-	32.743
B4	29.068	27.366	32.231	31.975	30.16

B5	29.972	24.01	31.684	40.066	31.433
B6	31.609	29.177	35.966	33.94	32.673

ฉ3 ค่าความกลมโดยใช้โปรแกรม Image Analysis

ชิ้นงาน	ขนาดอนุภาคแกมมาไพรม์ (μm^2)				
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	วัดครั้งที่ 4	เฉลี่ย
A1	0.924	0.752	0.798	0.808	0.821
A2	0.794	0.787	0.853	0.835	0.817
A3	0.819	0.784	0.803	0.758	0.791
A4	0.76	0.838	0.818	0.824	0.81
A5	0.771	0.786	0.783	0.793	0.783
A6	0.755	0.707	0.739	0.768	0.742
B1	0.906	0.828	0.733	0.734	0.8
B2	0.888	0.881	0.883	0.88	0.883
B3	0.945	0.854	0.934	-	0.911
B4	0.85	0.934	0.852	0.903	0.885
B5	0.822	0.855	0.859	0.873	0.852
B6	0.863	0.926	0.851	0.859	0.875

ภาคผนวก ข ชั้นงานที่ผ่านการทำละลาย (Solutioning)

ข1 ขนาดอนุภาคแกมมาไพรม์โดยใช้โปรแกรม Image Analysis

ชั้นงาน	ขนาดอนุภาคแกมมาไพรม์ (μm^2)				
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	วัดครั้งที่ 4	เฉลี่ย
A1	0.0079	0.0115	0.0202		0.0132
A2	0.0721	0.0532	0.061	0.0759	0.06555
A3	0.0584	0.0678	0.0659	0.066	0.06453
A4	0.0404	0.0401	0.0396	0.0352	0.03883
A5	0.0389	0.0345	0.0325	0.0287	0.03365
A6	0.0291	0.0266	0.0251	0.0258	0.02665
B1	0.0079	0.0071	0.0066	0.0064	0.007
B2	0.0239	0.0202	0.0219	0.0245	0.02263
B3	0.0359	0.0286	0.0339	0.03322222	0.03291
B4		0.0186	0.0217	0.0249	0.02173
B5	0.0949	0.1046	0.0883		0.09593
B6			0.0092	0.0085	0.00885

ข2 ค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่โดยใช้โปรแกรม Image Analysis

ชั้นงาน	ขนาดอนุภาคแกมมาไพรม์ (μm^2)				
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	วัดครั้งที่ 4	เฉลี่ย
A1	33.928	41.352	55.413		43.564
A2	53.709	55.043	49.756	44.628	50.784
A3	58.511	55.219	56.07	51.72	55.38
A4	88.547	85.98	88.176	91.191	88.474
A5	51.674	51.177	52.873	47.557	50.82
A6	56.677	54.464	51.863	52.338	53.836
B1	40.196	45.323	45.46	45.822	44.2
B2	57.248	59.742	59.803	51.177	56.993
B3	57.644	55.085	58.725	54.271	56.431
B4		53.377	51.671	62.619	55.889

B5	33.782	41.853	28.374		34.67
B6			56.85	60.06	58.455

ช3 ค่าความกลมโดยใช้โปรแกรม Image Analysis

ชิ้นงาน	ขนาดอนุภาคแกมมาไพรม์ (μm^2)				
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	วัดครั้งที่ 4	เฉลี่ย
A1	0.783	0.769	0.642	-	0.731
A2	0.716	0.821	0.734	0.888	0.79
A3	0.628	0.725	0.685	0.676	0.679
A4	0.809	0.884	0.938	0.847	0.87
A5	0.791	0.783	0.791	0.617	0.746
A6	0.694	0.745	0.771	0.728	0.735
B1	0.831	0.803	0.812	0.839	0.821
B2	0.769	0.85	0.779	0.758	0.789
B3	0.799	0.763	0.773	0.783	0.78
B4	-	0.743	0.74	0.746	0.743
B5	0.708	0.798	0.759	-	0.755
B6	-	-	0.764	0.769	0.767

ภาคผนวก ข ชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็ง (Aging)

