

ผลของการเติมอะลูมิเนียมและไทเทเนียมในโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X ที่ผลิตด้วยการ
หลอมอาร์กต่อโครงสร้างจุลภาคและความต้านทานการเกิดออกซิเดชัน



นางสาวปจรรย์ ศรีเกี่ยวฝัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการและวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

EFFECTS OF ALUMINIUM AND TITANIUM ADDITIONS ON MICROSTRUCTURES AND
HIGH TEMPERATURE OXIDATION RESISTANCE OF HASTELLOY X PRODUCED BY ARC
MELTING

Miss Pajaree Srigiofun



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

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

Engineering

Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลของการเติมอะลูมิเนียมและไทเทเนียมในโลหะผสม
พิเศษเกรด Hastelloy X ที่ผลิตด้วยการหลอมอาร์กต่อ
โครงสร้างจุลภาคและความต้านทานการเกิดออกซิเดชัน

โดย

นางสาวปาจริย์ ศรีเกี่ยวฝัน

สาขาวิชา

วิศวกรรมโลหการและวัสดุ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

อาจารย์ ดร. ปัญญวัชร ว่างยาว

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. กอบบุญ หล่อทองคำ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์ ดร. ปัญญวัชร ว่างยาว)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ชากร จารุพิสิฐธร)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุวีรัตน์ ผลศิลป์)

ปาจารย์ ศรีเกียรติ : ผลของการเติมอะลูมิเนียมและไทเทเนียมในโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X ที่ผลิตด้วยการหลอมอาร์กต่อโครงสร้างจุลภาคและความต้านทานการเกิดออกซิเดชัน. (EFFECTS OF ALUMINIUM AND TITANIUM ADDITIONS ON MICROSTRUCTURES AND HIGH TEMPERATURE OXIDATION RESISTANCE OF HASTELLOY X PRODUCED BY ARC MELTING) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ.ดร. ปัญญวัชร วังยาว, 90 หน้า.

งานวิจัยนี้มีความพยายามปรับปรุงโลหะผสมพิเศษเกรดนิกเกิลที่มีความแข็งแรงแบบสารละลายของแข็งเกรด Hastelloy X โดยการเพิ่มส่วนผสมอะลูมิเนียม ไทเทเนียมและอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียม (ในอัตราส่วน 50:50) เพื่อทำให้เกิดการตกตะกอนของสารประกอบเชิงโลหะ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูง ชิ้นงานถูกหลอมและหล่อในเตาอาร์กสุญญากาศ ปริมาณการเติมอะลูมิเนียม ไทเทเนียม และอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียม ใน Hastelloy X คือ 2, 4 และ 6% โดยน้ำหนัก ชิ้นงานที่ผ่านการหลอมทุกชิ้นจะผ่านกรรมวิธีทางความร้อนโดยการอบละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง และบ่มแข็งที่ 760, 800 และ 845 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นทุกชิ้นงานจะถูกตรวจสอบส่วนผสมเคมีโดยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ ตรวจสอบและวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวด และเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ นอกจากนี้ชิ้นงานที่ถูกเลือกจะถูกทดสอบออกซิเดชันที่ 900 และ 1,000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมง วิเคราะห์ชั้นฟิล์มออกไซด์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคพบว่าธาตุที่เติมลงไปจะเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคอย่างชัดเจน การเพิ่มปริมาณธาตุที่ผสมส่งผลทำให้เกิดการตกตะกอนของสารประกอบเชิงโลหะในปริมาณที่มาก เช่น เฟสซิกมาและเฟสอีต้า ส่วนเฟสแกมมาไพรมพบในชิ้นงานที่มีการเติมอะลูมิเนียม ชิ้นงานที่มีการเติมอะลูมิเนียมอย่างเดียวมีความต้านทานการเกิดออกซิเดชันดีที่สุด พบชั้นฟิล์มอะลูมินาในชิ้นงานที่มีการเติมอะลูมิเนียมอย่างเดียว พบชั้นฟิล์มไทเทเนียมออกไซด์ในชิ้นงานที่มีการเติมไทเทเนียมและอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียม

ภาควิชา วิศวกรรมโลหการ

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการและวัสดุ

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ปีการศึกษา 2556

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยคำแนะนำและความช่วยเหลือของ อาจารย์ ดร. ปัญญาวัชร วั่งยาว ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงที่ท่านได้อบรมสั่งสอนถ่ายทอดความรู้คำแนะนำทั้งลำดับขั้นตอนการทำงานวิธีการคิดการแก้ไขปัญหาชี้แนะแนวทางกาดำเนินงานวิจัย รวมทั้งตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. กอบบุญ หล่อทองคำซึ่งเป็นประธานคณะกรรมการสอบที่ท่านได้อบรมสั่งสอนและให้คำแนะนำรวมทั้งตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ชากร จารุพิสิฐธรซึ่งเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรวิรัตน์ ผลศิลป์ ซึ่งเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ภายนอกมหาวิทยาลัยที่สละเวลาเพื่อเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการเขียนเล่มวิทยานิพนธ์นี้ ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่านที่ให้ความรู้ทั้งในตำราและการใช้ชีวิตประจำวัน รวมทั้งคอยให้กำลังใจข้าพเจ้าจนกระทั่งสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ธุรการภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่านที่ให้คำแนะนำและอำนวยความสะดวกแก่ข้าพเจ้ามาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณพี่ธญา พิพัฒน์กุล เจ้าหน้าที่ฝ่ายวิจัย สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทยที่คอยให้ความช่วยเหลือและดูแลในการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดและการใช้เครื่องตัดละเอียด ขอขอบพระคุณ บุคลากรของสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุที่ให้ความกรุณาในการทดสอบชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดและการทดสอบ XRD ขอขอบพระคุณ คุณจรัสจันอินทร์ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมขั้นรูปโลหะ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ช่วยเหลือในเรื่องการอบชิ้นงานและการทดสอบออกซิเดชันจนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยดี ขอขอบพระคุณทุน RU ของสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุที่ให้ทุนการศึกษาแก่ข้าพเจ้าเป็นค่าช่วยวิจัยในระดับปริญญาโทและใช้จ่ายอุดหนุนงานวิจัยในการศึกษาระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต ขอขอบคุณ นาวสาวณัฐนิชา เต็งอำนวยและนายธนกร เลิศจิระกุล มหาบัณฑิตภาควิชาโลหการที่ให้ความช่วยเหลือและตรวจสอบการเขียนวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้าเป็นอย่างดีเสมอมา ขอขอบคุณนางสาวกุลนรี ฤทธิ์แดงและนางสาวกมลชนก ทิพย์รัต ที่คอยเป็นกำลังใจและช่วยเหลืองานในทุกๆด้านตลอดงานวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาอันเป็นที่เคารพรักของข้าพเจ้าที่คอยให้ความรักกำลังใจ และสนับสนุนด้านการศึกษามาโดยตลอด และขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่น้องที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีที่ให้ความช่วยเหลือข้าพเจ้าเป็นอย่างดีเสมอมา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	1
สารบัญภาพ.....	1
บทที่ 1	1
บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์	4
2.1 โลหะผสมพิเศษ	4
2.1.1 พัฒนาการของโลหะผสมพิเศษ	4
2.2 ชนิดของโลหะผสมพิเศษ.....	4
2.2.1 โลหะผสมพิเศษกลุ่มนิกเกิล	4
2.2.2 โลหะผสมพิเศษกลุ่มนิกเกิล-เหล็ก.....	5
2.2.3 โลหะผสมพิเศษกลุ่มโคบอลต์.....	5
2.3 สมบัติต่างๆของโลหะผสมพิเศษ.....	5
2.3.1 สมบัติทางกล	5
2.3.2 ลักษณะทางกายภาพ.....	6
2.3.1 บทบาทของธาตุต่างๆในโลหะผสมพิเศษ Hastelloy X	8
2.4 โครงสร้างจุลภาคและเฟสของโลหะผสมพิเศษ	11
2.4.1 เนื้อพื้น	11
2.4.2 คาร์ไบต์.....	12
2.4.3 TCP phase.....	12

2.5 สมบัติทั่วไปของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นนิกเกิล	12
2.6 สมบัติทั่วไปของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นนิกเกิลเกรด Hastelloy X	13
2.7 ความต้านทานการเกิดออกซิเดชัน	13
2.8 กรรมวิธีทางความร้อน	14
2.8.1 การอบอ่อน	14
2.8.2 การทำสารละลายเนื้อเดียว (solution treating)	15
2.8.3 การอบอ่อนเพื่อการละลายเฟส (solution annealing)	15
2.8.4 การอบชุบตกตะกอน (precipitation treatment).....	15
2.9 ความแข็ง.....	16
2.10 ปริทัศน์วรรณกรรม.....	17
2.10.1 การตกตะกอนของเฟสและอุณหภูมิและเวลาของการเปลี่ยนรูปของโลหะผสมพิเศษ เกรด Hastelloy X.....	17
2.10.2 อิทธิพลของการเติมโคบอลต์และไทเทเนียมในโครงสร้างจุลภาคและแรงอัดของโลหะ ผสมพิเศษเกรด Udimet710	20
2.10.3 วิวัฒนาการของโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของการปรับไทเทเนียมในโลหะ ผสมพิเศษเกรด Nimonic 80A.....	22
2.10.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่างไทเทเนียมและอะลูมิเนียมและสมบัติของการ แตกหักในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นนิกเกิล	27
2.11 ออกซิเดชันในโลหะผสมพิเศษ	30
2.11.1 ผลของอุณหภูมิ	31
2.11.2 การทดสอบแบบเร่ง.....	32
2.11.3 ผลของเวลา	33
2.11.4. ผลของธาตุผสม	34
บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการทดลอง.....	36
3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้สำหรับทำงานวิจัย	36
3.1.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงาน	36
3.1.2 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้สำหรับเตรียมผิวชิ้นงาน	36
3.1.3 เครื่องมือทดสอบชิ้นงาน	36

3.1.4 เครื่องมือวิเคราะห์ชิ้นงาน.....	36
3.2 วิธีดำเนินการทดลอง	36
3.3 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค	39
3.4 การทดสอบอัตราการเกิดออกซิเดชัน.....	39
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล	41
4.1 การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X และเกรดใหม่ภายหลังการ หลอมแบบอาร์คด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence; XRF).....	41
4.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะของโครงสร้างจุลภาค.....	42
4.2.1.วิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์แสง.....	42
4.2.2 การวิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกาวด	49
4.3 การวิเคราะห์ธาตุ.....	56
4.4 การวิเคราะห์เฟส.....	63
4.4.1 ชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X ภายหลังการหล่อแบบอาร์ค และผ่านการ ทำละลาย	63
4.4.2 ชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X ที่เติมอะลูมิเนียมปริมาณ 6% โดยน้ำหนัก ภายหลังการหล่อแบบอาร์ค การทำละลาย และผ่านการบ่มแข็ง	64
4.4.3 ชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X ที่เติมไทเทเนียมปริมาณ 6% โดยน้ำหนัก ภายหลังการหล่อแบบอาร์ค การทำละลาย และผ่านการบ่มแข็ง	65
4.4.4 ชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X ที่เติมอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียมปริมาณ 6% โดยน้ำหนัก ภายหลังการหล่อแบบอาร์ค การทำละลาย และผ่านการบ่มแข็ง....	66
4.5 ปัจจัยของธาตุผสมที่มีผลต่อการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูง	67
4.5.1 การทดสอบออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมง	67
4.5.2 ผลจากการทดสอบออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมง	71
4.6 ผลการวิเคราะห์ชั้นฟิล์มออกไซด์	75
4.6.1 กลไกการเกิดชั้นฟิล์มออกไซด์	77
4.7 โครงสร้างจุลภาคเปรียบเทียบการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมงและบ่มแข็งที่ 845 องศาเซลเซียสกับชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบออกซิเดชันที่ 900 และ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมงดังแสดงในภาพที่ 4.40	79
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	81

ญ

หน้า

รายการอ้างอิง 83

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 90



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมพิเศษ Hastelloy X	7
ตารางที่ 2.2 บทบาทของธาตุต่างๆในโลหะผสมพิเศษ Hastelloy X	7
ตารางที่ 2.3 แสดงธาตุผสมหลักที่เติมลงในโลหะผสมพิเศษ	11
ตารางที่ 2.4 สมบัติทั่วไปของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิล	12
ตารางที่ 2.5 สมบัติทั่วไปของโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X	13
ตารางที่ 2.6 เปรียบเทียบการต้านทานออกซิเดชันของโลหะผสมพิเศษเกรดต่างๆ	14
ตารางที่ 2.7 เปรียบเทียบ hot corrosion resistance ของโลหะผสมพิเศษเกรดต่างๆ	14
ตารางที่ 2.8 อุณหภูมิที่ใช้ในการอบอ่อนสำหรับโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X	15
ตารางที่ 2.9 อุณหภูมิและความแข็งแรงหลังจากผ่านกระบวนการทางความร้อนโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X.....	15
ตารางที่ 2.10 เปรียบเทียบความแข็งแรงที่ได้จากการบ่มแข็ง (aging) ที่อุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกัน	16
ตารางที่ 2.11 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X.....	17
ตารางที่ 2.12 แสดงส่วนผสมของโลหะผสมพิเศษเกรด Udimet 710 ที่ใช้ในการทดลอง	20
ตารางที่ 2.13 แสดงส่วนผสมของโลหะผสมพิเศษเกรด Nimonic 80	22
ตารางที่ 2.14 ส่วนผสมของธาตุที่ใช้ในการทดลอง	27
ตารางที่ 2.15 ส่วนประกอบของโลหะผสมพิเศษต่างๆที่ใช้ในการสอบและผลของการทดสอบ ความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชัน	30
ตารางที่ 2.16 แสดงส่วนประกอบของโลหะผสมพิเศษต่างๆที่ใช้ในการทดสอบและผลของการทดสอบ ความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชัน	30
ตารางที่ 2.17 ผลของการทดสอบการต้านทานออกซิเดชันที่อุณหภูมิต่างกัน	31
ตารางที่ 2.18 ผลของการทดสอบแบบเร่งในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิลเกรดต่างๆ	32
ตารางที่ 3.1 ปริมาณสัดส่วนเป็นร้อยละโดยน้ำหนักของโลหะผสมพิเศษ ที่เป็นชิ้นงานตัวอย่างก่อนที่จะนำมาหลอม.....	37
ตารางที่ 4.1 แสดงส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X และเกรดใหม่ภายหลัง การหลอมแบบอาร์ค และวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์.....	41

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2.1 ธาตุต่างๆที่มีผลโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล	7
ภาพที่ 2.2 การเพิ่มปริมาณของธาตุผสมต่างๆที่มีผลต่อโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล	10
ภาพที่ 2.3 เกรดต่างๆของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเมื่อได้รับการเติมธาตุผสมในปริมาณที่ แตกต่างกัน	10
ภาพที่ 2.4 ลักษณะของคาร์ไบด์ของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล	12
ภาพที่ 2.5 ตะกอนของ M_6C และ $M_{23}C_6$ ที่บริเวณขอบเกรนที่พบว่า ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 26 ชั่วโมง	17
ภาพที่ 2.6 ตะกอน M_6C ที่มีขนาดที่ใหญ่มากขึ้นรวมทั้งพบ $M_{23}C_6$ ที่ละเอียดที่พบที่ขอบเกรน	18
ภาพที่ 2.7 พบ M_6C และเฟสซิกมาและเฟสมีว และการตกตะกอนของ $M_{23}C_6$ ที่อุณหภูมิ 850 องศา เซลเซียสเป็นเวลา 26 ชั่วโมง	18
ภาพที่ 2.8 การตกตะกอนของ M_6C $M_{23}C_6$ เฟสซิกมาและเฟสมีว ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ..	19
ภาพที่ 2.9 การตกตะกอนของ M_6C ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 26 ชั่วโมง	19
ภาพที่ 2.10 การตกตะกอนของ M_6C พบเฟสซิกมาและเฟสมีวที่บริเวณขอบเกรน และพบการ ตกตะกอนของ $M_{23}C_6$ ภายในโครงสร้างของ M_6C ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง	20
ภาพที่ 2.11 ลักษณะสัณฐานของเฟส γ' ในโลหะผสมพิเศษ	21
ภาพที่ 2.12 โครงสร้างของโลหะผสมพิเศษโดยใช้เครื่องอิเล็กทรอนิกส์แบบส่องกวาด	21
ภาพที่ 2.13 ผลการทดสอบด้วย XRD	22
ภาพที่ 2.14 ผลของ ultimate tensile strength yield strength total elongation และ reduction in area	23
ภาพที่ 2.15 ตรวจสอบโครงสร้างหลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อน	24
ภาพที่ 2.16 ตรวจสอบโครงสร้างด้วยเครื่องอิเล็กทรอนิกส์แบบส่องผ่าน พบเฟสของ γ' และ γ ของ 1.8ของไทเทเนียม 2.25ของไทเทเนียมและ 2.7ของไทเทเนียม	25
ภาพที่ 2.17 สมบัติต่างๆของเฟสแกมมาไพร์ม (γ')	26
ภาพที่ 2.18 กราฟ stress rupture ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส	27
ภาพที่ 2.19 เปรียบเทียบขนาดของ γ' หลังจากผ่านกระบวนการทางความร้อน	28
ภาพที่ 2.20 บริเวณพื้นผิวของชิ้นงานที่มีอัตราส่วนของไทเทเนียม	28
ภาพที่ 2.21 การตกตะกอนของเฟส β -NiAl ในเนื้อพื้น	29

ภาพที่ 2.22 การแทรกตัวของ η -Ni ₃ Ti ที่บริเวณขอบเกรน โดยที่เฟสของ η -Ni ₃ Ti มีโครงสร้างเป็นเฮกซะโกนอล ซึ่งเป็นเฟสที่อันตรายต่อโครงสร้างเนื่องจาก จะทำให้มีความแข็งแรงที่ลดลง	29
ภาพที่ 2.23 ความสัมพันธ์ของพลังงานกระตุ้นสำหรับออกซิเดชัน	31
ภาพที่ 2.24 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการต้านทานการเกิดออกซิเดชัน	32
ภาพที่ 2.25 ผลของเวลาต่อการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส	33
ภาพที่ 2.26 ชนิดของออกซิเดชันหลังจาก 10,000 ชั่วโมงที่ 1000 องศาเซลเซียส	34
ภาพที่ 2.27 ผลของธาตุผสมที่มีผลต่อการเกิดออกซิเดชัน	34
ภาพที่ 3.1 เตาอาร์กสลุญญากาศ (Arc Melting Furnace) และแม่พิมพ์ที่ใช้ในการหลอม	38
ภาพที่ 3.2 ชิ้นงานก่อนและหลังหล่อโดยเตาอาร์กสลุญญากาศ	38
ภาพที่ 3.3 เครื่องวิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบในสารตัวอย่าง โดยใช้การวัดปริมาณ	38
ภาพที่ 3.4 เป้าหลอมสำหรับใส่ชิ้นงานภายหลังจากการผ่านการทดสอบความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส	40
ภาพที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคโดยกล้องจุลทรรศน์แสงของชิ้นงาน Hastelloy x ผ่านการทำละลายที่ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	42
ภาพที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคโดยกล้องจุลทรรศน์แสงของชิ้นงานทั้ง 3 กลุ่ม ที่เติมอะลูมิเนียมไทเทเนียม และอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียม ตามลำดับ ในปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ 2% 4% และ 6% โดยน้ำหนัก โดยผ่านการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	43
ภาพที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคโดยกล้องจุลทรรศน์แสงของชิ้นงานทั้ง 3 กลุ่ม ที่เติมอะลูมิเนียมไทเทเนียม และอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียม ตามลำดับ ในปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ 2% 4% และ 6% โดยน้ำหนัก โดยผ่านการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และผ่านการบ่มแข็งอุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง	44
ภาพที่ 4.4 โครงสร้างจุลภาคโดยกล้องจุลทรรศน์แสงของชิ้นงานทั้ง 3 กลุ่ม ที่เติมอะลูมิเนียมไทเทเนียม และอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียม ตามลำดับ ในปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ 2% 4% และ 6% โดยน้ำหนัก โดยผ่านการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และผ่านการบ่มแข็งอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง	46
ภาพที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคโดยกล้องจุลทรรศน์แสงของชิ้นงานทั้ง 3 กลุ่ม ที่เติมอะลูมิเนียมไทเทเนียม และอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียม ตามลำดับ ในปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ 2% 4% และ 6% โดยน้ำหนัก โดยผ่านการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และผ่านการบ่มแข็งอุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง	48

- ภาพที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ของชิ้นงาน Hastelloy X ที่ผ่านการทำละลายที่ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และผ่านการบ่มแข็ง อุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง 50
- ภาพที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ของชิ้นงานทั้ง 3 กลุ่ม ที่เติมอะลูมิเนียม ไทเทเนียม และอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียม ตามลำดับ ในปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ 2% 4% และ 6% โดยน้ำหนัก โดยผ่านการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และผ่านการบ่มแข็งอุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง..... 51
- ภาพที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ของชิ้นงานทั้ง 3 กลุ่ม ที่เติมอะลูมิเนียม ไทเทเนียม และอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียม ตามลำดับ ในปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ 2% 4% และ 6% โดยน้ำหนัก โดยผ่านการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และผ่านการบ่มแข็งอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง..... 52
- ภาพที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด ของชิ้นงานทั้ง 3 กลุ่ม ที่เติมอะลูมิเนียม ไทเทเนียม และอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียม ตามลำดับ ในปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ 2% 4% และ 6% โดยน้ำหนัก โดยผ่านการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และผ่านการบ่มแข็งอุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง..... 54
- ภาพที่ 4. 10 Mapping Element ของชิ้นงาน Hastelloy X ที่ผ่านการทำละลายที่ 1175 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง..... 56
- ภาพที่ 4.11 Mapping Element ของชิ้นงาน Hastelloy X ที่มีการเติมอะลูมิเนียม ปริมาณ 6% โดยน้ำหนัก โดยผ่านการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง..... 57
- ภาพที่ 4.12 Mapping Element ของชิ้นงาน Hastelloy X ที่มีการเติมอะลูมิเนียม ปริมาณ 6% โดยน้ำหนัก โดยผ่านการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง..... 57
- ภาพที่ 4.13 Mapping Element ของชิ้นงาน Hastelloy X ที่มีการเติมอะลูมิเนียม ปริมาณ 6 % โดยน้ำหนัก โดยผ่านการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง..... 58

- ภาพที่ 4.14 Mapping Element ของชิ้นงาน Hastelloy X ที่มีการเติมไทเทเนียม ปริมาณ 6 % โดย น้ำหนัก โดยผ่านการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และ ผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง..... 59
- ภาพที่ 4.15 Mapping Element ของชิ้นงาน Hastelloy X ที่มีการเติมไทเทเนียม ที่ 6 % โดย น้ำหนัก โดยผ่านการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และ ผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง..... 59
- ภาพที่ 4.16 Mapping Element ของชิ้นงาน Hastelloy X ที่มีการเติมไทเทเนียม ที่ 6 % โดย น้ำหนัก โดยผ่านการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และ ผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง..... 60
- ภาพที่ 4.17 Mapping Element ของชิ้นงาน Hastelloy X ที่มีการเติมอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียม ปริมาณ 6 % โดยน้ำหนัก โดยผ่านการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง 61
- ภาพที่ 4.18 Mapping Element ของชิ้นงาน Hastelloy X ที่มีการเติมอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียม ปริมาณ 6 % โดยน้ำหนัก โดยผ่านการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง 61
- ภาพที่ 4.19 Mapping Element ของชิ้นงาน Hastelloy X ที่มีการเติมอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียม ปริมาณ 6 % โดยน้ำหนัก โดยผ่านการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง 62
- ภาพที่ 4.20 ผลจากการวิเคราะห์ด้วย X-Ray Diffractionmeter ของชิ้นงาน Hastelloy X โดยผ่าน การทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง 63
- ภาพที่ 4.21 ผลจากการวิเคราะห์ด้วย X-Ray Diffractionmeter ของชิ้นงาน Hastelloy X ที่เติม อะลูมิเนียมปริมาณ 6% โดยน้ำหนักโดยผ่านการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมงและบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง 64
- ภาพที่ 4.22 ผลจากการวิเคราะห์ด้วย X-Ray Diffractionmeter ของชิ้นงาน Hastelloy X ที่เติม ไทเทเนียมที่ 6% โดยน้ำหนักโดยผ่านการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียส เป็น เวลา 4 ชั่วโมงและบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง..... 65
- ภาพที่ 4.23 ผลจากการวิเคราะห์ด้วย X-Ray Diffractionmeter ของชิ้นงานที่เติมอะลูมิเนียมผสม ไทเทเนียมปริมาณ 6% โดยน้ำหนัก โดยผ่านการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง 66
- ภาพที่ 4.24 กราฟน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานโลหะผสมพิเศษ เกรด Hastelloy X จากการทดสอบ ออกซิเดชันอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมง..... 67

- ภาพที่ 4.25 กราฟน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X โดยการเติม อะลูมิเนียมปริมาณ 2% 4% และ 6% โดยน้ำหนัก จากการทดสอบออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมง..... 68
- ภาพที่ 4.26 กราฟน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเนื้อฟีนิกเกิลเกรด Hastelloy X โดยการเติมไทเทเนียมปริมาณ 2%, 4% และ 6% โดยน้ำหนัก และทำการทดสอบ ออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมง..... 69
- ภาพที่ 4.27 กราฟน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X โดยการเติม อะลูมิเนียมผสมไทเทเนียม ปริมาณ 2% 4% และ 6% โดยน้ำหนัก จากการทดสอบ ออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมง..... 70
- ภาพที่ 4.28 น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X จากการทดสอบ ออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมง..... 71
- ภาพที่ 4.29 น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X โดยการเติมอะลูมิเนียม ปริมาณ 2% 4% และ 6% โดยน้ำหนัก จากการทดสอบออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1000 องศา เซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมง 72
- ภาพที่ 4.30 กราฟน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X โดยการเติม ไทเทเนียมปริมาณ 2% 4% และ 6% โดยน้ำหนัก จากการทดสอบออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมง..... 73
- ภาพที่ 4.31 กราฟน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X โดยการเติม อะลูมิเนียมผสมไทเทเนียม ปริมาณ 2% 4% และ 6% โดยน้ำหนัก จากการทดสอบ ออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมง..... 74
- ภาพที่ 4.32 ผลจากการวิเคราะห์ด้วย X-Ray Diffractionmeter ที่ชั้นออกไซด์ฟิล์มของชิ้นงานโลหะ ผสมพิเศษเกรด Hastelloy X ที่เติมอะลูมิเนียม 6% โดยน้ำหนัก 75
- ภาพที่ 4.33 ผลจากการวิเคราะห์ด้วย X-Ray Diffractionmeter ที่ชั้นออกไซด์ฟิล์มของชิ้นงาน โลหะ ผสมพิเศษเกรด Hastelloy X ที่เติมไทเทเนียม 6% โดยน้ำหนัก ภายหลังจากทดสอบ ออกซิเดชันที่ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมง..... 76
- ภาพที่ 4.34 ผลจากการวิเคราะห์ด้วย X-Ray Diffractionmeter ที่ชั้นออกไซด์ฟิล์มของชิ้นงาน โลหะ ผสมพิเศษเกรด Hastelloy X ที่เติมอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียม 6% โดยน้ำหนัก ภายหลังจาก ทดสอบออกซิเดชันที่ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมง..... 76
- ภาพที่ 4.35 ชิ้นงานที่เติมอะลูมิเนียม 6% โดยน้ำหนักทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียส เป็น เวลา 4 ชั่วโมงและบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทดสอบ ออกซิเดชันที่ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมง..... 77

- ภาพที่ 4.36 ชิ้นงานที่เติมอะลูมิเนียม 6% โดยน้ำหนักทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมงและบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทดสอบออกซิเดชันที่ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมง 78
- ภาพที่ 4.37 ชิ้นงานที่เติมอะลูมิเนียม 6% โดยน้ำหนักทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมงและบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทดสอบออกซิเดชันที่ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมง 78
- ภาพที่ 4.38 เปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคระหว่างชิ้นงานที่บ่มแข็งที่อุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงกับชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบออกซิเดชันที่ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง 79

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

โลหะผสมพิเศษเนื้อพ่นนิกเกิลเกรด Hastelloy X มีสมบัติในการใช้งานที่อุณหภูมิสูงอีกทั้งยังมีสมบัติต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชันและความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูงได้ค่อนข้างดี สามารถรับแรงได้ดี ทนต่อความเคืบ และความล้าได้ดีเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูงๆ เหมาะสำหรับการใช้งานเกี่ยวกับชิ้นส่วนต่างๆในเตาทางอุตสาหกรรมและชิ้นส่วนของเครื่องบินที่ใช้งานที่อุณหภูมิสูงเช่น ส่วนหางของเครื่องยนต์ ใบพัดเทอร์โบ แต่เนื่องจากโครงสร้างของ Hastelloy X จะมีโครงสร้างที่มีแต่เฟสแกมมาที่สามารถทนต่อการเกิดออกซิเดชันและการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูง อีกทั้งยังมีคาร์ไบด์อยู่ในโครงสร้างเพื่อเพิ่มความแข็งแรงในระดับที่ยังไม่สูงมากนัก ดังนั้นเราจึงได้ทำการพัฒนาโดยเพิ่มสมบัติให้โลหะผสมพิเศษให้มีสมบัติที่ดีมากขึ้นโดยการเติมธาตุผสมอะลูมิเนียมและไทเทเนียมและทั้งอะลูมิเนียมผสมกับไทเทเนียมเข้าไปในโครงสร้างด้วย เนื่องจากธาตุผสมของ Hastelloy X มีส่วนผสมของนิกเกิลในปริมาณที่สูงมากดังนั้นการที่เราเติมธาตุผสมอะลูมิเนียมและไทเทเนียมเข้าไปจะทำให้เกิดการฟอร์มตัวเป็นแกมมาเฟิร์ม (Ni_3Ti, Al) เกิดการตกตะกอนออกมาโดยกลไกการตกตะกอนของแข็งเพื่อเพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงให้กับโลหะผสมชนิดใหม่นี้ โดยชิ้นงานที่นำมาใช้ในการทดลองเป็นชิ้นงานที่ได้รับมาจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตที่ไม่สามารถนำไปใช้งานได้อีกต่อไปหลังจากการใช้งานมานานและจะทำการจำหน่ายเป็นเศษโลหะ ดังนั้นเราจึงนำชิ้นงานมาทดลองและปรับปรุงให้มีสมบัติที่ดียิ่งขึ้นเพื่อที่อาจจะทำให้เกิดเป็นโลหะผสมพิเศษเกรดใหม่ที่สามารถนำไปใช้งานรับโหลดได้ที่อุณหภูมิที่สูงขึ้นอีกทั้งยังมีสมบัติการต้านทานการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูงได้ดียิ่งขึ้นด้วย

โดยงานวิจัยนี้มีแนวโน้มที่จะคิดทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาค ความต้านทานการเกิดออกซิเดชัน ทำการศึกษาอัตราการเกิดออกซิเดชันในอุณหภูมิที่ใช้งานที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียสที่ระยะเวลา 100 ชั่วโมง สำหรับการเลือกอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบความต้านทานการเกิดออกซิเดชัน เนื่องจากชิ้นงาน Hastelloy X ใช้งานที่ 1000 องศาเซลเซียสจะมีความโดดเด่นที่อุณหภูมินี้เป็นอย่างดี เปรียบเทียบน้ำหนักกับของชิ้นงานก่อนและหลังจากการทดสอบ และตรวจสอบผลของธาตุที่ผสมลงไป โดยตรวจสอบลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคและดูการกระจายตัวของเฟสต่างๆในเนื้อพ่นโลหะของโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X ที่มีการเติมธาตุผสมอะลูมิเนียมไทเทเนียมและอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียมในปริมาณต่างๆลงไปด้วยเทคนิคการหลอมแบบบออาร์ก

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาผลของธาตุผสมอะลูมิเนียม ไทเทเนียม และ อะลูมิเนียมผสมไทเทเนียมในปริมาณต่างๆที่เติมลงไปไนโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X ต่อลักษณะของโครงสร้างจุลภาคที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน
2. เพื่อศึกษาผลของธาตุผสมอะลูมิเนียม ไทเทเนียม และ อะลูมิเนียมผสมไทเทเนียมในปริมาณต่างๆที่เติมลงไปไนโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X ต่อความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชัน
3. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการเกิดเฟสต่างๆที่เกิดขึ้นในโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบต่างๆ
4. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตโลหะผสมพิเศษชนิดใหม่ให้ได้โครงสร้างจุลภาคที่เหมาะสมและสามารถป้องกันการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูงได้ดียิ่งขึ้น

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ศึกษาถึงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมพิเศษนิกเกิลเบสเกรด Hastelloy X ที่เปลี่ยนไปในการเติมธาตุอะลูมิเนียม 2% 4% และ 6% โดยน้ำหนัก ธาตุไทเทเนียม 2% 4% และ 6% โดยน้ำหนัก และธาตุผสมระหว่างอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียม 2% 4% และ 6 %โดยน้ำหนักที่ผ่านการหลอมแบบ Arc Melting
2. ศึกษาความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน (oxidation resistance) ที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส
3. ศึกษาเฟสต่างๆที่อาจเกิดขึ้นมาใหม่เช่นเฟสแกมมาไพร์ม (γ') โดยดูถึงสัดส่วนเชิงพื้นที่และขนาดโดยเฉลี่ยของอนุภาคแกมมาไพร์มด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM)
4. ศึกษาชั้นฟิล์มออกไซด์และเฟสที่เกิดจากการตกตะกอนด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD)
5. ทำละลาย (Solutioning heat treatment) ที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ
6. ทำการบ่มแข็ง (aging) ที่อุณหภูมิ 760, 800 และ 845 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมงและปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงผลของการเติมธาตุผสมอะลูมิเนียม ไทเทเนียม และ อะลูมิเนียมผสมไทเทเนียม ในโลหะผสมพิเศษ Hastelloy X ที่มีต่อโครงสร้างจุลภาคที่เปลี่ยนไป
2. ทราบถึงความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูงที่เปลี่ยนไป เนื่องจากการเติมธาตุผสม อะลูมิเนียม ไทเทเนียม และ อะลูมิเนียมผสมไทเทเนียมที่ปริมาณต่างๆ
3. ทราบถึงผลกระทบต่อการศึกษาเฟสต่างๆที่อาจจะเกิดขึ้นภายหลังจากการให้กรรมวิธีทางความร้อนแบบต่างๆ
4. เพื่อเป็นแนวทางในการผลิตโลหะผสมพิเศษชนิดใหม่โดยการนำโลหะผสมพิเศษที่ผ่านการใช้งานแล้วมาหลอมและปรับปรุงเพิ่มสมบัติต่างๆขึ้นมาใหม่

บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์

2.1 โลหะผสมพิเศษ

2.1.1 พัฒนาการของโลหะผสมพิเศษ

โลหะผสมพิเศษเป็นกลุ่มของโลหะผสมที่มีสมบัติพิเศษ คือทนต่อความร้อนและทนต่อการกัดกร่อนได้ดีมาก มีความแข็งแรงสูงที่อุณหภูมิสูง มีความแข็งแรงต่อการเกิดความคืบ รับภาระที่แรงมากระทำที่อุณหภูมิสูง มีอัตราการขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำ มีการนำความร้อนที่สูง ปัจจุบันโลหะผสมพิเศษจะถูกใช้เป็นชิ้นส่วนในเครื่องบิน เรือเดินสมุทร เครื่องยนต์กังหันก๊าซสำหรับยานพาหนะและสำหรับผลิตไฟฟ้า ยานอวกาศ เครื่องยนต์ของจรวด ชิ้นส่วนในเตาปฏิกรณ์ปรมาณู เรือดำน้ำ โรงไฟฟ้ากังหันไอน้ำ อุปกรณ์ทางด้านปิโตรเคมี และสำหรับใช้งานด้านอื่นๆ ที่ต้องทนต่ออุณหภูมิสูง เป็นต้น โลหะผสมพิเศษจึงถูกนำไปใช้งานกันมากในงานพวกเครื่องยนต์กังหันก๊าซ (Gas Turbine Engine) เนื่องจากเครื่องยนต์กังหันก๊าซมีการใช้งานที่อุณหภูมิสูง จึงต้องการวัสดุที่มี ความสามารถในการรับแรงสูง ทนต่อความล้า (Fatigue) และการเกิดการคืบ (Creep) ได้ดี อีกทั้งยังมีสมบัติต้านทานการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูงด้วย ดังนั้นประโยชน์จากการใช้งานโลหะผสมพิเศษ จึงถูกนำมาใช้งานเป็นชิ้นส่วนหลักๆของเครื่องยนต์กังหันก๊าซซึ่งทำงานที่อุณหภูมิสูงกว่า 550 องศาเซลเซียส และอาจสูงถึง 1200 องศาเซลเซียส โดยเฉพาะใบพัดกังหันก๊าซ (Turbine Blades)

โดยทั่วไปโลหะผสมพิเศษส่วนมากจะมีส่วนผสมของธาตุ निकิล โคโรเมียม โครเมียม โคบอลต์ โมลิบดีนัม เหล็ก คาร์บอน โบรอน เป็นต้น โดยถ้ามีส่วนผสมของนิกเกิลหรือโคบอลต์ในปริมาณที่สูงกว่าธาตุอื่นๆจะช่วยให้โลหะผสมนั้นสามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ดีและมีความแข็งแรงสูงด้วย [1, 2]

2.2 ชนิดของโลหะผสมพิเศษ

โลหะผสมพิเศษสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มหลักๆดังนี้ [3]

2.2.1 โลหะผสมพิเศษกลุ่มนิกเกิล

มีส่วนผสมทางเคมีโดยมีนิกเกิลเป็นส่วนผสมหลัก และมีการเติมธาตุอื่นลงไปอีกหลายธาตุที่สำคัญคือโครเมียมประมาณร้อยละ 20% โดยน้ำหนัก โครเมียมจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงเนื่องจากการเติมสารละลายของแข็ง (Solid Solution Strengthening) และเมื่อเติม 2.25% โดยน้ำหนักของไทเทเนียมและ 1% โดยน้ำหนักของอะลูมิเนียม จะเกิด $Ni_3(Al,Ti)$ ซึ่งช่วยเพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง นอกจากนี้ยังมีธาตุตัวอื่นอีกเช่น โมลิบดีนัม โคบอลต์ ไนโอเบียม เซอร์โคเนียม โบรอน เหล็ก และ

ธาตุอื่นๆอีกผสมอยู่เพื่อปรับปรุงสมบัติของโลหะผสมพิเศษ และในปัจจุบันโลหะผสมพิเศษกลุ่มนี้มีการใช้งานมากที่สุด โลหะผสมพิเศษที่มีนิกเกิลเป็นส่วนผสมหลักมีประมาณหลายร้อยเกรด ส่วนใหญ่มักพบในอุตสาหกรรมเครื่องบิน อุตสาหกรรมการผลิตเครื่องกังหันก๊าซสำหรับเครื่องบินไอพ่นและสำหรับโรงไฟฟ้า อุปกรณ์ทางนิวเคลียร์ เครื่องมือในงานอุตสาหกรรมทางปิโตรเคมีและงานอื่นๆ

2.2.2 โลหะผสมพิเศษกลุ่มนิกเกิล-เหล็ก

โลหะผสมพิเศษกลุ่มนี้ส่วนผสมทางเคมีเป็นนิกเกิล 25-60% และเหล็ก 15-60% โดยน้ำหนักเป็นส่วนผสมหลัก ข้อดีของโลหะผสมพิเศษกลุ่มนี้คือมีราคาสูงกว่ากลุ่มอื่น เนื่องจากการนำเหล็กมาแทนนิกเกิลบางส่วน แต่มีข้อดีคือความสามารถในการใช้งานที่อุณหภูมิสูงไม่ด้อยเท่ากับกลุ่มนิกเกิล โลหะผสมพิเศษ เช่น A-286, V-57 ใช้งานได้สูงเพียง 650 องศาเซลเซียส และ Pyromet 860 สามารถใช้งานได้สูงสุด 815 องศาเซลเซียส เพราะปริมาณของธาตุนิกเกิลลดลง ความแข็งแรงได้จากการเติมธาตุต่างๆลงไป เช่น ไทเทเนียม อะลูมิเนียม ไนโอเบียม ซึ่งจะทำให้สามารถเพิ่มความแข็งแรงโดยกระบวนการบ่มแข็ง (Precipitation Hardening) โครเมียมช่วยเพิ่มการต้านทานการกัดกร่อน โดยเติมประมาณ 15-28% โดยน้ำหนัก ขณะที่เติมโมลิบดีนัมประมาณ 1-6% โดยน้ำหนัก สามารถเพิ่มความแข็งแรงโดยการเกิดสารละลายของแข็ง

2.2.3 โลหะผสมพิเศษกลุ่มโคบอลต์

โลหะผสมพิเศษกลุ่มนี้มีส่วนผสมทางเคมีเป็นโคบอลต์ 50% และโครเมียม 25% โดยน้ำหนักเป็นส่วนผสมหลัก โครงสร้างทางจุลภาคประกอบด้วยโครงสร้างพื้นเป็น FCC และมีคาร์ไบด์ชนิดต่างๆ ความแข็งแรงได้จากสารละลายของแข็งและคาร์ไบด์ โดยสมบัติเด่นของโลหะผสมพิเศษกลุ่มนี้คือต้านทานการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูงได้ดีมาก ๆ โลหะผสมพิเศษกลุ่มนี้เหมาะสำหรับงานทำชิ้นส่วนที่ไม่มีการเคลื่อนที่หรือเคลื่อนไหวน้อยๆ

2.3 สมบัติต่างๆของโลหะผสมพิเศษ

2.3.1 สมบัติทางกล

โลหะผสมพิเศษส่วนใหญ่มีโครงสร้างแบบเฟซเซ็นเตอร์คิวบิก (Face Centered Cubic, FCC) ซึ่งมีความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงรวมทั้งมีความต้านทานการคืบด้วย นอกจากนี้ยังมีความยืดหยุ่น (Ductility) และความต้านทานต่อแรงกระแทกที่ดี รวมถึงการมีความสามารถต้านทานต่อความล้าที่รอบต่ำและสูงและความล้าจากอุณหภูมิสูงได้ดี นอกจากนี้มีความสามารถในการละลายธาตุอื่นที่ผสม และมีความสามารถในการควบคุมการตกตะกอนเช่นแกมมาไพร์มและแกมมาดับเบิลไพร์มเพื่อสร้างความแข็งแรงโดยความแข็งแรงของโลหะผสมพิเศษสามารถเกิดจาก

1. การตกตะกอนคือแกมมาไพร์มและแกมมาดับเบิลไพร์มซึ่งส่วนมากเกิดจากอะลูมิเนียมและไทเทเนียม
2. สารละลายของแข็งเกิดจากการเติมธาตุต่างๆโดยมีขนาดอะตอมที่แตกต่างกับอะตอมของนิกเกิล เช่น โครเมียม อะลูมิเนียม ไทเทเนียม เป็นต้น
3. การตกตะกอนของคาร์ไบด์เกิดทั้งในขอบเกรนและบริเวณขอบเกรนโดยเฉพาะในโลหะผสมพิเศษที่ได้จากการหล่อและการรีด

2.3.2 ลักษณะทางกายภาพ

2.3.2.1 ความหนาแน่น

โลหะผสมพิเศษเบสนิกเกิล-เหล็กมีความหนาแน่นต่ำที่สุดในกลุ่มโลหะผสมพิเศษเนื่องจากเหล็กมีความหนาแน่นต่ำกว่านิกเกิลและโคบอลต์ สำหรับโลหะผสมพิเศษเบสนิกเกิลความหนาแน่นสามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยขึ้นอยู่กับปริมาณธาตุที่ผสม เช่น ถ้าโลหะผสมพิเศษเบสนิกเกิลมีทั้งสแตนและแทนทาลัมผสมอยู่มาก จะมีความหนาแน่นอยู่ที่ 0.31-0.335 lb/in³

2.3.2.2 การขยายตัวจากความร้อน

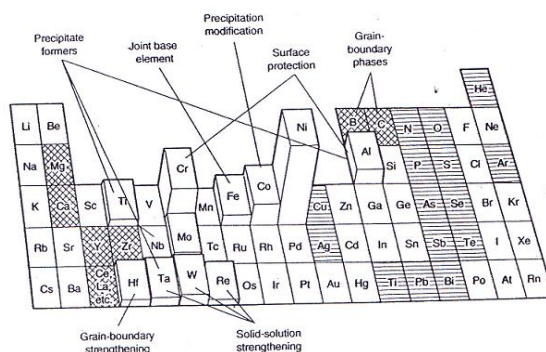
โลหะผสมพิเศษเบสนิกเกิลและโลหะผสมพิเศษเบสโคบอลต์ มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนที่ใกล้เคียงกันและมีค่าต่ำกว่าโลหะผสมพิเศษเบสนิกเกิล-เหล็ก

2.3.2.3 การนำความร้อน

การใช้งานโดยส่วนใหญ่ของโลหะผสมพิเศษนี้ใช้ในงานที่มีอุณหภูมิสูง ดังนั้นการนำความร้อนจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นมากเพื่อที่จะสามารถถ่ายเทความร้อนออกไปได้ เพื่อทำให้ผลต่างระหว่างอุณหภูมิน้อยที่สุด และเพื่อลดการเกิดความเค้นจากอุณหภูมิและแนวโน้มของการแตกหัก เนื่องจากความล้าที่อุณหภูมิสูง สำหรับการนำความร้อนในโลหะผสมพิเศษมีเพียงร้อยละ 10-30 ของโลหะเหล็ก นิกเกิลและโคบอลต์บริสุทธิ์ เนื่องจากผลของการเติมธาตุผสมลงไป 12 % โดยน้ำหนัก