ข1 ขนาดอนุภาคแกมมาไพรม์โดยใช้โปรแกรม Image Analysis

ชิ้นงาน	ขนาดอนุภาคแกมมาไพรม์ (μm^2)				
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	วัดครั้งที่ 4	เฉลี่ย
A1	0.0352	0.0357	0.0362	0.0382	0.03633
A2	0.043	0.0388	0.05444444	0.0618	0.04951
A3	0.0556	0.0536	0.0463	0.0468	0.05058
A4	0.0323	0.0337	0.0361	0.03444444	0.03414
A5	0.029	0.0289	0.0298	0.0301	0.02945
A6	0.0242	0.0237	0.0253	0.025	0.02455
B1	0.0215	0.0282	0.00335989	0.0283	0.02034
B2	0.03766667	0.0437	0.0397	0.0382	0.03982
B3	0.03744444	0.0351	0.0354	0.0344	0.03559
B4	0.03086747	0.0292	0.0308	0.0328	0.03092
B5	0.0221	0.0227	0.0212	0.0214	0.02185
B6	0.0185	0.0203	0.0207	0.0203	0.01995

ข2 ค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่โดยใช้โปรแกรม Image Analysis

ชิ้นงาน	ขนาดอนุภาคแกมมาไพรม์ (μm^2)				
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	วัดครั้งที่ 4	เฉลี่ย
A1	46.196	43.788	45.461	45.189	45.159
A2	48.924	44.027	47.169	47.296	46.854
A3	48.468	47.513	46.728	52.512	48.805
A4	56.991	58.669	58.058	55.342	57.265
A5	53.364	55.8	61.285	59.708	57.539
A6	51.375	47.837	55.259	48.742	50.803
B1	48.398	49.178	53.146	59.274	52.499
B2	54.855	54.855	53.059	53.525	54.074
B3	55.685	53.528	54.82	44.556	52.147

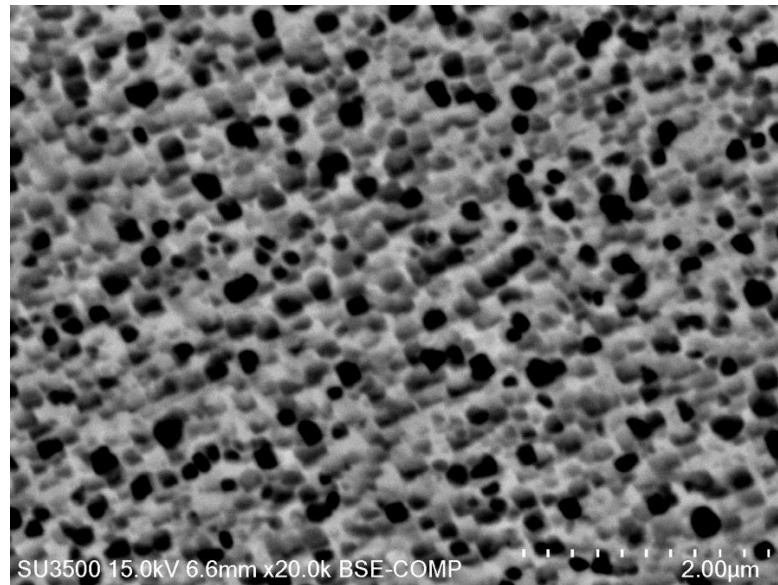
B4	57.619	60.604	59.023	58.968	59.054
B5	51.211	47.374	48.433	53.222	50.06
B6	51.707	52.689	48.457	49.183	50.509