หน้าที่ของธาตุต่างๆในโลหะผสมเบสนิกเกิลสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มหลักๆได้ดังนี้

- ก. กลุ่มที่เป็นเนื้อโลหะพื้น ประกอบไปด้วย นิกเกิล โคบอลต์ เหล็ก โครเมียม โมลิบดีนัม ทั้งสแตนและวานาเดียม
- ข. กลุ่มที่ทำให้เกิดการตกตะกอนประกอบไปด้วย อะลูมิเนียม ไทเทเนียม ไนโอเบียมและแทนทาลัม
- ค. กลุ่มที่เกิดการแยกตัวตามขอบเกรนประกอบไปด้วย แมกนีเซียม โบรอน เซอร์โคเนียม และคาร์บอน [3]



ภาพที่ 2.1 ธาตุต่างๆที่มีผลโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล [7]

ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมพิเศษประเภทนิกเกิลเกรด Hastelloy X ดังแสดงในตารางที่ 2.1 โดยที่ธาตุแต่ละชนิดมีหน้าที่ดังแสดงในตารางที่ 2.2 ดังนี้

ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมพิเศษ Hastelloy X [4]

Normal chemical composition, Weight Percent									
Ni	Cr	Fe	Mo	Co	W	C	Mn	Si	B
47	22	18	9	1.5	0.6	0.1	1*	1*	0.008*

Note : * Maximum

โลหะผสมเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด Hastelloy X คล้ายคลึงกับโลหะผสมเนื้อพื้นนิกเกิลที่มีปริมาณนิกเกิลที่สูงและมีปริมาณของอะลูมิเนียมที่ต่ำ โดยที่โลหะผสมพิเศษ Hastelloy X จะมีเพียงแคโครงสร้างของเฟสแกมมาและคาร์ไบด์แต่ในโครงสร้างจะไม่มีเฟสของแกมมาไพรม์ที่ให้ความแข็งแรงที่ดีที่สุด

ตารางที่ 2.2 บทบาทของธาตุต่างๆในโลหะผสมพิเศษ Hastelloy X [5]

บทบาทของธาตุต่างๆในโลหะ พิเศษเบสนิกเกิลเกรด Hastelloy X	
Solid solution strengtheners	Co, Cr, Fe, Mo, W, Ta
Carbide form :	
MC Type	W, Ta, Ti, Mo, Nb
M ₇ C ₃ Type	Cr
M ₂₃ C ₆ Type	Cr, Mo, W
M ₆ C Type	Mo, W
Carbonitride: M(CN) Type	C, N
Oxidation Resistance	Al, Cr

Hot corrosion resistance improvement	La, Th
Sulfidation resistance	Cr
Creep property improvement	B
Rupture strength improvement	B
Causes grain boundary segregation	B, Cr, Zr

2.3.1 บทบาทของธาตุต่างๆในโลหะผสมพิเศษ Hastelloy X

2.3.1.1. นิกเกิล

- เป็นโลหะพื้นฐานสร้างเนื้อพื้นออสเทนไนท์เฟซเซ็นเตอร์คิวบิก (Face centered cubic ; FCC) ทนต่อการเติมธาตุสารละลายของแข็งปริมาณมาก โดยไม่ฟอร์มเฟสที่เป็นอันตราย
- ธาตุพื้นฐานอื่นๆจะทำให้เฟสไม่เสถียร ก่อให้เกิดเฟสที่เป็นอันตราย ง่ายต่อการแตกหักแบบเปราะ เมื่อเติมธาตุหรือโลหะผสม

2.3.1.2. โมลิบดีนัม

- เพิ่มความแข็งแรงเป็นโดยสารละลายของแข็งที่อุณหภูมิสูง
- ฟอร์มคาร์ไบด์ M_6C เพิ่มความแข็งแรงที่ขอบเกรน
- ถ้ามีปริมาณธาตุโมลิบดีนัมมากเกินไป จะทำให้ตกตะกอนคาร์ไบด์มากเกินไปส่งผลให้ความสามารถขึ้นรูปของโลหะผสมลดลง
- เพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูง

2.3.1.3. โครเมียม

- เพิ่มความต้านทานการเกิดออกซิเดชัน และความต้านทานการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูง โดยเกิดเป็นชั้นฟิล์มออกไซด์ Cr_2O_3
- สร้างความแข็งแรงโดยเป็นสารละลายของแข็ง
- ฟอร์มคาร์ไบด์ที่ขอบเกรน ทำให้ขอบเกรนแข็งแรงมากขึ้นโดยจะฟอร์มเป็นคาร์ไบด์ ($M_{23}C_6$)
- ปริมาณเปอร์เซ็นต์โครเมียมมากเกินไปทำให้อุณหภูมิ Solvus ของแกมมาไพรม์ ลดลงและอุณหภูมิสูงสุดของความแข็งแรงแบบแรงดึงลดลง

2.3.1.4. อะลูมิเนียม*

- เพิ่มความต้านทานการเกิดออกซิเดชันโดยเกิดเป็นสารประกอบฟิล์มออกไซด์ Al_2O_3
- ช่วยให้เกิดการบ่มแข็งโดยการตกตะกอนของแกมมาไพร์มทำให้เกิดสารประกอบเฟส FCC Ni_3Al ซึ่งช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้มากขึ้น
- ถ้าเพิ่มปริมาณเปอร์เซ็นต์อะลูมิเนียมมากเกินไป จะส่งผลทำให้เกิดชั้นฟิล์มออกไซด์ และเกิดการแยกตัวของเนื้อพื้นหรือขอบเกรนและทำให้ความสามารถในการขึ้นรูปอ่อนลดลง

2.3.1.5. เหล็ก

- สร้างเนื้อพื้นออสเตไนต์เฟซเซ็นเตอร์คิวบิก (Face centered cubic; FCC) ร่วมกับนิกเกิล
- สามารถใช้งานที่อุณหภูมิต่ำได้ดี โดยที่เหล็กจะไม่ทนที่อุณหภูมิสูงและไม่นิยมใช้งานที่อุณหภูมิสูง

2.3.1.6. ไทเทเนียม*

- เพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูง
- ถ้ามีปริมาณไทเทเนียมมากเกินไป จะทำให้ความสามารถในการขึ้นรูปอ่อนลดลงและมีการแยกตัวในเนื้อพื้นหรือขอบเกรน
- พอร์มคาร์ไบด์ (MC, TiC)
- มีแนวโน้มในการจับตัวกับไนโตรเจนทำให้เกิดการพอร์ม TiN

2.3.1.7. ทังสเตน

- เพิ่มความแข็งแรงโดยเป็นสารละลายของแข็ง

2.3.1.8. โคบอลต์

- เพิ่มอุณหภูมิแกมมาไพร์ม Solvus จะช่วยปรับปรุงการนำความร้อนและลดสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน

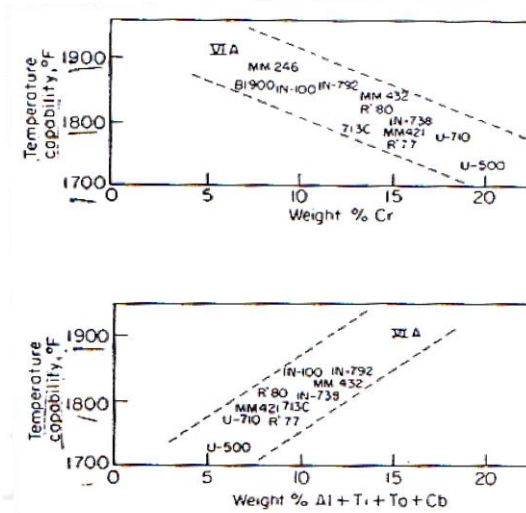
2.3.1.9. โบรอน

- มีแนวโน้มจะเกิดการแยกตัวที่ขอบเกรน แต่ช่วยยืดระยะเวลาใช้งานตลอดจนเพิ่มความเหนียว

2.3.1.10. คาร์บอน

- พอร์มคาร์ไบด์โดยจับกับ Cr Mo W V Nb Ta และ Ti

- รูปแบบคาร์ไบด์ MC M₂₃C₆ M₆C และ M₇C₃
- ใส่ในปริมาณต่ำระหว่าง 0.05-0.2% โดยน้ำหนัก [3]



ภาพที่ 2.2 การเพิ่มปริมาณของธาตุผสมต่างๆที่มีผลต่อโลหะผสมพิเศษเนื้อฟ้านิกเกิล [6]

จากภาพที่ 2.2 จะพบว่าเมื่อมีการเติมปริมาณของโครเมียมที่ 15% โดยน้ำหนักขึ้นไปจะทำให้สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ดี ส่วนการเติมอะลูมิเนียม ไทเทเนียม แทนทาลัม และโคลัมเบียมที่ 10% โดยน้ำหนักจะสามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ดีเช่นกันโดยที่ Hastelloy X จะมีส่วนผสมทางเคมีคล้ายกับโลหะผสมพิเศษเกรด IN 738

	WROUGHT NICKEL-BASE ALLOYS							TEMPERATURE CAPABILITY for 100hr life at 20,000 psi, °F				
	Al + Ti + Ta + Cb	Mo + W	Cr	Co	Ni	Other	1500	1600	1700	1800	1900	
INCONEL X-750	4.2	-	15	-	73	7 Fe	✓	✓	✓	✓	✓	
M-252	3.6	10	20	10	55	-	✓	✓	✓	✓	✓	
WASPALOY	4.3	4.3	19	13	58	-	✓	✓	✓	✓	✓	
NIMONIC 115	9.0	3.5	15	15	57	-	✓	✓	✓	✓	✓	
ASTROLOY	7.9	5.2	15	15	57	-	✓	✓	✓	✓	✓	
AF 2-IDA	9.1	9.0	12	10	59	-	✓	✓	✓	✓	✓	
CAST NICKEL-BASE ALLOYS												
UDIMET 500	6.0	4.2	19	18	52	-	✓	✓	✓	✓	✓	
RENE 77	7.9	4.2	14.6	18.5	58	-	✓	✓	✓	✓	✓	
713C	8.9	4.2	12.5	-	74	-	✓	✓	✓	✓	✓	
IN-738	9.5	4.4	16	8.5	61	-	✓	✓	✓	✓	✓	
RENE 80	8.0	8.0	14	9.5	60	-	✓	✓	✓	✓	✓	
B-1900	11.0	6.0	8.0	10	64	-	✓	✓	✓	✓	✓	
IN-100	10.2	3.0	10.0	15	60	0.9V	✓	✓	✓	✓	✓	
NASA-TRW VI A	15.9	7.8	6.1	7.5	61	0.5Hf 0.3Re	✓	✓	✓	✓	✓	

ภาพที่ 2.3 เกรดต่างๆของโลหะผสมพิเศษเนื้อฟ้านิกเกิลเมื่อได้รับการเติมธาตุผสมในปริมาณที่แตกต่างกัน [6]

จากภาพที่ 2.3 พบว่าการลดปริมาณของโครเมียมจะทำให้สมบัติต่างๆของโลหะผสมพิเศษสามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิได้สูงขึ้นเช่นเดียวกับการเพิ่มปริมาณของอะลูมิเนียม ไทเทเนียม ช่วยเพิ่มความสามารถในการใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงได้เช่นกันในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิลที่ได้จากการรีดและหล่อโดยที่โลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X จะมีส่วนผสมทางเคมีคล้ายกับโลหะผสมพิเศษเกรด IN738

ตารางที่ 2.3 แสดงธาตุผสมหลักที่เติมลงในโลหะผสมพิเศษ [7]

Element	Range, %	
	Fe-Ni and Ni-base	Co-base
Cr	5-25	19-23
Mo, W	0-12	0-11
Al	0-6	0-4.5
Ti	0-6	0-4
Co	0-20	....
Ni	.....	0-22
Nb	0-5	0-4
Ta	0-12	0-9
Re	0-6	0-2

จากตารางที่ 2.3 พบว่าโดยทั่วไปในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิลจะมีการเติมธาตุผสมไปในช่วง 0-25 % โดยน้ำหนักโดยธาตุผสมที่สนใจคือ อะลูมิเนียมและไทเทเนียมพบว่ามีเติมลงไปปริมาณ 0-6 % โดยน้ำหนัก

2.4 โครงสร้างจุลภาคและเฟสของโลหะผสมพิเศษ

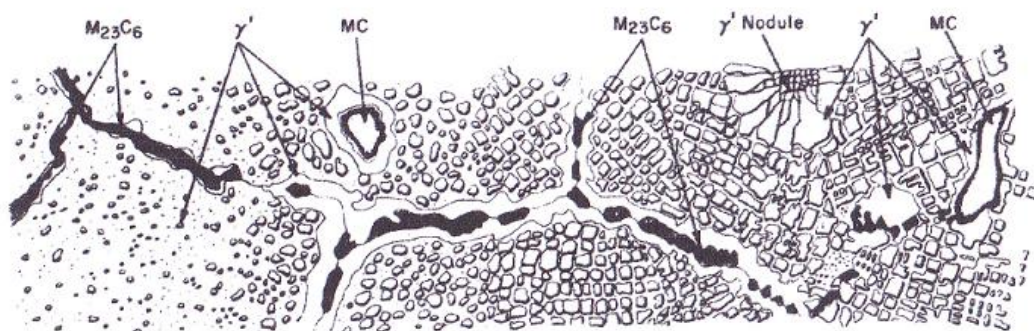
โครงสร้างจุลภาคโลหะผสมพิเศษเบสนิเกิลเกรด Hastelloy X [3] มีหลายเฟสประกอบด้วยเนื้อพื้นแกมมา (γ) คาร์ไบด์ และปริมาณของเฟสที่อันตรายโดยจะทำให้โครงสร้างเกิดความเสียหาย

2.4.1 เนื้อพื้น

เป็นโครงสร้างเนื้อพื้น(แกมมา)(γ) โดยเป็นเฟสโครงสร้างแบบ FCC หรือ Austenite ซึ่งเป็นโครงสร้างที่สามารถเกิดสารละลายของแข็งโดยเติมธาตุเช่น โคบอลต์ เหล็ก โครเมียม โมลิบดีนัม และ ทังสแตน ซึ่งช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้มากขึ้น

2.4.2 คาร์ไบด์

จะกระจายอยู่ตามขอบเกรนและอยู่สม่ำเสมอภายในเกรน การวิเคราะห์ทางเคมีของ คาร์ไบด์ชี้ให้เห็นว่า ภายในเกรนจะมีคาร์ไบด์ประเภท MC เป็นหลัก ซึ่ง M แทนด้วย Ti W และ Ta คาร์ไบด์ที่พบบริเวณขอบเกรนจะเป็นประเภท $M_{23}C_6$ ซึ่ง M แทนด้วย Cr และ Mo ภายในเกรนสามารถ เห็น คาร์ไบด์เป็นจุดสีดำ การวิเคราะห์ทางเคมีแสดงให้เห็นว่าอนุภาคออกไซด์ ไนไตรต์หรือคาร์โบไนไตรต์ ประพติตัวเป็นตำแหน่งเกิดนิวเคลียสของคาร์ไบด์ ขอบเกรนที่เป็นรูปร่างฟันปลา ป้องกันการเลื่อนตัวของขอบเกรนและช่วยเพิ่มความแข็งแรงในสภาวะความต้านทานการคืบ (creep strength) ได้



ภาพที่ 2.4 ลักษณะของคาร์ไบด์ของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล

2.4.3 TCP phase

เป็นเฟสที่สามารถเกิดขึ้นได้จากกรรมวิธีทางความร้อน เนื่องจากใช้อุณหภูมิในการอบที่สูงเกินไปหรือใช้อุณหภูมิในการอบอ่อนที่ต่ำเกินไปส่งผลทำให้โครงสร้างของชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยที่เกิดขึ้นเนื่องจากความส่วนผสมทางเคมีที่ใส่ลงไปชิ้นงานยังไม่ดีพอจึงทำให้เกิดเป็นเซลล์ลูลาร์ โดยที่ซิกมาเฟสสามารถเกิดได้ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 475-875 องศาเซลเซียสซึ่งถ้าพบปริมาณของซิกมาเฟสในโครงสร้างในปริมาณที่มากจะทำให้โครงสร้างเกิดการแตกหักซึ่งส่งผลทำให้ความสามารถในการรับโหลดของโลหะนั้นมีความสามารถที่ต่ำลง

2.5 สมบัติทั่วไปของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล

โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลมีสมบัติเด่นในหลายๆด้าน เช่น มีความเสถียรที่อุณหภูมิสูง ต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูง มีความแข็งแรงสูงโดยสมบัติของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สมบัติทั่วไปของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล [5]

ความหนาแน่นโดยทั่วไป	7.9-8.5 g/cm ²
Yield strength	800-1200 MPa

Tensile \ strength	1250-1450 MPa
อุณหภูมิการใช้งานทั่วไป	650-1100 องศาเซลเซียส

2.6 สมบัติทั่วไปของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด Hastelloy X

โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด Hastelloy X เป็นโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล ที่มีปริมาณของโครเมียมและเหล็กสูงและมีปริมาณของธาตุ นิกเกิลและโมลิบดีนัมอยู่ในโครงสร้าง มีสมบัติที่โดดเด่นคือทนต่อการเกิดออกซิเดชันได้ดี ที่อุณหภูมิสูงจะมีความแข็งแรงสูง สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานกับอุตสาหกรรมปิโตรเคมีเนื่องจากทนต่อ stress corrosion cracking ได้ดีมาก ลักษณะที่น่าสนใจอีกอย่างคือเนื่องจากมีความเหนียวที่ดีหลังจากผ่านกระบวนการทางความร้อนที่ อุณหภูมิ 650 760 และ 870 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 16,000 ชั่วโมง ทำให้โลหะผสมพิเศษมีความสามารถด้านการเชื่อมที่ดี นิยมใช้ทำเป็นชิ้นส่วนต่างๆดังนี้ combustor cans, transition ducts, engine tailpipes และ afterburner components เนื่องจากมีความต้านออกซิเดชันที่โดดเด่นจึงนิยมนำไปใช้งานในด้านอุตสาหกรรมเคมีได้ดีเช่นกัน [4]

ตารางที่ 2.5 สมบัติทั่วไปของโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X [4]

Density	8.22 g/cm ³	0.297 lb/in ³
Melting point	1355 °C	2470 °F
Expansion coefficient	13.9 μm/m °C (20 - 100°C)	7.7 x 10 ⁻⁶ in/in °F (70 - 212°F)
Modulus of rigidity	77.6 kN/mm ²	11255 ksi
Modulus of elastic	205 kN/mm ²	29733 ksi

2.7 ความต้านทานการเกิดออกซิเดชัน

Hastelloy X คือโลหะผสมนิกเกิลที่มีสมบัติความแข็งแรงเป็นพิเศษและต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่ 2200 องศาเซลเซียสขึ้นไป มักจะถูกใช้งานเนื่องจากมีความสามารถทนต่อการแตกร้าว ทนต่อความเครียดและทนต่อการกัดกร่อนดังแสดงในตารางที่ 2.6 และ 2.7 จึงนิยมในการใช้งานในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี โลหะผสมที่มีลักษณะการขึ้นรูปและการเชื่อมที่ดีเยี่ยม [4]

ตารางที่ 2.6 เปรียบเทียบการต้านทานออกซิเดชันของโลหะผสมพิเศษเกรดต่างๆ [4]

Alloy	1800°F (980°C)				2000°F (1095°C)			
	Metal Loss/side,		Metal Loss + Metal Loss/side, CIP**/side,		Metal Loss/side,		Metal Loss/side, + CIP**/side,	
	Mils	mm	Mils	mm	Mils	mm	Mils	mm
HASTELLOY® X alloy	0.29	0.007	0.74	0.019	1.5	0.038	2.7	0.069
INCONEL® alloy 600	0.32	0.008	0.90	0.023	1.1	0.028	1.6	0.041
INCONEL alloy 601	0.53	0.013	1.3	0.033	1.2	0.031	2.6	0.06
Alloy 625	0.32	0.008	0.72	0.018	3.3	0.083	4.8	0.12
Alloy 800H	0.94	0.024	1.8	0.046	5.4	0.137	7.4	0.19

ตารางที่ 2.7 เปรียบเทียบ hot corrosion resistance ของโลหะผสมพิเศษเกรดต่างๆ [4]

Test temperature		Test period	Hastelloy X		Hastelloy S		Haynes 188	
°F	°C	Hours	Mils	mm	Mils	mm	Mils	mm
1650	900	200	3.0	0.08	2.7	0.07	2.1	0.05
1650	900	1000	6.8	0.17	7.5	0.19	3.7	0.09

2.8 กรรมวิธีทางความร้อน

สำหรับโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X ในงานหล่อ นิยมทำการละลาย (solution heat treatment) เพื่อทำการปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน โดยส่วนใหญ่นิยมใช้งานที่อุณหภูมิ 1177 องศาเซลเซียสและปล่อยให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วในอากาศ

2.8.1 การอบอ่อน

การอบอ่อนสมบูรณ์ (Full Annealing) เมื่อใช้งานโลหะผสมพิเศษ การอบอ่อนหมายถึง การอบอ่อน สมบูรณ์ ซึ่งคือการตกผลึกใหม่อย่างสมบูรณ์ และการได้ความอ่อนตัวสูงสุด การใช้งานจริงสามารถใช้กับ โลหะผสมรีดขึ้นรูปชนิดที่ไม่ผ่านการชุบแข็งเท่านั้น สำหรับโลหะผสมชุบแข็งส่วนใหญ่ กระบวนการ อบอ่อนจะเหมือนกับการทำสารละลายเนื้อเดียว (solution treating) อย่างไรก็ตามทั้งสองวิธีการ มีจุดประสงค์การทำที่ต่างกัน

2.8.2 การทำสารละลายเนื้อเดียว (solution treating)

มีจุดประสงค์ที่จะละลายเฟสที่สองเพื่อให้เกิดการตกตะกอนซ้ำ (reprecipitation) การทำอบอ่อนมีจุดประสงค์ เพื่อเพิ่มความเหนียว (ลดความแข็ง) ช่วยในการขึ้นรูป หรือกลึงไสกัดเจาะได้ง่าย เตรียมสำหรับการเชื่อม ขจัดความเค้นตกค้างหลังการเชื่อม สร้างโครงสร้างจุลภาคลักษณะเฉพาะ หรือทำให้โครงสร้างจากการบ่มแข็งนิ่มลง โดยการทำให้สารละลายซ้ำ ของเฟสที่สอง การอบอ่อนอาจทำให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวของแท่งโลหะหล่อ

2.8.3 การอบอ่อนเพื่อการละลายเฟส (solution annealing)

การทำให้เป็นสารละลายเนื้อเดียว มีวัตถุประสงค์เพื่อละลายเฟสที่สองเพื่อสร้างความต้านทานการกัดกร่อนสูงสุดหรือเพื่อเตรียมโลหะผสม สำหรับการบ่มแข็งในภายหลัง นอกจากนี้ยังทำให้โครงสร้างเป็นเนื้อเดียวกันก่อนที่จะทำการบ่มแข็งและเติมไปด้วยโครงสร้างรีดขึ้นรูปที่ตกผลึกใหม่ เพื่อเพิ่มความเหนียวสูงสุด จากการทดลองจริงในการทำให้เป็นสารละลายเนื้อเดียว โดยเฟสที่สองที่ตกตะกอนจากการบ่มแข็งในโลหะผสมอาจละลายได้ทั้งหมดโดยการทำให้กลายเป็นสารละลายเนื้อเดียว

2.8.4 การอบชุบตกตะกอน (precipitation treatment)

มีวัตถุประสงค์เพื่อทำให้เกิดการตกตะกอนออกมาเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและควบคุมเฟสที่สองรวมทั้งคาร์ไบด์ นอกจากนี้การอบชุบตกตะกอนยังช่วยขจัด ความเค้นตกค้าง การตกตะกอนโดยทั่วไปจะนิยมใช้อุณหภูมิดังแสดงในตารางที่ 2.8 และ 2.9

ตารางที่ 2.8 อุณหภูมิที่ใช้ในการอบอ่อนสำหรับโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X [4]

CONDITION OF SUPPLY	HEAT TREATMENT (AFTER FORMING)
Annealed/Spring Temper	Stress relieve at 400 - 450°C (750 - 840°F) for 2 hours and air cool.

ตารางที่ 2.9 อุณหภูมิและความแข็งแรงหลังจากผ่านกระบวนการทางความร้อนโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X [4]

CONDITION	APPROX TENSILE STRENGTH		APPROX SERVICE TEMPERATURE	
Annealed	850 - 1050 N/mm ²	123 - 152 ksi	-200 to +400°C	-330 to +750°F
Spring Temper	1350 - 1550 N/mm ²	196 - 225 ksi	-200 to +400°C	-330 to +750°F

2.9 ความแข็ง

เนื่องจากโลหะผสมพิเศษมีความแข็งที่อุณหภูมิสูง เมื่อทำการปรับปรุงโครงสร้างด้วยกระบวนการบ่มแข็ง (aging) จะทำให้ยิ่งมีความแข็งมากยิ่งขึ้น ตารางที่ 2.10 เป็นตารางแสดงอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการบ่มแข็ง (aging) เพื่อให้โลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X มีความแข็งแรงที่เพิ่มสูงขึ้น

ตารางที่ 2.10 เปรียบเทียบความแข็งที่ได้จากการบ่มแข็ง (aging) ที่อุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกัน

[4]

Form	Aging Temperature		Aging Time	Hardness, Rockwell A
	°F	°C		
Plate	1200	649	1000	57
			4000	62
			8000	63
	1400	760	1000	60
			4000	59
			8000	58
	1600	871	1000	56
			4000	56
			8000	54

2.10 ปรีทัศน์วรรณกรรม

2.10.1 การตกตะกอนของเฟสและอุณหภูมิและเวลาของการเปลี่ยนรูปของโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X

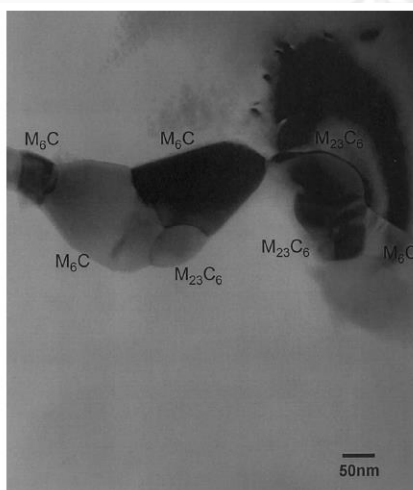
J.-C. Zhao *, M. Larsen, V. Ravikumar [8] ทำการศึกษาเกี่ยวกับการตกตะกอนของเฟสใน Hastelloy X ที่อุณหภูมิ 750 850 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 26 และ 100 ชั่วโมง ซึ่งทำให้เกิดในโครงสร้างของเนื้อพื้นแกมมาโดยจะพบตะกอนที่ตกตะกอนคือ M_6C $M_{23}C_6$ ซิกมาเฟสและมิวเฟสโดยใช้เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านเป็นเครื่องมือในการตรวจสอบ โดยส่วนผสมของธาตุแสดงในตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.11 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X

Normal chemical composition, Weight Percent %									
Ni	Cr	Fe	Mo	Co	W	C	Mn	Si	B
47	22	18	9	1.5	0.6	0.1	1*	1*	0.008*

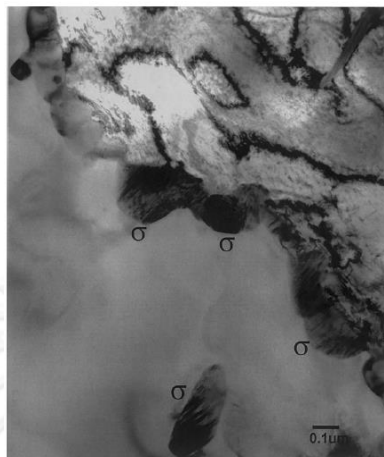
Note : * Maximum

จากการทดลองจะพบว่า การอบที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 26 ชั่วโมง ทำให้เกิดการคาร์ไบด์ M_6C หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนและพบการเกิดการตกตะกอนของ $M_{23}C_6$ ที่มีขนาดเล็กมากซึ่งมีลักษณะรูปร่างสี่เหลี่ยมในโครงสร้างเฟสเซ็นเตอร์ นอกจากนี้ยังมีการเกิดการตกตะกอนของ M_6C และ $M_{23}C_6$ ที่บริเวณขอบเกรนและพบการตกตะกอนของ M_6C ที่ twin boundary



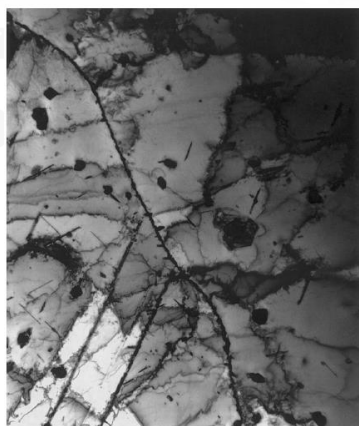
ภาพที่ 2.5 ตะกอนของ M_6C และ $M_{23}C_6$ ที่บริเวณขอบเกรนที่พบว่า ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 26 ชั่วโมง [8]

การอบที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมง จะพบ M_6C ที่มีขนาดที่ใหญ่ขึ้นรวมทั้งพบ $M_{23}C_6$ ที่ละเอียดภายในขอบเกรนที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมรวมทั้งเฟสซิกมาที่พบที่ขอบเกรนเช่นเดียวกัน



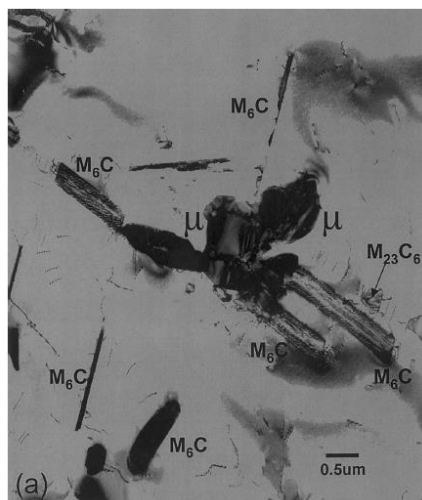
ภาพที่ 2.6 ตะกอน M_6C ที่มีขนาดที่ใหญ่มากขึ้นรวมทั้งพบ $M_{23}C_6$ ที่ละเอียดที่พบที่ขอบเกรนที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมง [8]

การอบที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 26 ชั่วโมง พบ M_6C และปริมาณการตกตะกอนของเฟสซิกมา อีกทั้งยังพบการตกตะกอนของเฟสซิวิต ซึ่งเราสามารถอธิบายได้ว่า การที่เกิดการตกตะกอนของเฟสซิวิตเกิดจากการที่มีปริมาณของโมลิบดีนัมสูงเกินไปอีกทั้งประกอบด้วยโครเมียม นิกเกิลและเหล็ก ทำให้เกิดการตกตะกอนของเฟสซิกมา และการเติมปริมาณโครเมียมสูงเกินไปรวมทั้งส่วนผสมทางเคมีประกอบไปด้วยเหล็ก ทำให้เกิดการตกตะกอนของ $M_{23}C_6$ ส่วนการเกิดการตกตะกอนของ M_6C เนื่องจากมีปริมาณของโมลิบดีนัมที่สูงเกินไป



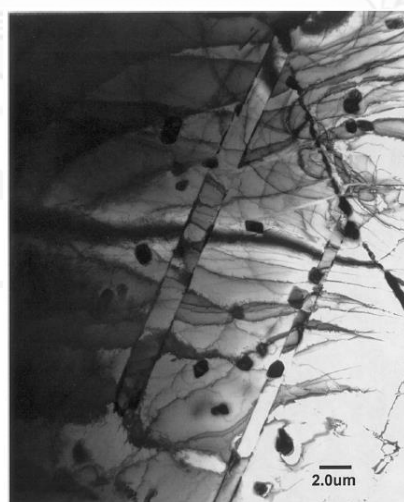
ภาพที่ 2.7 พบ M_6C และเฟสซิกมาและเฟสซิวิต และการตกตะกอนของ $M_{23}C_6$ ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 26 ชั่วโมง [8]

การอบที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมงพบว่าเกิดการตกตะกอนของ M_6C $M_{23}C_6$ เฟสซิกมาและเฟสซึ่งจะเกิดซึ่งเป็นเฟสที่มีรูปร่างคล้ายคลึงกันทำให้จำแนกได้ยากจึงทำการตรวจสอบโดยใช้ EDS เพื่อยืนยันผล



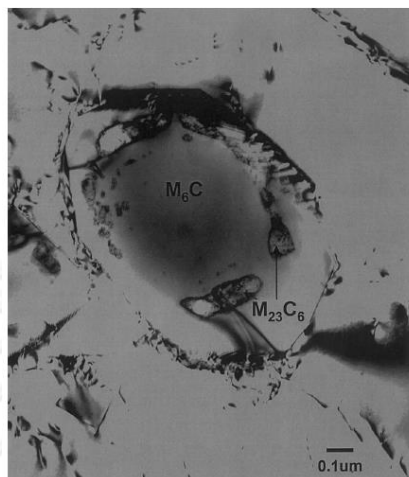
ภาพที่ 2.8 การตกตะกอนของ M_6C $M_{23}C_6$ เฟสซิกมาและเฟสไมว ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมง [8]

การอบที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 26 ชั่วโมงพบว่าเกิดการตกตะกอนของ M_6C แต่จะไม่เกิดการตกตะกอนของ $M_{23}C_6$ ที่บริเวณขอบเกรน แต่จะพบเฟสซิกมา เฟสไมวและ M_6C ที่บริเวณขอบเกรนแทน



ภาพที่ 2.9 การตกตะกอนของ M_6C ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 26 ชั่วโมง [8]

การอบที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง พบการตกตะกอนของ M_6C พบเฟสซิกมาและเฟสมิวที่บริเวณขอบเกรน และพบการตกตะกอนของ $M_{23}C_6$ อยู่ที่ขอบเกรนของ M_6C และพบการตกตะกอนของ M_6C ที่ twin boundary อีกครั้ง



ภาพที่ 2.10 การตกตะกอนของ M_6C พบเฟสซิกมาและเฟสมิวที่บริเวณขอบเกรน และพบการตกตะกอนของ $M_{23}C_6$ ภายในโครงสร้างของ M_6C ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง [8]

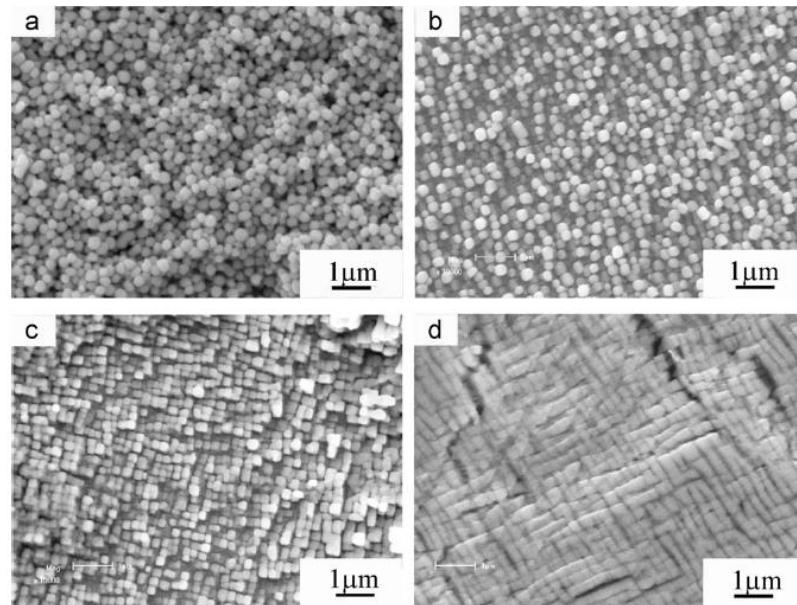
2.10.2 อิทธิพลของการเติมโคบอลต์และไทเทเนียมในโครงสร้างจุลภาคและแรงยึดของโลหะผสมพิเศษเกรด Udimet710

Ling Xu, Chuanyong Cui, Xiaofeng Sun [9] ทำการศึกษาโลหะผสมเนื้อพื้นนิกเกิลที่มีการเติมปริมาณโคบอลต์และไทเทเนียมเพื่อพัฒนาโครงสร้างให้มีความเสถียรมากขึ้น อีกทั้งช่วยลดความเครียดที่เกิดจากชุปแข็งระหว่างการทำการอบนการทางความร้อน ซึ่งพบว่า การเติมไทเทเนียมจะช่วยทำให้เกิดแกมมาไพรม์และทำให้ขอบเกรนมีความแข็งแรงมากขึ้น แต่เมื่อมีการเพิ่มปริมาณของไทเทเนียมที่สูงเกินไปอาจจะทำให้เกิด Ni_3Ti ซึ่งเป็นเฟสอีต้าเมื่อมีในโครงสร้างแล้วจะทำให้โครงสร้างมีความแข็งและเปราะ

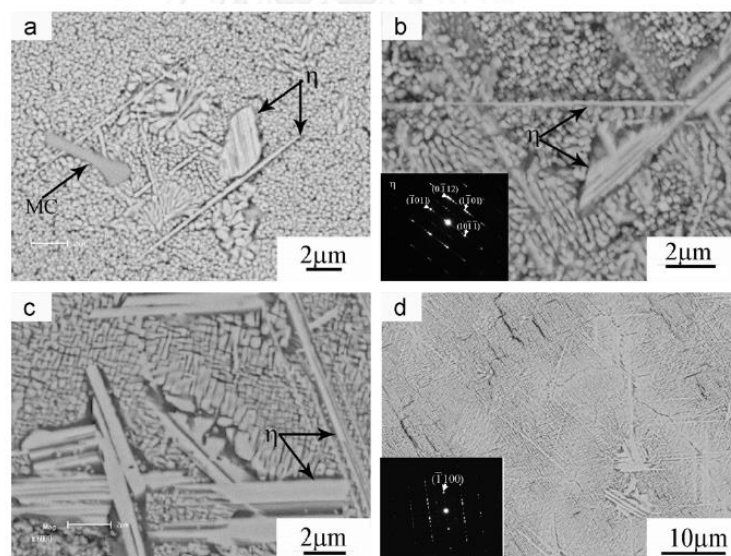
ตารางที่ 2.12 แสดงส่วนผสมของโลหะผสมพิเศษเกรด Udimet 710 ที่ใช้ในการทดลอง [9]

Alloy	Cr	Mo	Ti	Al	Fe	C	B	Zr	Co	Ni	γV_f	μV_f
U1(U710)	16.0	4.1	4.5	2.13	0.27	0.039	0.006	0.063	13.4	Bal.	41.6	0
U2	14.6	3.7	5.7	1.94	0.26	0.029	0.004	0.051	20.5	Bal.	41.7	3.18
U3	12.8	3.3	7.0	1.70	0.22	0.028	0.004	0.050	27.3	Bal.	36.4	12.1
U4	11.2	2.9	8.2	1.49	0.19	0.027	0.004	0.044	34.3	Bal.	31.9	20.1
U5	8.0	2.1	10.7	1.07	0.14	0.020	0.003	0.031	48.2	Bal.	22.8	36.9

จากการทดลองพบว่าเมื่อมีการเติมปริมาณของไทเทเนียมและโคบอลต์ให้มีปริมาณที่สูงขึ้นและชิ้นงานได้ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแล้วจะพบว่าปริมาณของ γ' และคาร์ไบด์ที่เพิ่มมากขึ้น



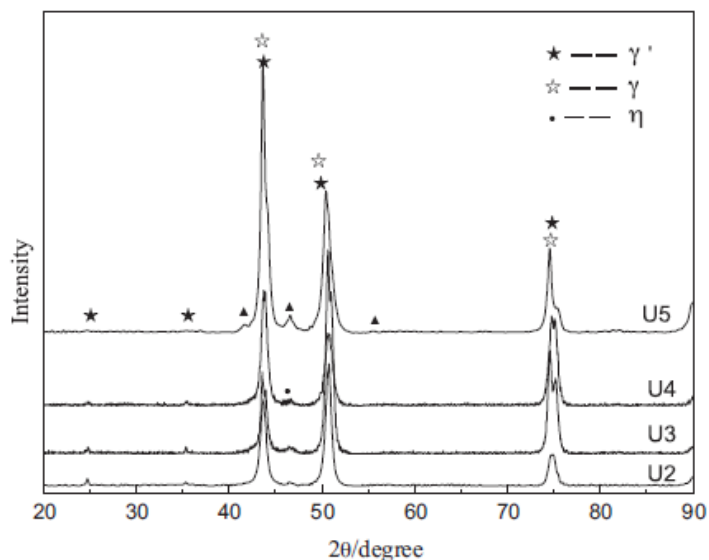
ภาพที่ 2.11 ลักษณะสัณฐานของเฟส γ' ในโลหะผสมพิเศษ [9]



ภาพที่ 2.12 โครงสร้างของโลหะผสมพิเศษโดยใช้เครื่องอิเล็กตรอนแบบส่องกวาด [9]

โดยเมื่อนำไปตรวจสอบด้วย XRD จะพบว่าเฟสแกมมา (γ) และแกมมาไพรม์ (γ') เกิดขึ้นในโครงสร้างจริงอีกทั้งยังเกิดเฟสของ Ni_3Ti ขึ้นในโครงสร้างโดยจะพบในโครงสร้างที่มีการเพิ่มปริมาณของไทเทเนียมและโคบอลต์ที่สูงขึ้น ซึ่งผลของการเติมไทเทเนียมและโคบอลต์ลงไปโลหะผสมพิเศษจะทำให้เกิดอิต้าเฟสและเกิด $(\text{Ni,Co,Cr})_3(\text{Ti,Al})$ ใน γ และ γ' โดยเกิดจากการเปลี่ยนแปลง

โครงสร้างของ γ' เป็นโครงสร้างแบบอิต้าเฟสเนื่องมาจากผลของการเติมไทเทเนียมและโคบอลต์โดยที่ถ้ามีการเติมปริมาณของไทเทเนียมมากเกินไปจะทำให้โครงสร้างที่ได้เกิดเฟสของอิต้าเฟส



ภาพที่ 2.13 ผลการทดสอบด้วย XRD [9]

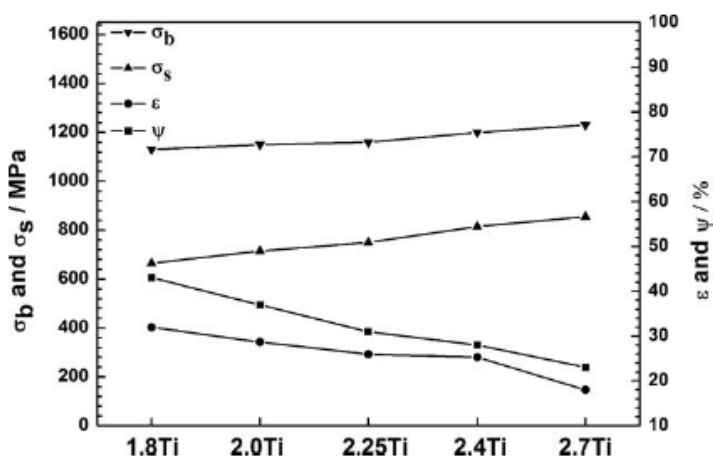
2.10.3 วิวัฒนาการของโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของการปรับไทเทเนียมในโลหะผสมพิเศษเกรด Nimonic 80A

Yulai Xua, Caixiong Yanga, Xueshan Xiaoa, Xiuli Caob, Guoqing Jia c, Zhi Shenc [10] ศึกษาโลหะผสมเนื้อพื้นนิคเกิลโดยทั่วไปแล้วจะเกิดการตกตะกอนของเฟส γ' โดยจะมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมอยู่ภายในโครงสร้าง γ เมื่อมีการเติมไทเทเนียมให้สูงขึ้น จะทำให้ volum fraction ของ γ' เพิ่มขึ้นด้วยแต่จะทำให้ fault energy ใน γ' กลับลดลง การที่มีปริมาณของ γ' ทำให้โลหะผสมพิเศษมีความแข็งแรงสูงและสามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้โดยทำการทดลองโดยการเพิ่มปริมาณของไทเทเนียมขึ้นเรื่อยๆแล้วทำการทดสอบ tensile strength และ stress rupture ซึ่งแสดงส่วนผสมของ Nimonic 80 ดังแสดงในตารางที่ 2.13

ตารางที่ 2.13 แสดงส่วนผสมของโลหะผสมพิเศษเกรด Nimonic 80 [10]

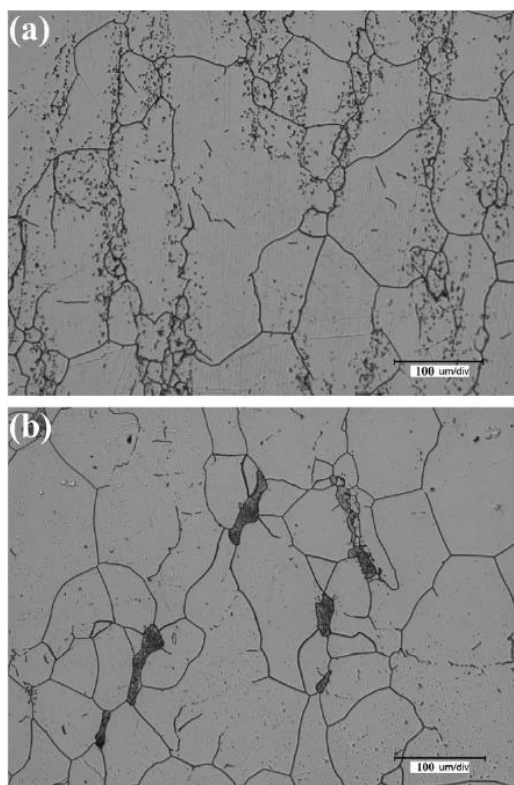
Alloys	C	Cr	Al	Ti	Ni
1.8Ti	0.060	19.5	1.79	1.80	Bal.
2.0Ti	0.059	19.9	1.80	2.0	Bal.
2.25Ti	0.061	19.2	1.82	2.25	Bal.
2.4Ti	0.061	19.6	1.81	2.4	Bal.
2.7Ti	0.062	19.7	1.82	2.70	Bal.