ซ3 ค่าความกลมโดยใช้โปรแกรม Image Analysis

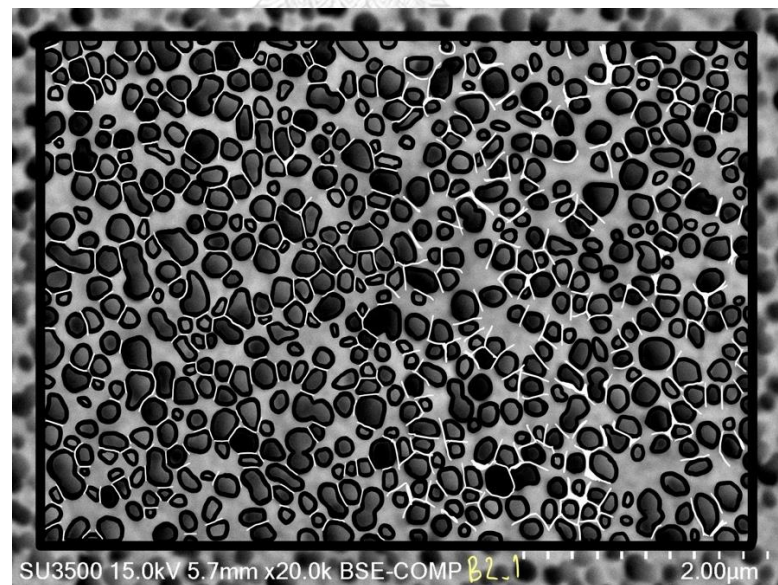
ชิ้นงาน	ขนาดอนุภาคแกมมาไพรม์ (μm^2)				
	วัดครั้งที่ 1	วัดครั้งที่ 2	วัดครั้งที่ 3	วัดครั้งที่ 4	เฉลี่ย
A1	0.851	0.868	0.856	0.858	0.858
A2	0.852	0.841	0.849	0.848	0.848
A3	0.814	0.805	0.818	0.799	0.809
A4	0.852	0.842	0.847	0.853	0.849
A5	0.825	0.816	0.82	0.806	0.817
A6	0.807	0.872	0.865	0.864	0.852
B1	0.839	0.841	0.824	0.826	0.833
B2	0.849	0.858	0.863	0.86	0.858
B3	0.822	0.827	0.802	0.838	0.822
B4	0.827	0.846	0.85	0.862	0.846
B5	0.825	0.812	0.82	0.798	0.814
B6	0.816	0.741	0.845	0.848	0.813

ภาคผนวก ฅ การใช้งานโปรแกรม Image Analysis (ImageJ)

นำรูปภาพตัวอย่างตามภาพ ฅ.1 มาตัดเส้นโดยใช้เส้นสีดำตามขอบของอนุภาคแกมมาไพร์ม และใช้เส้นสีขาวบางๆกั้นระหว่างอนุภาค เพื่อให้ภาพมีความชัดมากขึ้นตามภาพ ฅ.2



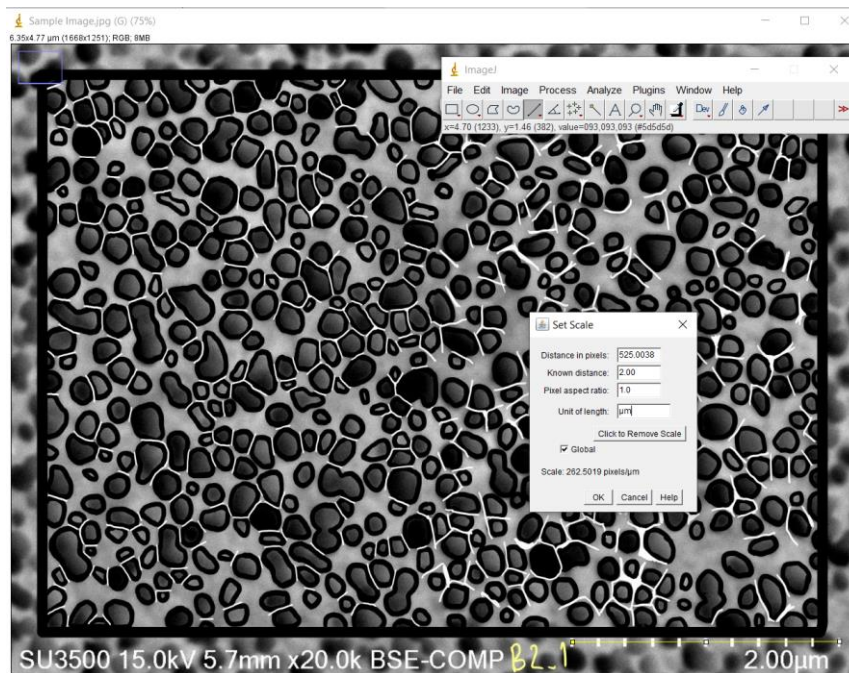
ภาพที่ ฅ.1 ภาพ SEM ต้นฉบับ



ภาพที่ ฅ.2 ภาพ SEM ที่ผ่านการตัดเส้นแล้ว

นำภาพที่ผ่านการตัดเส้นแล้วมาเปิดในโปรแกรม ImageJ

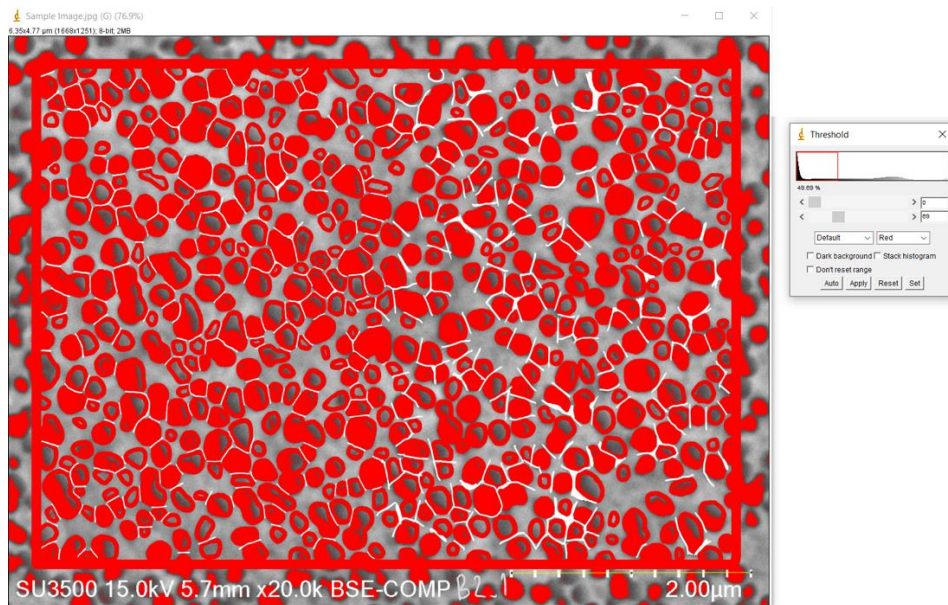
ตั้งค่าสเกลของภาพโดยใช้ Line tool ลากตามขีดของสเกลตั้งแต่ขีดแรกจนถึงขีดสุดท้าย จากนั้นไปที่เมนู Set Scale แล้วแก้ไขค่า Known Distance และ Unit of length ให้เป็นไปตามสเกลของภาพที่ต้องการ ตามภาพ ฅ.3



ภาพที่ ฅ.3 การตั้งค่าสเกล

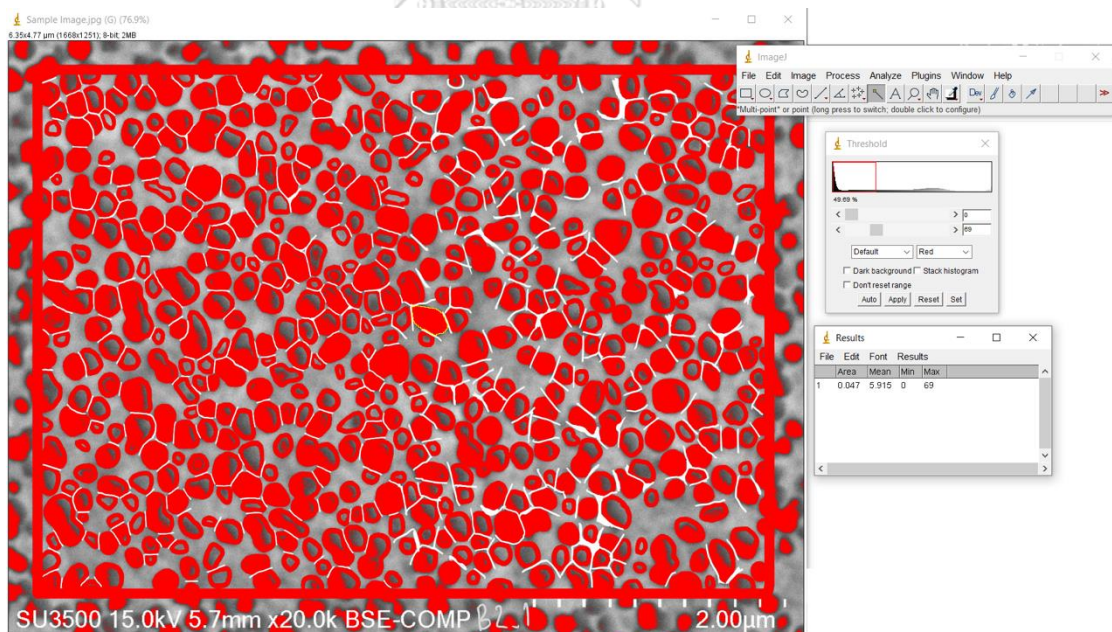
เปลี่ยนประเภทของภาพเป็น 8-bit โดยคลิกที่เมนู Image > Type > 8-bit