จากผลการทดลองพบว่า หลังจากผ่านกรรมวิธีความร้อนจึงนำชิ้นงานไปทำการทดสอบ tensile strength พบว่า เมื่อมีการเพิ่มปริมาณไทเทเนียมให้สูงขึ้นส่งผลทำให้ ultimate tensile strength yield strength สูงขึ้นแต่ทำให้ค่า total elongation และ reduction in area มีค่าที่ลดลง ดังแสดงในภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.14 ผลของ ultimate tensile strength yield strength total elongation และ reduction in area [10]

เมื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างโดยการเติมปริมาณของไทเทเนียมที่ต่ำจะพบอสเตนไนต์ และการตกตะกอนของ secondary phase บริเวณขอบเกรน แต่เมื่อตรวจสอบโครงสร้างเมื่อมีการเพิ่มปริมาณไทเทเนียมให้สูงขึ้นจะพบการแตกของ secondary phase ที่บริเวณขอบเกรนแทนดังแสดงในภาพที่ 2.15



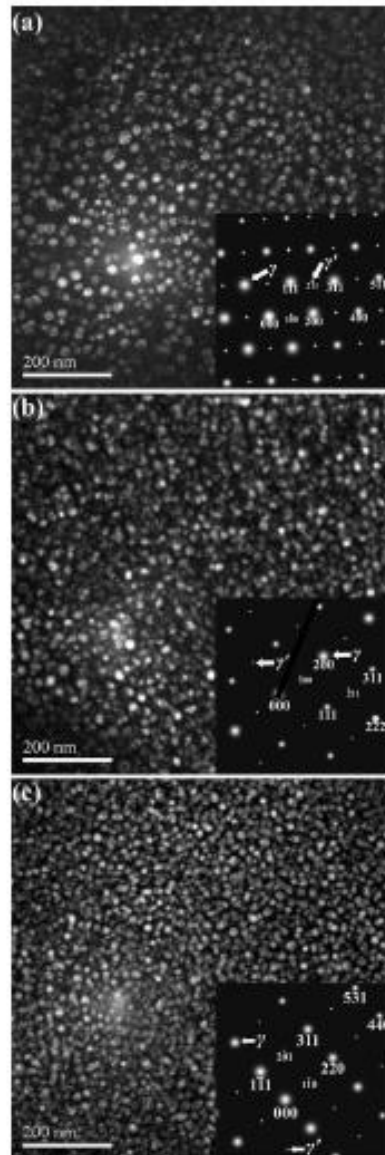
ภาพที่ 2.15 ตรวจสอบโครงสร้างหลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อน

ก) พบโครงสร้างของออสเทนไนต์และsecondary phase

ข) โครงสร้างของออสเทนไนต์ และ secondary phase ที่เกิดการแตกที่บริเวณขอบเกรน

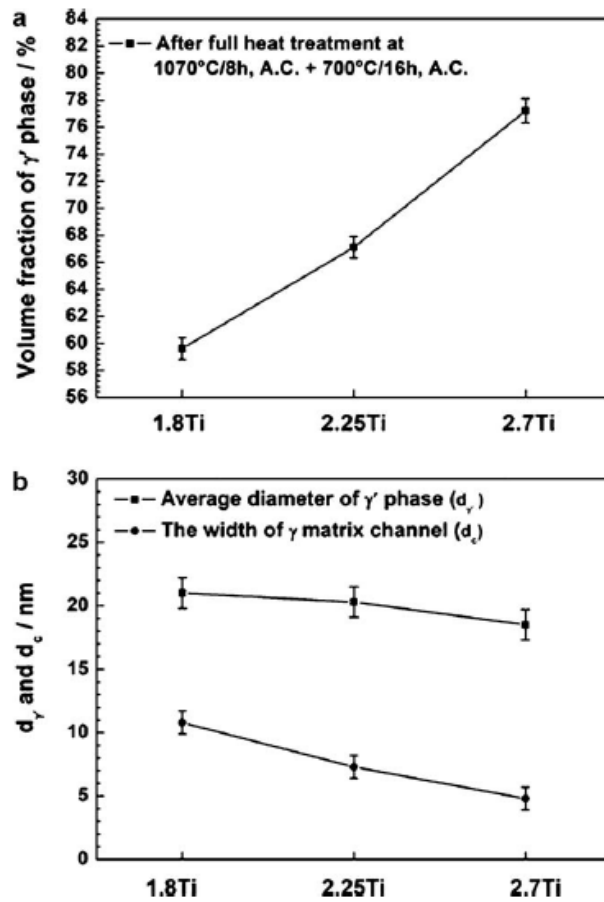
[10]

จากนั้นทำการตรวจสอบโครงสร้างอีกครั้งด้วยเครื่องอิเล็กตรอนแบบส่องผ่านโดยศึกษาชิ้นงานที่มีปริมาณไทเทเนียมน้อยและศึกษาชิ้นงานที่มีปริมาณไทเทเนียมสูง พบว่าโครงสร้างประกอบด้วย γ และ γ' และเมื่อตรวจสอบขนาดเฉลี่ยของ γ' เมื่อมีการเพิ่มปริมาณของไทเทเนียมให้สูงขึ้นทำให้ volume fraction ของ γ' มีค่าเพิ่มขึ้นแต่ทำให้ขนาดและความกว้างของ γ' มีค่าลดลง แต่มีค่าลดลงเล็กน้อยเท่านั้นดังแสดงในภาพที่ 2.16



ภาพที่ 2.16 ตรวจสอบโครงสร้างด้วยเครื่องอิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน พบเฟสของ γ' และ γ ของ 1.8 ของไทเทเนียม 2.25 ของไทเทเนียมและ 2.7 ของไทเทเนียม [10]

ส่วน secondary phase ที่เกิดขึ้นนั้นหลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแล้วโครงสร้างที่เกิดขึ้นคือ Cr_{23}C_6 พบที่บริเวณขอบเกรน อีกทั้งยังพบการแตกของ $\eta\text{-Ni}_3$ เนื่องจากมีปริมาณนิกเกิลที่สูงแต่ที่ปริมาณของไทเทเนียมที่ต่ำจะไม่พบเฟส $\eta\text{-Ni}_3$ ผลของการที่มี volume fraction ของ γ' จะส่งผลทำให้ stress rupture มีค่าสูงขึ้นแต่การตกตะกอนของ $\eta\text{-Ni}_3$ ส่งผลทำให้ stress rupture มีค่าลดลงซึ่งจะพบในโครงสร้างที่มีปริมาณของไทเทเนียมที่สูงดังแสดงในภาพที่ 2.17



ภาพที่ 2.17 สมบัติต่างๆของเฟสแกมมาไพร์ม (γ')

ก) volume fraction ของ γ'

ข) ค่าขนาดเฉลี่ยและขนาดของ γ' ในสัดส่วนโดยปริมาณของเส้นผ่านศูนย์กลาง
หลังจากผ่านกรรมวิธีความร้อนที่อุณหภูมิ 1070 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง [10]

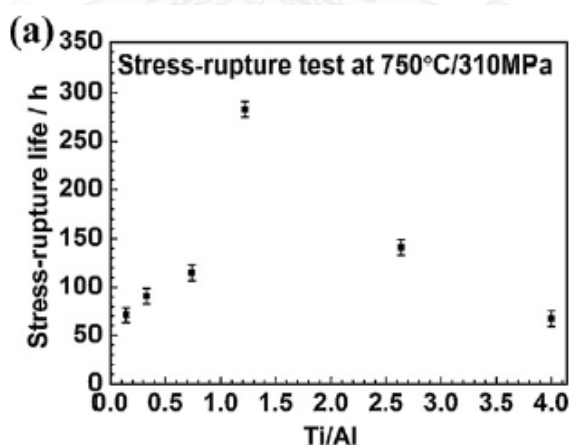
2.10.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่างไทเทเนียมและอะลูมิเนียมและสมบัติของการแตกหักในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล

Yulai Xua, Lei Zhanga, Jun Li a, Xueshan Xiaoa, Xiuli Caob, Guoqing Jia c, Zhi Shenc [11] ศึกษาโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลจะมีความต้านทานการคืบและ rupture strength ที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากการตกตะกอนของ γ' ในเนื้อพื้น γ ซึ่งผลของการเติมธาตุผสมระหว่างอะลูมิเนียมและไทเทเนียมมีผลต่อโครงสร้างและสมบัติทางกล โดยการที่เราเพิ่มปริมาณของอะลูมิเนียมและไทเทเนียมจะทำให้ volume fraction ของ γ' สูงขึ้นแต่จะลด fault energy ของ γ' ให้มีค่าลดลง ตารางที่ 2.14 แสดงส่วนผสมของธาตุที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 2.14 ส่วนผสมของธาตุที่ใช้ในการทดลอง [11]

Ti/Al	Ti	Al	C	Cr	B	Mg	Ni
0.14	0.5	3.5	0.060	19.5	0.008	0.005	Bal.
0.33	1.0	3.0	0.060	19.5	0.008	0.005	Bal.
0.74	1.7	2.3	0.060	19.5	0.008	0.005	Bal.
1.22	2.2	1.8	0.060	19.5	0.008	0.005	Bal.
2.64	2.9	1.1	0.060	19.5	0.008	0.005	Bal.
4.0	3.2	0.8	0.060	19.5	0.008	0.005	Bal.

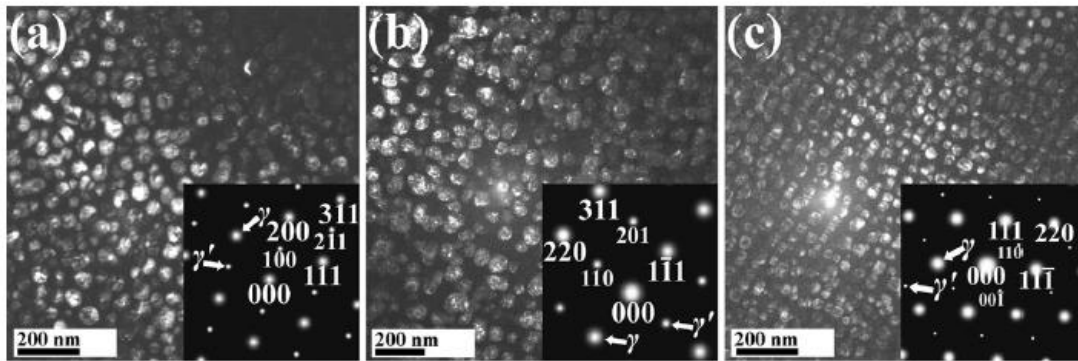
ผลการทดลองพบว่า เมื่อมีอัตราส่วนของไทเทเนียมต่ออะลูมิเนียมเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ stress rupture มีค่าลดลงดังแสดงในภาพที่ 2.18



ภาพที่ 2.18 กราฟ stress rupture ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส [11]

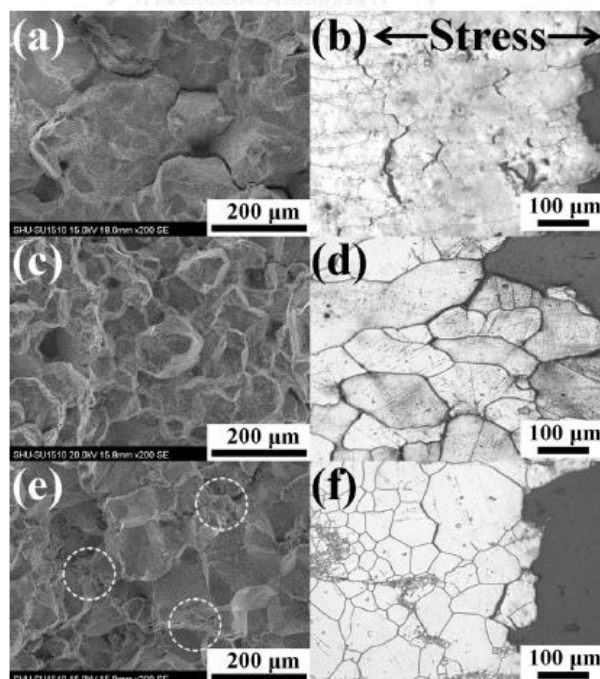
จากการตรวจสอบด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องผ่านจะพบว่า จะมีโครงสร้างของ γ' ในโครงสร้างเนื้อพื้น γ และเมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนของไทเทเนียมต่ออะลูมิเนียมจะส่งผลทำให้สัดส่วน

เชิงปริมาตร (volume fraction) ของ γ' เกิดการลดลงเล็กน้อย การมีปริมาณของ γ' และ γ จะเป็นการกันไม่ให้เกิดคาร์ไบด์ Cr_{23}C_6 ที่บริเวณขอบเกรน และในเกรนดังแสดงในภาพที่ 2.19



ภาพที่ 2.19 เปรียบเทียบขนาดของ γ' หลังจากผ่านกระบวนการทางความร้อน [11]

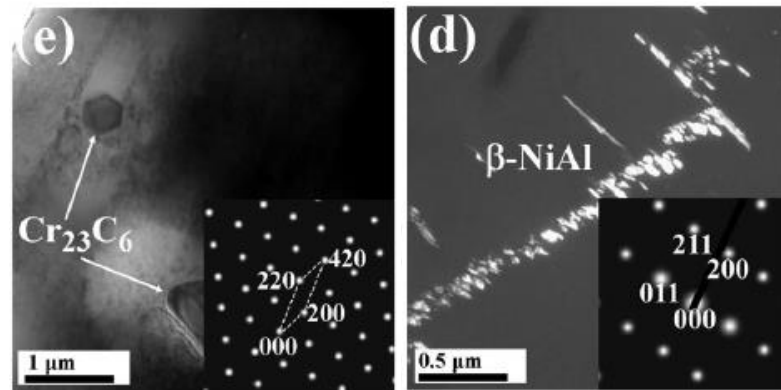
จากรูปเป็นการเปรียบเทียบขนาดของ γ' หลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อนพบว่าขนาดของ γ' มีขนาดที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากความอนุภาคของ γ' ขณะทำการทดสอบ stress rupture ดังแสดงในภาพที่ 2.19 และในระหว่างทำการทดสอบพบว่าเกิด $\beta\text{-NiAl}$ ขึ้นในเฟส γ' ดังแสดงในภาพที่ 2.20



ภาพที่ 2.20 บริเวณพื้นผิวของชิ้นงานที่มีอัตราส่วนของไทเทเนียม

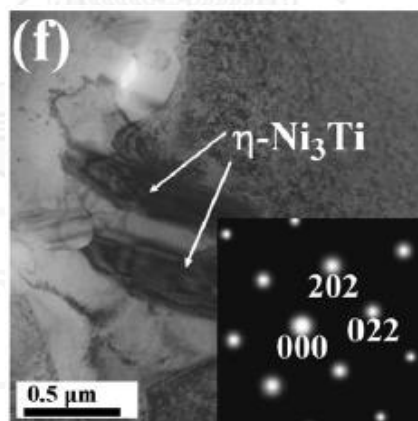
ต่ออะลูมิเนียมที่แตกต่างกัน [11]

โดยเกิดการแตกของเนื้อพื้นเมื่อมีอัตราส่วนของไทเทเนียมต่ออะลูมิเนียมที่ค่อนข้างต่ำ ในขณะที่การที่มีอัตราส่วนของไทเทเนียมต่ออะลูมิเนียมในปริมาณที่สูงจะเกิดการแตกที่บริเวณขอบเกรนเท่านั้น



ภาพที่ 2.21 การตกตะกอนของเฟส β -NiAl ในเนื้อพื้น [11]

โดยจะเกิดการแตกที่ขอบเกรนที่อุณหภูมิสูงและมีความเครียดสูง อย่างไรก็ตามการที่อัตราส่วนของไทเทเนียมต่ออะลูมิเนียมต่ำจะพบว่าชิ้นงานมีความเหนียวที่ค่อนข้างสูงและพบคาร์ไบด์ Cr_{23}C_6 ที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงาน



ภาพที่ 2.22 การแทรกตัวของ η -Ni₃Ti ที่บริเวณขอบเกรน

โดยที่เฟสของ η -Ni₃Ti มีโครงสร้างเป็นเฮกซะโกนอล ซึ่งเป็นเฟสที่อันตรายต่อโครงสร้างเนื่องจากจะทำให้มีความแข็งแรงที่ลดลง [11]

2.11 ออกซิเดชันในโลหะผสมพิเศษ

สมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของโลหะผสมพิเศษคือมีความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชันได้ดี ดังนั้นจึงได้มีการทดสอบเกี่ยวกับความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชันของโลหะผสมพิเศษโดยทดสอบโลหะผสมพิเศษทั้งหมด 24 ชนิดและตรวจสอบความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10,000 ชั่วโมง โดยตารางที่ 2.15 และตารางที่ 2.16 แสดงส่วนประกอบของโลหะผสมพิเศษต่างๆที่ใช้ในการทดสอบ [12]

ตารางที่ 2.15 ส่วนประกอบของโลหะผสมพิเศษต่างๆที่ใช้ในการทดสอบและผลของการทดสอบความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชัน [12]

Alloy	Source	Nominal composition (wt %)										Zone thickness (mm)			Ref. No. for Fig. 7.1.1.	
		Ni	Co	Fe	Cr	Mo	W	Mn	Si	C	Others	Sur-face scale	Inter-granular penetr.	Alloy depletion		Total
Group A TD nickel chromium	Fansteel	78	-	-	20	-	-	-	-	0.05	ThO ₂ -2	<0.1	-	-	<0.1	1
Group B Hastelloy [®] X	Union Carbide	49	1	18	22	9	-	0.5	0.5	0.10	-	0.6	1.7	-	4.3	2
Haynes [®] 25	Union Carbide	10	50	3	20	-	15	1.5	1.0	0.10	-	0.7	3.6	3.6	3.0	3
GE 2541	General Electric	-	-	72	24	-	-	-	-	-	Al-4,Y-0.2	0.1	2.9	-	3.0	4
Hastelloy [®] C	Union Carbide	57	-	5	15	10	4	1.0	1.0	0.08	-	1.0	2.0	-	3.1	5
Tophet [®] C	W.B. Driver	59	-	23	16	-	-	1.0	1.0	0.15	-	0.4	2.7	-	2.6	6
Inconel [®] 600	International Nickel	75	-	7	16	-	-	1.0	0.7	0.10	-	1.0	1.6	-	3.5	7
50Ni-50Cr	International Nickel	50	-	-	50	-	-	-	-	-	-	0.9	2.6	-	3.5	8
Haynes [®] 188	Union Carbide	22	38	3	22	-	14	1.0	0.5	0.10	La-0.1	0.3	1.9	3.2	5.2	9
Incoloy [®] 800	International Nickel	32	-	45	21	-	-	1.5	1.0	0.10	-	0.4	3.4	4.8	2.4	10
GE 1541	General Electric	-	-	80	15	-	-	-	-	-	Al-4,Y-0.8	0.1	2.3	-	-	-
Group C N-155	Carpenter Steel	20	20	31	21	3	2	1.5	0.5	0.15	Cr-1	0.8	2.0	4.4	4.5	11
Incoloy [®] 825	International Nickel	42	-	29	22	3	-	1.0	0.5	0.05	Cu-2,Ti-1	1.4	1.6	5.1	5.8	12
Inconel [®] 625	International Nickel	62	-	3	22	9	-	0.1	0.3	0.05	Cr-4	0.8	4.4	5.8	6.3	13
RA-333	Rolled Alloys	45	3	18	25	3	3	2.0	1.0	0.08	-	1.3	5.0	5.0	4.6	14
Hastelloy [®] F	Union Carbide	41	2	24	22	6	1	1.5	1.0	0.05	Cr-2	1.6	3.0	-	5.4	15
Tophet [®] A	W.B. Driver	78	-	1	20	-	-	0.1	1.5	0.1	-	0.4	5.0	-	8.4	16
Tophet [®] 30	W.B. Driver	69	-	-	30	-	-	1.0	0.03	-	-	0.4	2.7	8.0	5.5	17
Hastelloy [®] G	Union Carbide	48	-	19	22	6	-	1.3	0.3	0.03	Cr-2,Cu-2	1.5	4.0	-	7.4	18
Haynes [®] 150	Union Carbide	-	50	21	28	-	-	0.5	0.7	0.1	-	1.4	6.0	-	-	-
Group D TD nickel	Fansteel	98	-	-	-	-	-	-	-	-	ThO ₂ -2	10.8	-	-	10.8	19
Ni 270	International Nickel	99.9	-	-	-	-	-	-	-	0.02	-	11.0	-	-	14.6	20
Ni 201	International Nickel	99.5	-	-	-	-	-	-	0.1	0.02	-	14.6	-	-	16.8	21
Ni 200	International Nickel	99.5	-	-	-	-	-	-	0.1	0.15	-	16.8	-	-	-	22

ตารางที่ 2.16 แสดงส่วนประกอบของโลหะผสมพิเศษต่างๆที่ใช้ในการทดสอบและผลของการทดสอบความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชัน [12]