ปรับ threshold ให้เหมาะสมโดยดูจากอนุภาคแกมมาไปพร้อมไม่รวมกันเป็นชั้นเดียวและไม่มี noise กระจายบนเนื้อพื้น ตามภาพ ฅ.4



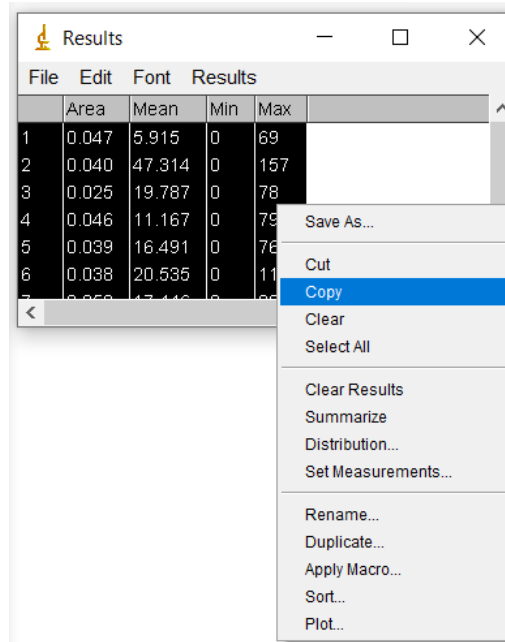
ภาพที่ ฌ.4 การปรับ threshold ให้เหมาะสม

สำหรับการหาค่าขนาดอนุภาคแกมมาไพรม์นั้น เลือกที่ Wand tool แล้วเลือกอนุภาคแกมมาไพรม์แบบสุ่มขึ้นมาจำนวนหนึ่ง



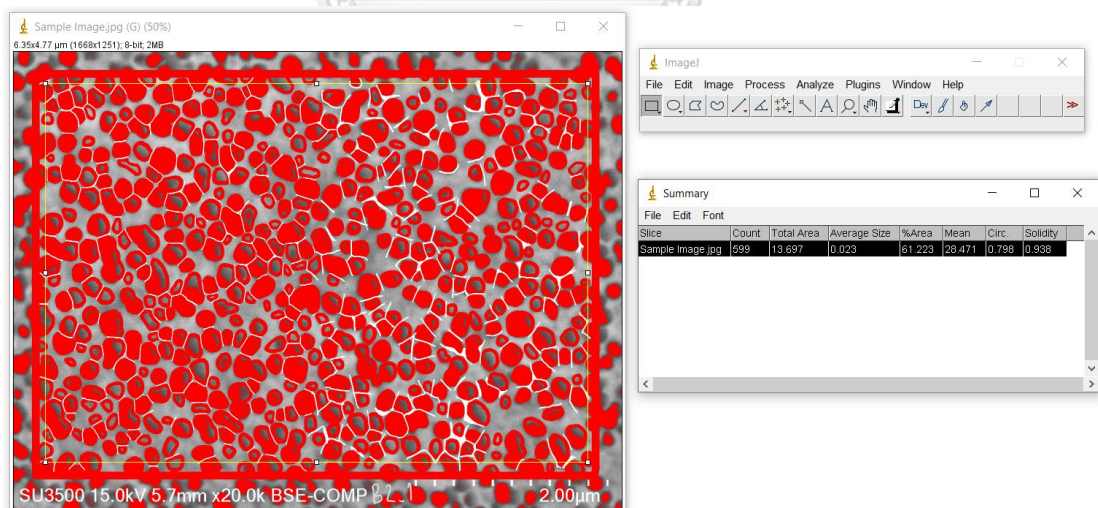
ภาพที่ ฌ.5 การเลือกอนุภาคแกมมาไพรม์แบบเฉลี่ย