Alloy	Source	Zone thickness (mm)										Ref. No. for Fig. 7.1.1.
		5 000-hr test				10 000-hr test			50 000 hr			
		Surface scale ^a	Inter-granular penetration	Alloy depletion	Total	Surface scale ^a	Inter-granular penetration	Alloy depletion	Total	Extrap. total		
Group A TD nickel chromium	Fansteel	0.8	-	-	0.8	2.4	0	0	2.4 ^c	4.0	1	
Group B Hastelloy [®] X	Union Carbide	1.3	1.0	3.0	4.3	2.0	7.0	7.0	9.0 ^d	18.0	2	
Haynes [®] 25	Union Carbide	2.0	4.0	4.0	6.0	2.0(2.0)	4.0	4.0	8.0	18.0	3	
GE 2541	General Electric	0.4	2.8	-	3.2	0.5(5.0)	4.0	4.0	9.5	20.0	4	
Hastelloy [®] C	Union Carbide	1.8	3.2	6.2	3.0	3.0	3.0	8.0	11.0 ^e	23.0	5	
Tophet [®] C	W.B. Driver	2.0	4.6	-	6.6	1.0(7.0)	4.0	4.0	12.0	25.0	6	
Inconel [®] 600	International Nickel	1.8	7.6	-	9.4	2.0	9.0	-	11.0 ^f	26.0	7	
50Ni-50Cr	International Nickel	1.4	-	5.0	6.4	2.0	7.0	16.0	18.0	27.0	8	
Haynes [®] 188	Union Carbide	3.0	3.0	9.0	12.0	1.5(4.0)	5.0	7.0	12.5	27.0	9	
Incoloy [®] 800	International Nickel	0.8	6.1	8.4	9.2	3.1	8.8	8.8	11.9 ^g	28.0	10	
GE 1541	General Electric	-	-	Not tested	-	-	-	Not tested	-	-	-	
Group C N-155	Carpenter Steel	2.4	5.6	10.6	13.0	2.0(3.0)	5.0	8.0	13.0	35.0	11	
Incoloy [®] 825	International Nickel	3.0	9.0	9.0	12.0	4.0	13.0	13.0	17.0 ^h	36.0	12	
Inconel [®] 625	International Nickel	4.0	6.0	9.3	13.3	0.5(3.0)	6.7	12.5	16.0 ⁱ	37.0	13	
RA-333	Rolled Alloys	1.0	2.0	6.0	7.0	6.0	8.0	10.0	16.0	43.0	14	
Hastelloy [®] F	Union Carbide	0.5(3.0)	4.0	5.0	8.5	2.0(3.0)	6.0	15.0	20.0	43.0	15	
Tophet [®] A	W.B. Driver	1.0	4.0	13.0	14.0	2.0(8.0)	6.0	10.0	20.0	43.0	16	
Tophet [®] 30	W.B. Driver	2.0	4.6	13.0	15.0	4.0(2.0)	6.0	10.0	16.0	45.0	17	
Hastelloy [®] G	Union Carbide	4.4	11.4	11.4	15.8	3.0(2.0)	7.0	16.0	21.0	48.0	18	
Haynes [®] 150	Union Carbide	-	-	Not tested	-	-	-	Not tested	-	-	-	
Group D TD nickel	Fansteel	23.0	-	-	23.0	34.0	-	-	34.0 ^j	75	-	
Ni 270	International Nickel	26.7	-	-	26.7	35.0	20.0	-	56.0	>80	-	
Ni 201	International Nickel	34.6	-	-	34.6	44.0	8.0	-	52.0	>100	-	
Ni 200	International Nickel	41.3	8.0	-	49.3 ^k	b	-	-	b	>100	-	

2.11.1 ผลของอุณหภูมิ

หลังจากการทดสอบการต้านทานออกซิเดชันหลังจากเวลาผ่านไป 500 ชั่วโมงพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิมีความสัมพันธ์ดังแสดงในตารางที่ 2.17

ตารางที่ 2.17 ผลของการทดสอบการต้านทานออกซิเดชันที่อุณหภูมิต่างกัน [12]

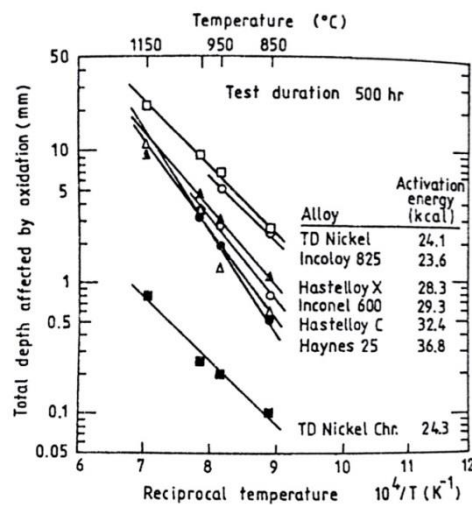
Oxidation of superalloys in 500-hr tests; [22]

	Thickness of affected zone (mm)				TD Ni	TD Nickel chrom.	„Incoloy”825
	„Inconel”600	„Haynes”25	„Hastelloy” C	„Hastelloy” X			
850°C							
Surface scale	0.1	0.2	0.2	0.3	2.5	0.1	0.3
Intergranular penetrat.	0.4	0.3	<0.1	0.6	-	-	0.8
Alloy depletion	0.7	0.3	0.4	0.8	-	-	2.0
Total ^c	0.8	0.5	0.6	1.1	2.5	0.1	2.3
950°C							
Surface scale	0.7	0.4	0.5	0.5	6.5	0.2	1.0
Intergranular penetrat.	1.4	0.8	0.7	1.5	0.2 ^a	-	2.3
Alloy depletion	2.1	1.5	0.8	2.5	-	-	4.0
Total	2.8	1.9	1.3	3.0	6.7	0.2	5.0
1000°C							
Surface scale	0.4	1.0	1.0	0.8	7.0	0.25 ^b	-
Intergranular penetrat.	3.0	1.0	0.5	1.5	2.0 ^a	-	-
Alloy depletion	3.0	2.2	2.5	4.0	-	-	-
Total	3.4	3.2	3.5	4.8	9.0	0.25	-
1150°C							
Surface scale	-	1.6	1.5	2.0	21.5	0.8	-
Intergranular penetrat.	-	1.5	3.5	4.5	-	-	-
Alloy depletion	-	3.0	10.0	7.5	-	-	-
Total	-	4.6	11.5	9.5	21.5	0.8	-

^a Internal oxidation

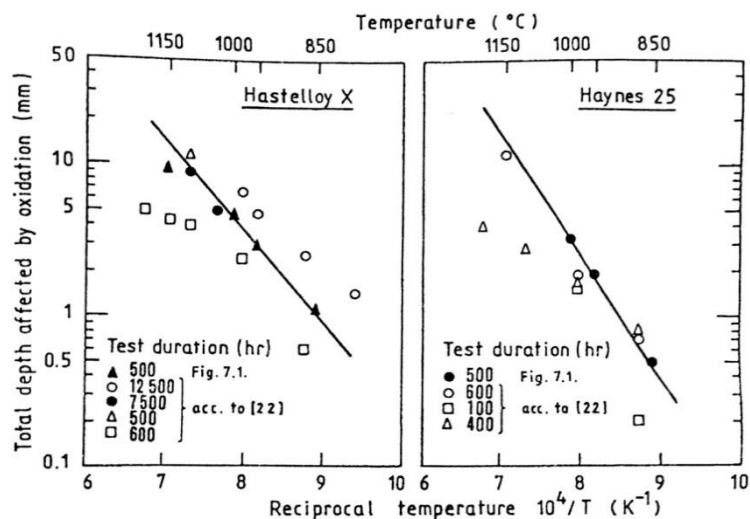
^b Nonuniform; zone 8.0 mm thick in some areas, see text

^c Total is surface scale plus maximum of either intergranular penetration or alloy depletion



ภาพที่ 2.23 ความสัมพันธ์ของพลังงานกระตุ้นสำหรับออกซิเดชัน [12]

จากภาพที่ 2.23 แสดงความชันของกราฟที่มีความสัมพันธ์กับพลังงานกระตุ้นระหว่าง 24 และ 37 kcal/mol โดยมีผลจากการแพร่



ภาพที่ 2.24 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการต้านทานการเกิดออกซิเดชัน [12]

สำหรับโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X ที่ใช้อุณหภูมิของการทดสอบความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชันแสดงในภาพที่ 2.24 พบว่าความชันของกราฟมีลักษณะที่คล้ายกันโดยที่ความลึกของการเกิดออกซิเดชันต่างกันซึ่งอาจจะเกิดจากการที่มีความแตกต่างกันในด้านของธาตุผสมที่ต่างกันด้วย

2.11.2 การทดสอบแบบเร่ง

การทดสอบโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy C Hastelloy X Inconel 600 Haynes 25 และ TD ทดสอบที่ 3,000 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 1150 องศาเซลเซียส โดยจะพบการเกิดออกซิเดชันของโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy C Hastelloy X และ Inconel 600 ดังแสดงในตารางที่ 2.18 การที่มีปริมาณของการเกิดออกซิเดชันที่สูงเกินไปของ Hasnes 25 คาดว่าอาจจะเกิดออกซิเดชันปกคลุมบริเวณพื้นผิวของชิ้นงานทั้งหมด

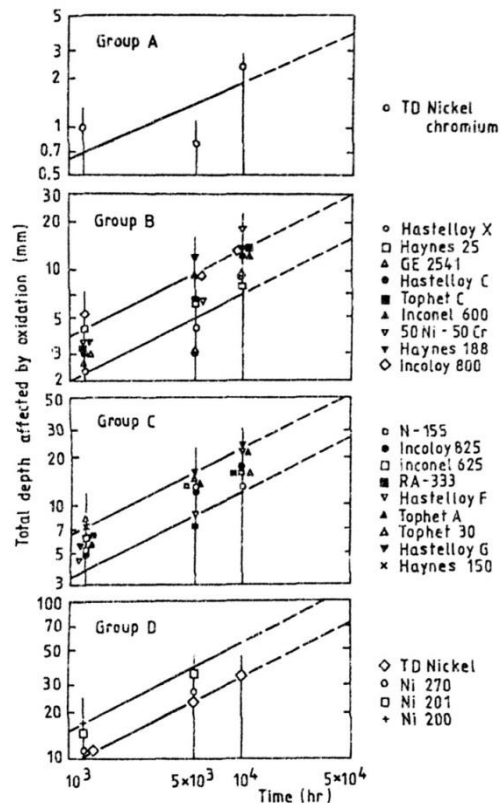
ตารางที่ 2.18 ผลของการทดสอบแบบเร่งในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิลเกรดต่างๆ [12]

Results of accelerated oxidation test in still air at 1150°C for 3000 hr; [22]		
	Total depth affected by oxidation (mm)	
	Observed	Predicted
„Hastelloy“ X	18.0	19.0
„Hastelloy“ C	20.5	25.0
„Inconel“ 600	38.5	49.0
TD Nickel chromium	(40) ^a	5.0
„Haynes“ 25	175	41.5

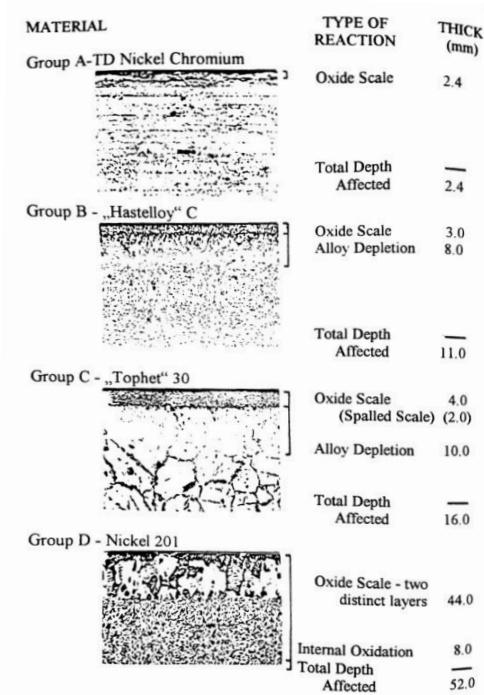
^a40 mm in local area; 4 mm generally

2.11.3 ผลของเวลา

ความลึกของการเกิดออกซิเดชันจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นดังแสดงในตารางที่ 2.17 และภาพที่ 2.25 โดยแต่ละช่วงของเวลาจะพบว่าผลของ surface scale, intergranular penetration alloy depletion จะมีลักษณะเพิ่มขึ้นแบบลิเนียร์ ซึ่งจากการทดสอบสามารถแบ่งโลหะผสมพิเศษออกเป็น 4 กลุ่ม



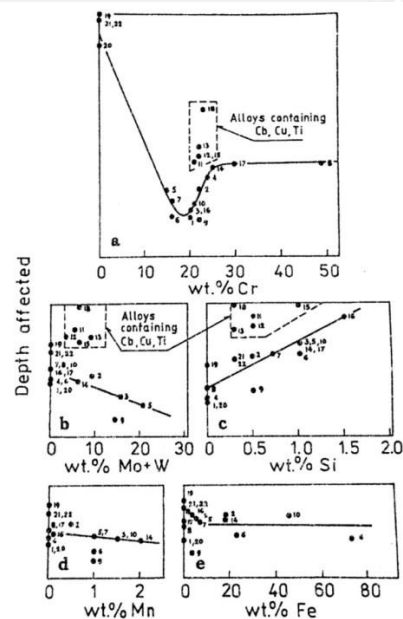
ภาพที่ 2.25 ผลของเวลาต่อการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส [12]



ภาพที่ 2.26 ชนิดของออกไซด์ที่เกิดขึ้นหลังจาก 10,000 ชั่วโมงที่ 1000 องศาเซลเซียส [12]

2.11.4. ผลของธาตุผสม

ความแตกต่างของการเกิดออกไซด์ชั้นของธาตุทั้ง 4 กลุ่ม แสดงในตารางที่ 14 พบว่ามีปริมาณของธาตุผสมที่แตกต่างกันจากภาพที่ 2.26 เป็นการทดสอบออกไซด์ชั้นที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 50,000 ชั่วโมง



ภาพที่ 2.27 ผลของธาตุผสมที่มีผลต่อการเกิดออกไซด์ชั้น [12]

โครเมียม เป็นที่ทราบกันว่าโครเมียมจะช่วยเพิ่มการต้านทานการเกิดออกซิเดชันเมื่อเราเพิ่มปริมาณโครเมียมจาก 0.15 ถึง 20 % โดยน้ำหนัก จากภาพที่ 27a พบว่าในกลุ่ม A และ B จะมีความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชันได้ค่อนข้างสูงเนื่องจากมีปริมาณโครเมียมอยู่ แต่ในกลุ่ม D จะไม่มีพบปริมาณโครเมียม และกลุ่ม C จะมีปริมาณโครเมียมที่มากกว่า 20% โดยน้ำหนัก

โมลิบดีนัมและทังสเตน โดยการเพิ่มปริมาณโมลิบดีนัมและทังสเตนทำให้ความต้านทานการเกิดออกซิเดชันสูงขึ้นดังแสดงในรูป 27b โดยการต้านทานการเกิดออกซิเดชันส่วนมากคือกลุ่ม B เนื่องจากมีปริมาณของโมลิบดีนัมและทังสเตนสูง และประโยชน์ของการเติมทังสเตนคือสามารถนำไปใช้งานได้ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส

ซิลิกอน การเพิ่มปริมาณซิลิกอนทำให้ความต้านทานการเกิดออกซิเดชันลดลงดังแสดงในรูป 27c ตัวอย่างเช่น Tophet มีความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชันน้อยกว่า Inconel 600 โดยทั้งสองมีส่วนผสมทางเคมีที่คล้ายกันแต่ Tophet มีปริมาณซิลิกอนที่สูงกว่า

โคลัมเบียม คอปเปอร์ ไทเทเนียม ดูเหมือนว่า โคลัมเบียม คอปเปอร์ ไทเทเนียม จะช่วยลดการต้านทานการเกิดออกซิเดชันดังแสดงในภาพที่ 27a-c พบว่าในกลุ่ม C มีปริมาณของธาตุที่มากกว่า 4% โดยน้ำหนัก โดยพบว่า Inconel 625 มีปริมาณของส่วนผสมทางเคมีใกล้เคียงกับ Hastelloy X แต่พบว่าการที่มีปริมาณโคลัมเบียมที่มากกว่า 4% โดยน้ำหนัก จะส่งผลทำให้ความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชันน้อยกว่า Hastelloy X

แมงกานีส เนื่องจากมีปริมาณที่น้อย(1% โดยน้ำหนัก) ทำให้ไม่มีผลต่อความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชัน

เหล็ก ไม่มีผลต่อการความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชัน เนื่องจากมีสมบัติคล้ายนิกเกิลและโคบอลต์ [12]

บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการทดลอง

3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้สำหรับทำงานวิจัย

3.1.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงาน

- 3.1.1.1 ชิ้นงาน (โลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X)
- 3.1.1.2 เตา Plasma Arc Melting สำหรับหลอมชิ้นงาน
- 3.1.1.3 เครื่องตัดชิ้นงานโลหะ Discotom

3.1.2 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้สำหรับเตรียมผิวชิ้นงาน

- 3.1.2.1 กระดาษทราย
- 3.1.2.2 เครื่องขัดผิวโลหะ
- 3.1.2.3 อุปกรณ์ทำตัวเรือนแบบเย็น
- 3.1.2.4 ผ้าสักหลาด
- 3.1.2.5 ผงอะลูมินา

3.1.3 เครื่องมือทดสอบชิ้นงาน

- 3.1.3.1 เตาทดสอบออกซิเดชัน
- 3.1.3.2 เครื่องชั่งดิจิตอลแบบ 4 ตำแหน่ง

3.1.4 เครื่องมือวิเคราะห์ชิ้นงาน

- 3.1.4.1 กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope)
- 3.1.4.2 เครื่องวิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบในสารตัวอย่าง
โดยใช้การวัดปริมาณรังสีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence)
- 3.1.4.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope)
- 3.1.4.4 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer)

3.2 วิธีดำเนินการทดลอง

3.2.1 กระบวนการเตรียมชิ้นงาน

นำชิ้นงานโลหะผสมพิเศษ Hastelloy X มาตัดให้มีขนาดเล็กและซึ่งส่วนผสมของการเติม อะลูมิเนียม การเติมอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียม และการเติมไทเทเนียม ตามค่าเปอร์เซ็นต์ตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ปริมาณสัดส่วนเป็นร้อยละโดยน้ำหนักของโลหะผสมพิเศษ ที่เป็นชิ้นงานตัวอย่างก่อนที่จะนำมาหลอม

Condition	โลหะผสมพิเศษ (% โดยน้ำหนัก)	อะลูมิเนียม (%โดยน้ำหนัก)	ไทเทเนียม (% โดยน้ำหนัก)
Hastelloy X	100	-	-
A1	98	2	-
A2	96	4	-
A3	94	6	-
T1	98	-	2
T2	96	-	4
T3	94	-	6
C1	98	1	1
C2	96	2	2
C3	94	3	3

3.2.2 กระบวนการหลอมแบบอาร์ก

เมื่อซึ่งสัดส่วนของธาตุต่างๆตามตารางที่ 3.1 เรียบร้อยแล้วจากนั้นนำชิ้นงานที่ได้สัดส่วนตามต้องการหลอมในเตาหลอมแบบ Plasma Arc Furnace ในระบบสุญญากาศดังแสดงในภาพที่ 3.1 ทำการปล่อยแก๊สอาร์กอนสำหรับไล่แก๊สออกซิเจนเพื่อให้โครงสร้างของชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการหลอมแบบอาร์กมีออกซิเจนอยู่ในชิ้นงานน้อยที่สุดโดยใช้เตาหลอมอาร์กจะได้ชิ้นงานทรงครึ่งทรงกลม ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.1 เต้าอาร์กสุญญากาศ (Arc Melting Furnace) และแม่พิมพ์ที่ใช้ในการหลอม [13]



ภาพที่ 3.2 ชิ้นงานก่อนและหลังหล่อโดยเต้าอาร์กสุญญากาศ [14]

3.2.3 ตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี

นำชิ้นงานที่ผ่านการหลอมแบบอาร์ก ตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence, XRF) ดังแสดงในภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 เครื่องวิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบในสารตัวอย่าง โดยใช้การวัดปริมาณรังสีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence)

3.3 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

3.3.1 นำชิ้นงานผ่านกระบวนการหลอมแบบอาร์กมาอบละลาย (Solution Treatment) ที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อให้โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังกระบวนการหลอมแบบอาร์กมีโครงสร้างที่สม่ำเสมอ จากนั้นนำชิ้นงานทำการบ่มแข็ง (Aging) ที่อุณหภูมิ 760, 800, 845 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อให้เกิดการตกตะกอนของเฟสที่ต้องการ

3.3.2 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

นำชิ้นงานมาตัดด้วยเครื่องตัดโลหะ Discotom ให้เป็นชิ้นเล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 เซนติเมตร รูปตัวรีแบบรีนอน เพื่อทำการขัดชิ้นงานหายับด้วยกระดาษทรายซิลิกอนคาร์ไบด์ตั้งแต่ความละเอียดเบอร์ 80-1200 หลังจากขัดหายับแล้วขัดละเอียดโดยใช้ผงอะลูมินาที่มีขนาด 0.3 ไมครอน ขัดจนได้ผิวเรียบเป็นมันไม่มีรอยจากนั้น นำชิ้นงานไปกัดกรด (Etching) บนผิวที่ขัดแล้ว โดยใช้กรดเมลเบิ้ลที่มีส่วนผสมของคอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4) 10 กรัม กรดไฮโดรคลอริก (HCL) 50 มิลลิลิตร และน้ำ (H_2O) 50 มิลลิลิตร จะทำให้เห็นโครงสร้างจุลภาคที่ชัดเจนมากยิ่งขึ้น จากนั้นนำชิ้นงานที่ทำละลายที่ 1175 องศาเซลเซียสและทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 760, 800 และ 845 องศาเซลเซียส เพื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ด้วยและใช้กล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope; OM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope; SEM)

3.3.3 ตรวจสอบเฟสที่เกิดจากการตกตะกอน

ตรวจสอบเฟสที่เกิดจากการตกตะกอนด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบน รังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer, XRD)

3.4 การทดสอบอัตราการเกิดออกซิเดชัน

นำชิ้นงานที่เติมอะลูมิเนียม ไทเทเนียมและอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียม ทำละลายที่ 1175 องศาเซลเซียส เมาที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 0-100 ชั่วโมง โดยจะทำการชั่งน้ำหนักในแต่ละเวลาและเปรียบเทียบความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชันของโลหะผสมพิเศษที่มีส่วนผสมที่ต่างกัน



ภาพที่ 3.4 เบ้าหลอมสำหรับใส่ชิ้นงานภายหลังจากการผ่านการทดสอบความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส

3.4.1 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและการวิเคราะห์โครงสร้างภายหลังจากการทดสอบออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมง

3.4.1.1 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope; SEM) และตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมี EDS (Energy Disperse Spectroscopoe, EDS) ในการศึกษาโครงสร้างของเฟสที่เกิดขึ้นรวมทั้งศึกษาถึงส่วนประกอบเฟสที่เกิดขึ้น

3.4.1.2 ตรวจสอบชั้นฟิล์มออกไซด์ที่เกิดขึ้นภายหลังจากการทดสอบออกซิเดชันที่ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมง ด้วยการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer)

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

โลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X คือโลหะผสมเนื้อพื้นนิเกิลที่มีเพียงโครงสร้างของเฟสแกมมา (γ) และคาร์ไบด์ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากไม่มีธาตุผสมอะลูมิเนียมหรือไทเทเนียมทำให้ไม่มีเฟสของแกมมาไพรม์ (γ') ที่ให้ความแข็งแรงที่ดีที่สุดในกลุ่มโลหะผสมพิเศษ เนื่องจากเฟสนี้จะช่วยขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการเติมธาตุอะลูมิเนียม การเติมไทเทเนียม และการเติมอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียม ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันเพื่อศึกษาการเกิดเฟส γ' นอกจากนี้ยังคาดการณ์ด้วยว่า การเติมอะลูมิเนียมลงไปจะมีส่วนช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูงด้วย

4.1 การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X และเกรดใหม่ภายหลังการหลอมแบบอาร์กด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence; XRF)