นำค่าที่เลือกไว้ทั้งหมดมาหาค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคแกมมาไพรม์ โดยการคัดลอกค่าไปคำนวณในโปรแกรม Microsoft Excel



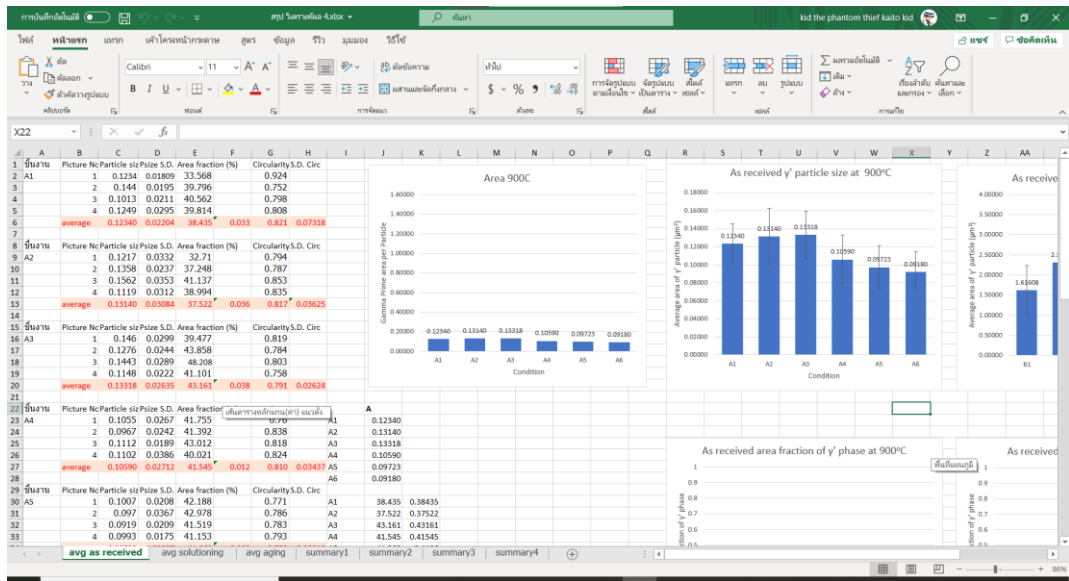
ภาพที่ ฌ.6 การนำค่าที่เลือกไว้จาก ImageJ ไปหาค่าเฉลี่ย

หาค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่เฉลี่ยของแกมมาไพรม์ และค่าความกลมโดยคลิกที่ Rectangular แล้วลากครอบทั้งรูปแบบไมโครกรอบสีเหลี่ยมที่ร่างไว้ จากนั้นกด Analyze แล้วกด Analyze Particle จะได้ค่าเฉลี่ยรวมดังรูป ฌ.7



ภาพที่ ฌ.7 การหาค่าสัดส่วนเชิงพื้นที่เฉลี่ยของแกมมาไพรม์ และค่าความกลม

นำค่าทั้งหมดมาวิเคราะห์ในโปรแกรม Microsoft Excel



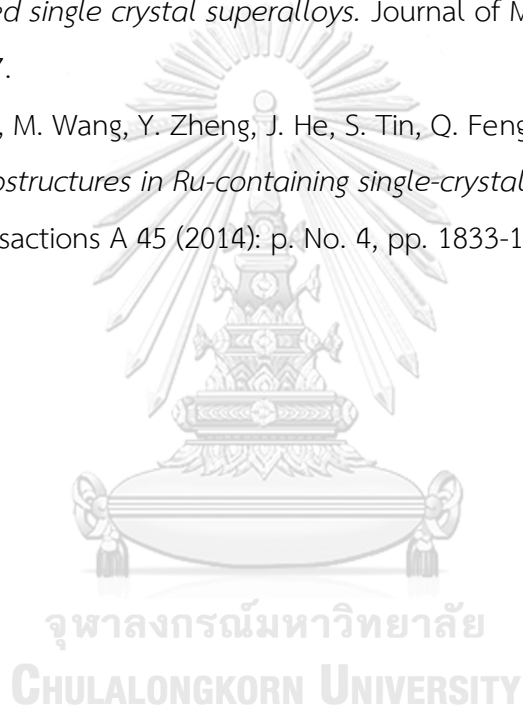
ภาพที่ ฌ.8 การวิเคราะห์ค่าต่างๆในโปรแกรม Microsoft Excel