ภายหลังการซึ่งน้ำหนักของภายหลังการผ่านกระบวนการหลอมแบบอาร์กตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วย เทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ แสดงปริมาณธาตุต่างๆดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X และเกรดใหม่ภายหลังการหลอมแบบอาร์ก และวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์

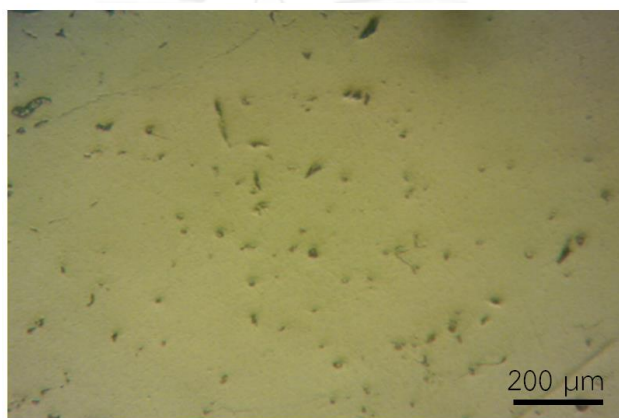
Element	Ni	Cr	Fe	Mo	Co	W	C	Mn	Si	B	Al	Ti
Hastelloy X	49.89	21.48	18.88	7.57	0.94	...	...	0.52	0.6	...	...	...
HX+2%Al	48.54	21.55	18.01	7.14	0.89	0.47	...	0.41	0.86	...	2.12	...
HX+4%Al	45.04	23.2	18.02	7.19	0.85	0.48	...	0.34	1.48	...	2.81	...
HX+6%Al	41.3	19.17	16.1	5.76	0.7	...	...	0.42	5.15	...	6.2	...
HX+2%Ti	47.41	21.27	18	7.1	0.75	0.46	...	0.4	0.5	...	0.24	3.87
HX+4%Ti	46.22	20.86	17.68	6.6	0.8	0.82	...	0.4	1.53	...	0.48	4.28
HX+6%Ti	44	20.38	17.11	6.44	0.66	0.45	...	0.42	3.33	...	0.6	6.24
HX+1%Al+1%Ti	47.75	21.78	17.9	6.78	0.87	...	...	0.46	1.63	...	1.46	1.2
HX+2%Al+2%Ti	46.6	20.82	17.78	7.02	0.87	0.46	...	0.5	1.74	0.02	2.1	2.05
HX+3%Al+3%Ti	44.64	19.82	17.32	6.84	0.76	...	...	0.45	2.22	...	2.44	5.27

จากตาราง 4.1 เป็นการคำนวณส่วนผสมทางเคมีใหม่ โดยการตัดธาตุต่างๆที่คาดว่าไม่พบในโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X ออกซึ่งคาดว่าเกิดจากการผิดพลาดจากการวิเคราะห์ผลการทดลองและการเตรียมชิ้นงาน โดยจะแสดงผลของธาตุทั้งหมดในภาคผนวก

4.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะของโครงสร้างจุลภาค

4.2.1.วิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์แสง

4.2.1.1 ชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X ภายหลังจากหล่อแบบอาร์ก โครงสร้างจุลภาคที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องจุลทรรศน์แบบแสงรุ่น OLYMPUS PME3 (กำลังขยายขณะทำการวิเคราะห์ 500 เท่า) ของชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X ภายหลังจากหล่อแบบอาร์กและหลอมใหม่โดยการทำละลาย (Solutioning) ที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง มีลักษณะดังภาพที่ 4.1 พบว่าโครงสร้างประกอบด้วยเนื้อพื้นอนุภาคสีอ่อน และมีอนุภาคสีเข้มกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอทั่วเนื้อพื้น



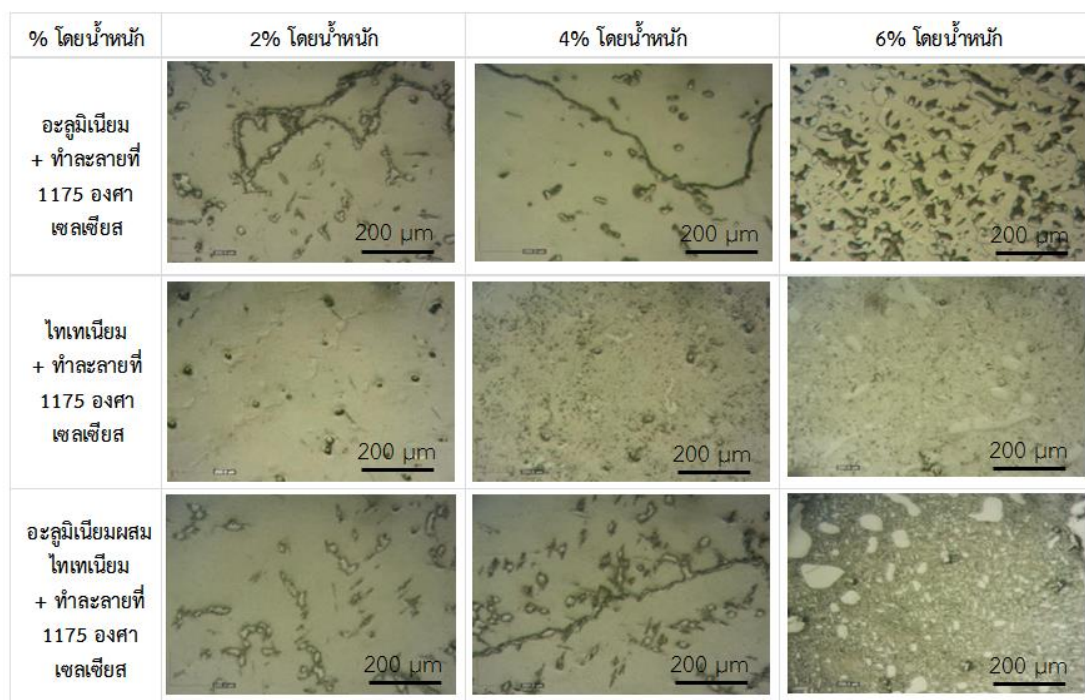
ภาพที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคโดยกล้องจุลทรรศน์แสงของชิ้นงาน Hastelloy x ผ่านการทำละลายที่ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

จากภาพพบว่าโครงสร้างงานจุลภาคที่ได้ยังเกิดเป็นลักษณะของเฟสขนาดเล็กกระจายอยู่ในเนื้อพื้นไม่ได้หลอมจนมีความสม่ำเสมอทั้งหมด ซึ่งคาดว่าเกิดขึ้นเนื่องมาจากการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียสเพียง 4 ชั่วโมง ส่งผลทำให้เฟสที่เกิดขึ้นยังไม่สามารถละลายลงในเนื้อพื้นได้สมบูรณ์ โดยอนุภาคเล็กๆของเฟสสีเข้มนี้น่าจะเป็นเฟสคาร์ไบด์ประเภท MC คาร์ไบด์หรือสารประกอบระหว่างโลหะอื่นๆ ซึ่งต้องทำการศึกษาและอธิบายในส่วนต่อไป

4.2.1.2 ชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X และเกรดใหม่ ภายหลังจากหลอมแบบอาร์ก และผ่านการทำละลาย

โครงสร้างจุลภาคที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงรุ่น OLYMPUS PME3 (กำลังขยายขณะทำการวิเคราะห์ 500 เท่า) ของชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X ภายหลังจากหล่อแบบอาร์กและหลอมใหม่ โดยการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4

ชั่วโมง โดยแบ่งส่วนผสมทางเคมีออกเป็น 3 กลุ่มคือ การเติมอะลูมิเนียม การเติมไทเทเนียม และการเติมอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียมและในแต่ละกลุ่มมีปริมาณการเติมที่ต่างกันได้แก่ 2% 4% และ 6% โดยน้ำหนัก ดังแสดงในภาพที่ 4.2

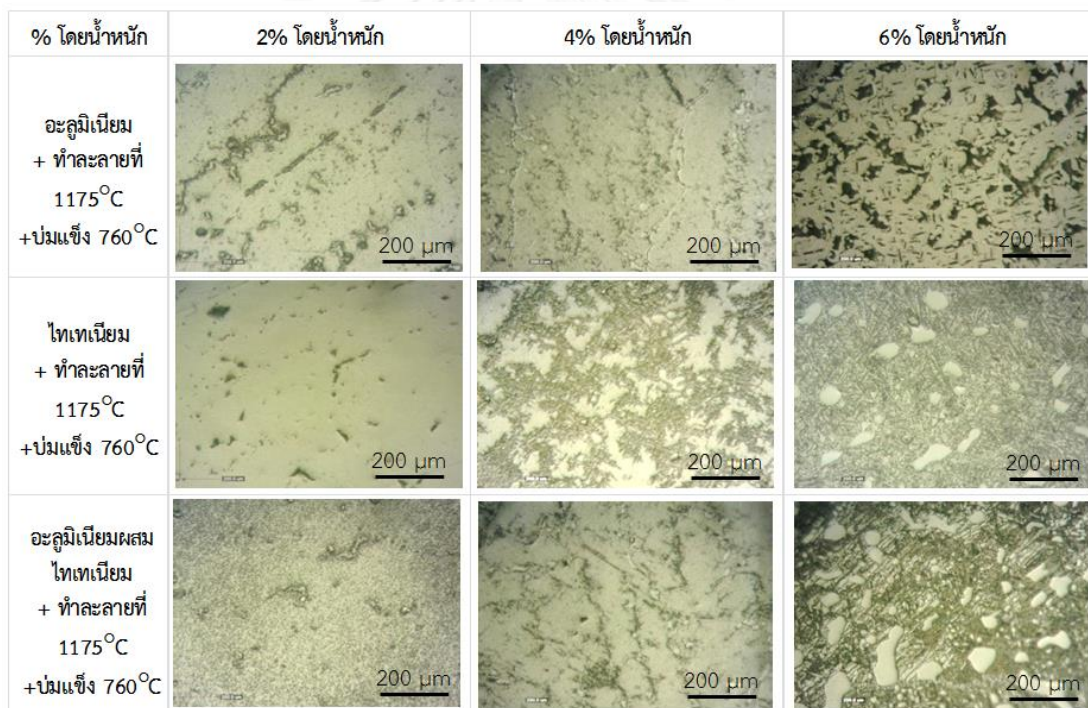


ภาพที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคโดยกล้องจุลทรรศน์แสงของชิ้นงานทั้ง 3 กลุ่ม ที่เติมอะลูมิเนียม ไทเทเนียม และอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียม ตามลำดับ ในปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ 2% 4% และ 6% โดยน้ำหนัก โดยผ่านการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคชิ้นงานที่มีการเติมอะลูมิเนียมปริมาณ 2% โดยน้ำหนัก พบว่าเกิดการตกตะกอนของเฟสสีอ่อนและเฟสสีเข้มบนเนื้อพื้น โดยเมื่อมีการเพิ่มปริมาณการเติมอะลูมิเนียมเป็น 4% และ 6% โดยน้ำหนัก พบว่าเฟสสีอ่อนมีการตกตะกอนในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น และมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นซึ่งคาดว่าจะเฟสชิกมา ซึ่งเป็นสารประกอบระหว่างโลหะที่ตกตะกอนออกมา อีกทั้งยังพบเฟสสีเข้มซึ่งคาดว่าเป็นหลุมที่เกิดจากการหลุดร่อนของเฟสที่เกิดจากการตกตะกอนภายหลังจากการทำละลายหรือภายหลังจากการเตรียมชิ้นงานเพื่อวิเคราะห์ โดยจะทำการศึกษาเฟสที่เกิดจากการตกตะกอนขึ้นในหัวข้อถัดไป

4.2.1.3 ชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X และเกรดใหม่ ภายหลังจากหล่อแบบอาร์ก การทำละลาย และผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส

โครงสร้างจุลภาคที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงรุ่น OLYMPUS PME3 (กำลังขยายขณะทำการวิเคราะห์ 500 เท่า) ของชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X ภายหลังจากการหล่อแบบอาร์กและหลอมใหม่โดยการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมงและผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยแบ่งส่วนผสมทางเคมีออกเป็น 3 กลุ่มคือ การเติมอะลูมิเนียม การเติมไทเทเนียม และการเติมอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียมและในแต่ละกลุ่มมีปริมาณการเติมที่ต่างกันได้แก่ 2% 4% และ 6% โดยน้ำหนัก ดังแสดงผลได้ในรูปที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคโดยกล้องจุลทรรศน์แสงของชิ้นงานทั้ง 3 กลุ่ม ที่เติมอะลูมิเนียม ไทเทเนียม และอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียม ตามลำดับ ในปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ 2% 4% และ 6% โดยน้ำหนัก โดยผ่านการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และผ่านการบ่มแข็งอุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

เมื่อมีการเพิ่มปริมาณของทั้งอะลูมิเนียม ไทเทเนียมและอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียมจาก 2% โดยน้ำหนักเป็น 6% โดยน้ำหนัก พบว่าขนาดของเฟสสีอ่อนหรือเฟสชิกมาที่เกิดการตกตะกอนจะมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นและมีปริมาณมากขึ้น โดยซึ่งผลการทดลองนี้มีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกับผลที่ได้ในหัวข้อที่ 4.2.1.2

เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคชิ้นงานที่มีการเติมอะลูมิเนียมปริมาณ 6% โดยน้ำหนัก ผ่านการทำละลายที่ 1175 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมงและทำการบ่มแข็งที่ 760 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบการตกตะกอนบนชิ้นงานเช่นเดียวกับชิ้นงานที่ไม่ได้ทำการบ่มแข็ง ซึ่งมีโครงสร้างที่คล้ายคลึงกันคือ การตกตะกอนของเฟสสีอ่อนที่มีขนาดใหญ่ซึ่งคาดว่าจะน่าจะเป็นเฟสชิกมาและยังพบเฟสสีเข้มที่คาดว่าเป็นหลุมในปริมาณที่มากขึ้นด้วยเช่นกัน

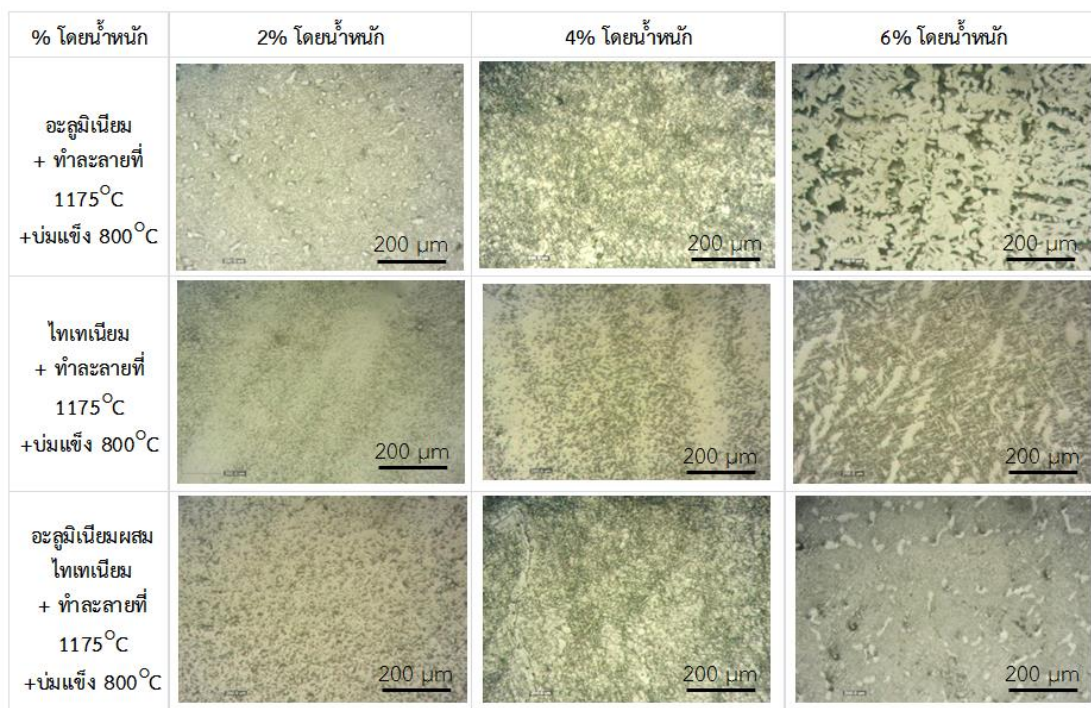
เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคชิ้นงานที่มีการเติมไทเทเนียมปริมาณ 6% โดยน้ำหนัก ผ่านการทำละลายที่ 1175 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมงและทำการบ่มแข็งที่ 760 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบการตกตะกอนของเฟสสีอ่อนซึ่งน่าจะเป็นเฟสชิกมาที่มีขนาดใหญ่มีขนาดคล้ายทรงกลมตกตะกอนบนเนื้อพื้น คาดว่าจะมีโครงสร้างแบบ Widmanstatten Pattern เนื่องจากการเติมไทเทเนียมลงไปชิ้นงาน ส่งผลทำให้โครงสร้างจุลภาคเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมซึ่งคาดว่าจะเกิดเฟสสีดำหรือ Ni_3Ti บนชิ้นงาน

เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคชิ้นงานที่มีการเติมอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียมปริมาณ 6% โดยน้ำหนักผ่านการทำละลายที่ 1175 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมงและทำการบ่มแข็งที่ 760 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง มีลักษณะโครงสร้างที่เกิดขึ้นคล้ายกับชิ้นงานที่เติมไทเทเนียมที่ผ่านการทำละลายและการบ่มแข็งที่สภาวะเดียวกัน โดยเมื่อเพิ่มปริมาณอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียมมากขึ้น พบการตกตะกอนของเฟสสีอ่อนในปริมาณที่มากขึ้นและมีขนาดใหญ่ขึ้น มีรูปร่างคล้ายทรงกลมเช่นกัน ส่วนบริเวณเนื้อพื้นพบว่าโครงสร้างจุลภาคซึ่งคาดว่าเป็นโครงสร้าง Widmanstatten Pattern เนื่องจากมีปริมาณไทเทเนียมผสมอยู่

4.2.1.4 ชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X และเกรดใหม่ ภายหลังจากหล่อแบบอาร์ก การทำละลาย และผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

โครงสร้างจุลภาคที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงรุ่น OLYMPUS PME3 (กำลังขยายขณะทำการวิเคราะห์ 500 เท่า) ของชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X ภายหลังจากหล่อแบบอาร์กและหลอมใหม่โดยการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมงและผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยแบ่งส่วนผสมทางเคมีออกเป็น 3 กลุ่มคือ การเติมอะลูมิเนียม การเติมไทเทเนียม และการเติมอะลูมิเนียมผสม

ไทเทเนียมและในแต่ละกลุ่มมีปริมาณการเติมที่ต่างกันได้แก่ 2% 4% และ 6% โดยน้ำหนัก ดังแสดงในภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4.4 โครงสร้างจุลภาคโดยกล้องจุลทรรศน์แสงของชิ้นงานทั้ง 3 กลุ่ม ที่เติมอะลูมิเนียม

ไทเทเนียม และอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียม ตามลำดับ ในปริมาณต่าง ๆ

ได้แก่ 2% 4% และ 6% โดยน้ำหนัก

โดยผ่านการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

และผ่านการบ่มแข็งอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคชิ้นงานที่มีการเติมอะลูมิเนียมปริมาณ 6% โดยน้ำหนัก ผ่านการทำละลายที่ 1175 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมงและทำการบ่มแข็งที่ 800 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบการตกตะกอนของเฟสต่าง ๆ บนชิ้นงานเช่นเดียวกับชิ้นงานที่เติมอะลูมิเนียมที่ผ่านการทำละลายที่สภาวะเดียวกันและทำการบ่มแข็งที่ 760 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งมีโครงสร้างจุลภาคที่คล้ายคลึงกันคือ เกิดการตกตะกอนของเฟสสีอ่อนที่มีขนาดใหญ่มากขึ้น ซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นเฟสซิกมาและยังพบเฟสสีเข้มที่คาดว่าเป็นหลุมในปริมาณที่มากขึ้นด้วยเช่นกัน

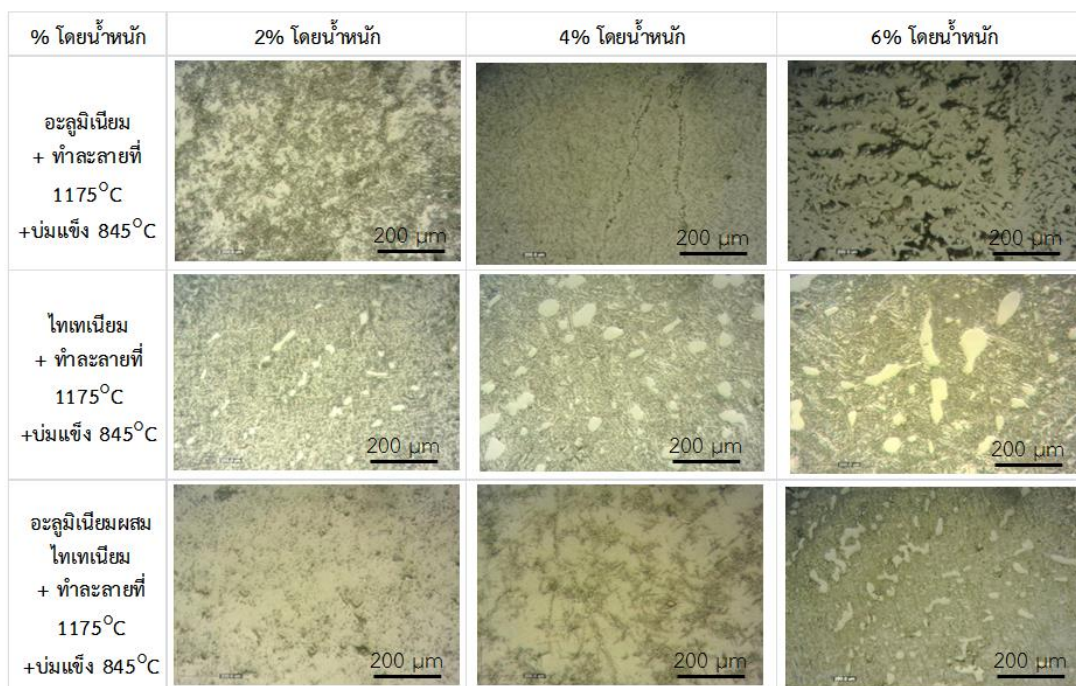
เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่มีการเติมไทเทเนียมปริมาณ 6% โดยน้ำหนัก ผ่านการทำละลายที่ 1175 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมงและทำการบ่มแข็งที่ 800 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบการตกตะกอนของเฟสสีอ่อนที่มีขนาดที่ใหญ่ซึ่งมีลักษณะการตกตะกอนที่แตกต่างจากชิ้นงานที่มีการเติมไทเทเนียมปริมาณ 6% โดยน้ำหนักที่ผ่านการทำละลายที่สภาวะ

เดียวกันและทำการบ่มแข็งที่ 760 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ขนาดของเฟสที่ตกตะกอนมีขนาดที่ใหญ่และยาวขึ้น ส่วนเนื้อพื้นพบว่าเป็นสีเข้มซึ่งคาดว่าจะมีโครงสร้างแบบ Widmanstatten Pattern เนื่องจากการเติมไทเทเนียมลงไปในช่วงงานซึ่งคาดว่าน่าจะเกิดเฟสที่ด้านบนขึ้นงานด้วย เช่นเดียวกับชิ้นงานที่มีการเติมไทเทเนียมที่ 6% โดยน้ำหนัก ผ่านการทำละลายที่สภาวะเดียวกันและทำการบ่มแข็งที่ 760 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคชิ้นงานที่มีการเติมอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียมปริมาณ 6% โดยน้ำหนัก ผ่านการทำละลายที่ 1175 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมงและทำการบ่มแข็งที่ 800 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง มีลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นคล้ายกับการเติมไทเทเนียมที่ผ่านการทำละลายที่สภาวะเดียวกันและทำการบ่มแข็งที่ 760 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อมีการเพิ่มปริมาณของอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียมมากขึ้น พบการตกตะกอนของเฟสที่อ่อนซึ่งน่าจะเป็นเฟสซิกมาในปริมาณที่มากขึ้น แต่จะมีขนาดของการตกตะกอนที่เล็กลงเมื่อเปรียบเทียบกับบ่มแข็งที่ 760 องศาเซลเซียส ส่วนบริเวณเนื้อพื้นคาดว่ามีความคล้ายกับของชิ้นงานที่มีการเติมไทเทเนียมอย่างเดียวกัน โดยโครงสร้างเนื้อพื้นที่เกิดขึ้นน่าจะเป็นโครงสร้างแบบ Widmanstatten Pattern เนื่องจากมีปริมาณไทเทเนียมผสมอยู่ค่อนข้างมากและน่าจะฟอร์มกับนิกเกิลเป็นเฟสอิต้า (Ni_3Ti)

4.2.1.5 ชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X และเกรดใหม่ ภายหลังจากหล่อแบบอาร์ก การทำละลาย และผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียส

โครงสร้างจุลภาคที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงรุ่น OLYMPUS PME3 (กำลังขยายขณะทำการวิเคราะห์ 500 เท่า) ของชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X ภายหลังจากหล่อแบบอาร์กและหลอมใหม่โดยการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมงและผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยแบ่งส่วนผสมทางเคมีออกเป็น 3 กลุ่มคือ การเติมอะลูมิเนียม การเติมไทเทเนียม และการเติมอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียมและในแต่ละกลุ่มมีปริมาณการเติมที่ต่างกัน ได้แก่ 2% 4% และ 6% โดยน้ำหนัก ดังแสดงผลได้ในรูปที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคโดยกล้องจุลทรรศน์แสงของชิ้นงานทั้ง 3 กลุ่ม ที่เติมอะลูมิเนียม ไทเทเนียม และอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียม ตามลำดับ ในปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ 2% 4% และ 6% โดยน้ำหนัก โดยผ่านการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และผ่านการบ่มแข็งอุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคชิ้นงานที่มีการเติมอะลูมิเนียมที่ 6% โดยน้ำหนัก ผ่านการทำละลายที่ 1175 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมงและทำการบ่มแข็งที่ 845 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบการตกตะกอนบนชิ้นงานเช่นเดียวกับชิ้นงานที่ผ่านการทำละลายมาที่สภาวะเดียวกัน และทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 760 และ 800 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างที่พบคล้ายคลึงกันคือ พบการตกตะกอนของเฟสสีอ่อนที่มีขนาดใหญ่และมีปริมาณที่มากขึ้น ซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นเฟสซิกมาเช่นกัน อีกทั้งยังพบเฟสสีเข้มที่คาดว่าเป็นหลุมแต่พบว่ามึปริมาณที่น้อยกว่าการบ่มแข็งที่ 760 และ 800 องศาเซลเซียส

เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่มีการเติมไทเทเนียมที่ 2% โดยน้ำหนักผ่านการทำละลายที่ 1175 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมงและทำการบ่มแข็งที่ 845 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าเริ่มเห็นการตกตะกอนของเฟสสีอ่อนที่มีขนาดเล็กสามารถมองเห็นได้ชัดเจนกว่าการเติมไทเทเนียมที่ผ่านการทำละลายที่สภาวะเดียวกันและทำการบ่มแข็งที่ 760 และ 800 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ส่วนการเติมไทเทเนียมที่ 6% โดยน้ำหนักที่ผ่านการทำละลายที่

สภาวะเดียวกันและทำการบ่มแข็งที่ 845 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบการตกตะกอนของเฟสที่อ่อนมีลักษณะการตกตะกอนโดยมีขนาดใหญ่และยาวขึ้น ส่วนเนื้อพื้นพบว่าเป็นสีเข้มซึ่งคาดว่ามีความเป็น Widmanstatten Pattern เช่นเดียวกับชิ้นงานที่ทำการบ่มแข็งที่ 800 องศาเซลเซียสเช่นกัน เนื่องจากการเติมไทเทเนียมลงไปชิ้นงานซึ่งคาดว่าน่าจะเกิดเฟสที่ดำ

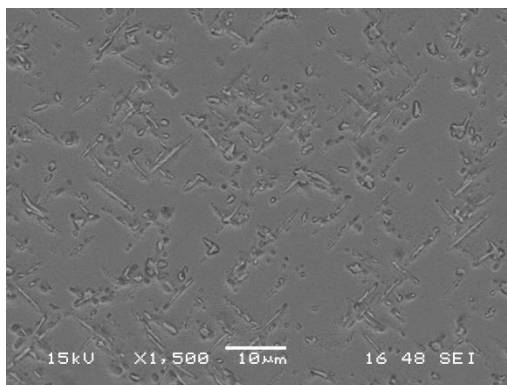
เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคชิ้นงานที่มีการเติมอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียมที่ 6% โดยน้ำหนัก ผ่านการทำละลายที่ 1175 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมงและทำการบ่มแข็งที่ 845 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยมีขนาดของการตกตะกอนจะมีขนาดคล้ายกับผ่านการทำละลายที่สภาวะเดียวกันและผ่านการบ่มแข็งที่ 760 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยมีขนาดและปริมาณของการตกตะกอนที่น้อยกว่าชิ้นงานที่มีการเติมอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียมที่ผ่านการทำละลายที่สภาวะเดียวกันและบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบการตกตะกอนของเฟสที่อ่อนและเฟสที่เข้มเช่นเดียวกับการบ่มแข็งที่อุณหภูมิอื่น ๆ ส่วนบริเวณเนื้อพื้นมีลักษณะเป็นสีเข้มคาดว่าน่าจะเป็นโครงสร้างแบบ Widmanstatten Pattern เช่นเดียวกับการชิ้นงานที่เติมไทเทเนียม

ดังนั้นจึงสามารถสรุปโดยรวมได้ว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของทั้ง อะลูมิเนียม ไทเทเนียมและอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียม ขนาดและปริมาณของการตกตะกอนของเฟสที่อ่อนมีปริมาณที่มากขึ้นและมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นเช่นเดียวกัน ซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นเฟสซิกมา และสำหรับงานชิ้นงานที่มีการเติมไทเทเนียมและชิ้นงานที่มีการเติมอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียมนั้น โครงสร้างของเนื้อพื้นคาดว่าน่าจะเป็นโครงสร้างจุลภาคแบบ Widmanstatten Pattern ซึ่งคาดว่าน่าจะพบเฟสที่ดำที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างของชิ้นงานจากทฤษฎีที่ได้ศึกษามา แต่จะทำการศึกษาให้ชัดเจนมากขึ้นด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดอีกครั้งในหัวข้อถัดไป

4.2.2 การวิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

4.2.2.1 ชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X ภายหลังจากหล่อแบบอาร์ก และผ่านการทำละลาย

โครงสร้างจุลภาคที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดรุ่น JSM-6380LV (กำลังขยายขณะทำการวิเคราะห์ 1500 เท่า) ของชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X ภายหลังจากหล่อแบบอาร์กและหลอมใหม่โดยการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ดังแสดงผลได้ในรูปที่ 4.6

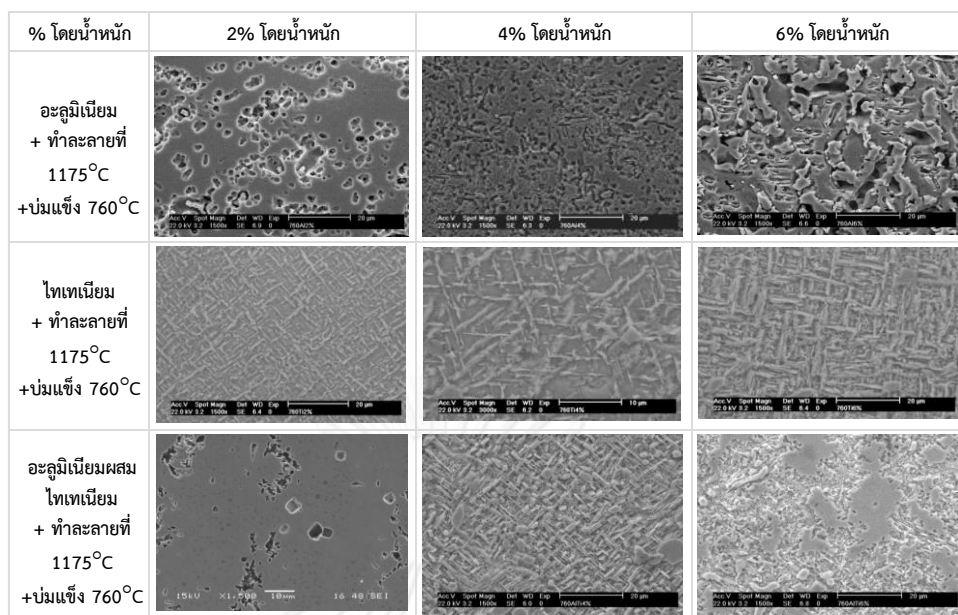


ภาพที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของชิ้นงาน Hastelloy X ที่ผ่านการทำละลายที่ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และผ่านการบ่มแข็งอุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของชิ้นงาน Hastelloy X ที่ผ่านการทำละลายที่ 1175 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่ามีการตกตะกอนของเฟสที่มีขนาดเล็ก ๆ กระจายตัวอยู่อย่างสม่ำเสมออยู่ในโครงสร้างเนื้อพื้นเช่นเดียวกับการตรวจสอบโครงสร้างจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง ซึ่งคาดอนุภาคเล็กๆของที่ตกตะกอนน่าจะเป็นเฟสคาร์ไบด์ประเภท MC คาร์ไบด์หรือสารประกอบระหว่างโลหะอื่นๆ ซึ่งต้องทำการศึกษาและอธิบายใน ส่วนต่อไป

4.2.2.2 ชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X และเกรดใหม่ ภายหลังจากหล่อแบบอาร์ก การทำละลาย และผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส

โครงสร้างจุลภาคที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดรุ่น JSM-6380LV (กำลังขยายขณะทำการวิเคราะห์ 1500 เท่า) ของชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X ภายหลังจากหล่อแบบอาร์กและหลอมใหม่โดยการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมงและผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยแบ่งส่วนผสมทางเคมีออกเป็น 3 กลุ่มคือ การเติมอะลูมิเนียม การเติมไทเทเนียม และการเติมอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียมและในแต่ละกลุ่มมีปริมาณการเติมที่ต่างกัน ได้แก่ 2% 4% และ 6% โดยน้ำหนัก ดังแสดงในภาพที่ 4.7



ภาพที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกาด
ของชิ้นงานทั้ง 3 กลุ่ม ที่เติมอะลูมิเนียม ไทเทเนียม และอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียม ตามลำดับ
ในปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ 2% 4% และ 6% โดยน้ำหนัก
โดยผ่านการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
และผ่านการบ่มแข็งอุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

จากโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เติมอะลูมิเนียมที่ผ่านการหล่อแบบอาร์กและทำละลายที่
อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมงและผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส
เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่ามีการตกตะกอนของเฟสสีเทาอ่อนโดยที่สามารถเห็นขนาดและรูปร่างของ
เฟสที่ตกตะกอนได้ชัดเจนขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณของอะลูมิเนียมผสมลงไปโดยจะเกิดการตกตะกอนลง
บนเนื้อพื้นซึ่งก็คือเฟสสีเทาเข้ม นอกจากนั้นยังพบหลุมสีดำที่มีขนาดใหญ่ขึ้นบนเนื้อพื้นสีเทาเข้ม

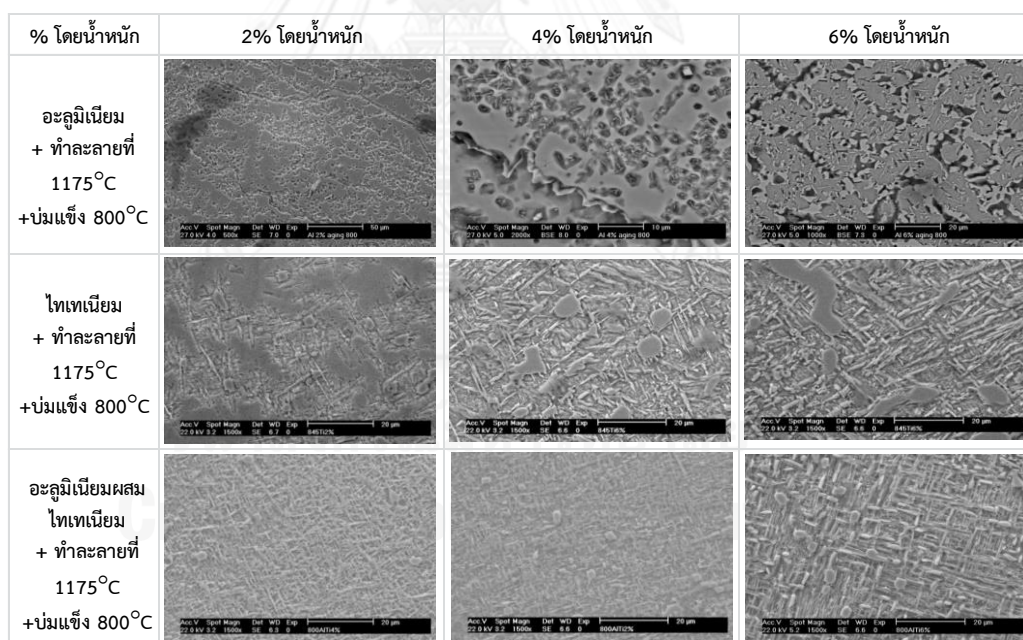
จากโครงสร้างจุลภาคพบว่าชิ้นงานที่เติมไทเทเนียมโดยผ่านการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175
องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมงและผ่านการบ่มแข็งอุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24
ชั่วโมง พบว่ามีการตกตะกอนของเฟสสีเทาอ่อนและมีลักษณะเป็นโครงสร้างแบบ Widmanstatten
Pattern ชัดเจนมากขึ้นตั้งแต่การเติมไทเทเนียมปริมาณ 2% โดยน้ำหนักจนถึงปริมาณ 6% โดย
น้ำหนัก โดยจะมีโครงสร้างที่มีขนาดที่ใหญ่และชัดเจนมากขึ้น

จากโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่มีการเติมอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียมปริมาณเพียง 2%
โดยน้ำหนัก พบว่าโครงสร้างไม่เกิดโครงสร้างเนื้อพื้นเป็นโครงสร้างแบบ Widmanstatten Pattern
พบเพียงการตกตะกอนของเฟสสีเทาเข้มในปริมาณที่น้อยเท่านั้น แต่เมื่อมีการเติมปริมาณของ

อะลูมิเนียมผสมไทเทเนียมเพิ่มมากขึ้นเป็น 4% และ 6% โดยน้ำหนัก พบโครงสร้าง Widmanstatten Pattern ที่ชัดเจนมากขึ้น อีกทั้งยังพบการตกตะกอนของเฟสสีเทาเข้มที่มีขนาดและปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน

4.2.2.3 ชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X และเกรดใหม่ ภายหลังจากหล่อแบบอาร์ก การทำละลาย และผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

โครงสร้างจุลภาคที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดรุ่น JSM-6380LV (กำลังขยายขณะทำการวิเคราะห์ 1500 เท่า) ของชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X ภายหลังจากหล่อแบบอาร์กและหลอมใหม่โดยการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมงและผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยแบ่งส่วนผสมทางเคมีออกเป็น 3 กลุ่มคือ การเติมอะลูมิเนียม การเติมไทเทเนียม และการเติมอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียมและในแต่ละกลุ่มมีปริมาณการเติมที่ต่างกัน ได้แก่ 2% 4% และ 6% โดยน้ำหนัก ดังแสดงในภาพที่ 4.8



ภาพที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของชิ้นงานทั้ง 3 กลุ่ม ที่เติมอะลูมิเนียม ไทเทเนียม และอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียม ตามลำดับในปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ 2% 4% และ 6% โดยน้ำหนัก โดยผ่านการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และผ่านการบ่มแข็งอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

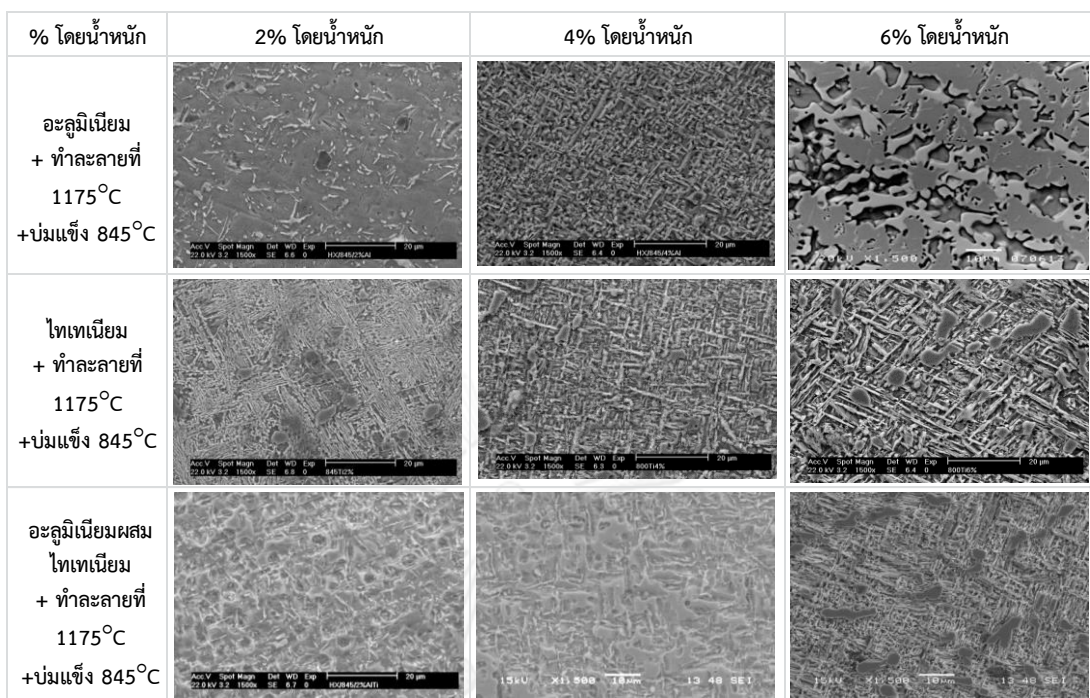
จากโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่มีการเติมอะลูมิเนียมปริมาณ 6% โดยน้ำหนัก โดยผ่านการทำให้ละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมงและทำการบ่มแข็งอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบการตกตะกอนของเฟสสีเทาอ่อนที่ต่อเนื่องบนชิ้นงานได้อย่างชัดเจน และพบการตกตะกอนของเฟสสีเทาอ่อนที่มีขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วชิ้นงาน ส่วนปริมาณของหลุมมีปริมาณที่มากขึ้นและมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นด้วยซึ่งเกิดจากการหลุดร่อนของเฟสที่แข็งและมีความเปราะสูง

จากโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่การเติมไทเทเนียมที่ 6% โดยน้ำหนัก โดยผ่านการทำให้ละลายที่สภาวะเดียวกันและทำการบ่มแข็งอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าเฟสสีเทาอ่อนที่เกิดจากการตกตะกอนนั้นมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นเมื่อเทียบกับการเติมไทเทเนียมที่ 2% และ 4% โดยน้ำหนัก พบเฟสสีเทาเข้มที่เป็นเส้นจะมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นและมีการเรียงตัวกันที่ไม่เป็นระเบียบ ซึ่งบริเวณเนื้อพื้นเป็นโครงสร้างแบบ Widmanstatten Pattern ที่มีรูปร่างเห็นได้อย่างชัดเจนมากกว่าการบ่มแข็งที่ 760 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

จากโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่การเติมอะลูมิเนียมและไทเทเนียมที่ 6% โดยน้ำหนัก โดยผ่านการทำให้ละลายที่สภาวะเดียวกันและทำการบ่มแข็งอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบเฟสสีเทาอ่อนตกตะกอนทั้งชิ้นงานโดยมีขนาดและมีปริมาณมากขึ้นเมื่อเทียบกับการเติมอะลูมิเนียมที่ 2% และ 4% โดยน้ำหนัก ซึ่งเห็นโครงสร้างของเฟสสีเทาเข้มได้ชัดเจนโดยที่มีโครงสร้างเป็น Widmanstatten Pattern และพบเฟสสีเทาอ่อนปริมาณมากอยู่รอบ ๆ เฟสสีเทาเข้ม

4.2.2.4 ชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X และเกรดใหม่ ภายหลังจากหล่อแบบอาร์ก การทำให้ละลาย และผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียส

โครงสร้างจุลภาคที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดรุ่น JSM-6380LV (กำลังขยายขณะทำการวิเคราะห์ 1500 เท่า) ของชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X ภายหลังจากหล่อแบบอาร์กและหลอมใหม่โดยการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมงและผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยแบ่งส่วนผสมทางเคมีออกเป็น 3 กลุ่มคือ การเติมอะลูมิเนียม การเติมไทเทเนียม และการเติมอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียมและในแต่ละกลุ่มมีปริมาณการเติมที่ต่างกัน ได้แก่ 2% 4% และ 6% โดยน้ำหนัก ดังแสดงในภาพที่ 4.9



ภาพที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด
ของชิ้นงานทั้ง 3 กลุ่ม ที่เติมอะลูมิเนียม ไทเทเนียม และอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียม ตามลำดับ
ในปริมาณต่าง ๆ ได้แก่ 2% 4% และ 6% โดยน้ำหนัก
โดยผ่านการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
และผ่านการบ่มแข็งอุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ชิ้นงานที่มีการเติมอะลูมิเนียม พบการตกตะกอนของเฟสสีเทาอ่อนและเมื่อเพิ่มปริมาณของ
อะลูมิเนียม ส่งผลทำให้ขนาดของเฟสสีเทาอ่อนมีขนาดและปริมาณของการตกตะกอนมากขึ้นด้วย