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1. ว่างยาว, ป., เอกสารการสอนวิชา *High Temperature Material*. ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
2. Donachie M.J., a.D., S. J. , *Superalloys: a technical guide*. 2002., ASM international.
3. นิสารัตนพร, เอกสารคำสอนวิชาวัสดุโลหะ (*Metallic Material*). ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2557.
4. Ganji, D.K. and G. Rajyalakshmi, *Influence of Alloying Compositions on the Properties of Nickel-Based Superalloys: A Review*, in *Recent Advances in Mechanical Engineering*. 2020. p. 537-555.
5. Reed, R.C., *The superalloys: fundamentals and applications*. Cambridge university press, 2008.
6. Kim, Y., et al., *Microstructural Analysis of TMF Failure Mechanism of GTD-111 Applied to Gas Turbine Blades*. *Procedia Engineering*, 2013. 55: p. 204-209.
7. Turazi, A., et al., *Study of GTD-111 Superalloy Microstructural Evolution During High-Temperature Aging and After Rejuvenation Treatments*. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 2014. 4(1): p. 3-12.
8. Polsilapa, S., et al., *New Nickel Based Superalloys Development by Vacuum Arc Melting Process Based on Aluminum Addition of GTD-111*. *Advanced Materials Research*, 2014. 1025-1026: p. 455-460.
9. Wangyao, P., et al., *Effects of Aluminum Addition on Microstructural Characteristics in Modified Coated Nickel-Based Superalloy, GTD-111, by Arc Melting*. *Advanced Materials Research*, 2015. 1101: p. 129-133.
10. Wangyao, P., et al., *Effect of Al Addition in Cast Nickel Base Superalloy, GTD-111 on Microstructures and Oxidation Behaviors at 900°C and 1000°C*. *Applied Mechanics and Materials*, 2014. 548-549: p. 268-273.
11. Sajjadi, S.A., et al., *Microstructure evolution of high-performance Ni-base superalloy GTD-111 with heat treatment parameters*. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006. 175(1-3): p. 376-381.

12. WANGYAO, P., *The Relationship Between Reheat-Treatment and Hardness Behaviour of Cast Nickel Superalloy, GTD-111*. Journal of Materials and Minerals, 2006: p. Vol.16 No.1: 55-62.
13. เกียรติวิศาลกิจ, น., ผลของการเติมโคบอลต์และนิกเกิลในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นนิกเกิลเกรดจีทีดี-111 ที่เติมอะลูมิเนียม 1% โดยน้ำหนัก และเตรียมด้วยกรรมวิธีการหลอมแบบอาร์ค ต่อโครงสร้างจุลภาคและความเสถียรของเฟสแกมมาไพร์ม, in ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ. 2562: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
14. Wang, B., et al., *Effect of Co on microstructural stability of the third generation Ni-based single crystal superalloys*. Journal of Materials Research, 2016. 31(9): p. 1328-1337.
15. Q. Shi, X.D., M. Wang, Y. Zheng, J. He, S. Tin, Q. Feng, *Co effect on as-cast and heat treated microstructures in Ru-containing single-crystal superalloys*. Metallurgical and Materials Transactions A 45 (2014): p. No. 4, pp. 1833-1843.



บรรณานุกรม



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	Vara Vacharatanon
วัน เดือน ปี เกิด	19 Feb 1994
สถานที่เกิด	Bangkok
วุฒิการศึกษา	Bachelor degree at Chulalongkorn Faculty of Engineering department of Metallurgical Engineering
ที่อยู่ปัจจุบัน	-
ผลงานตีพิมพ์	-
รางวัลที่ได้รับ	-



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY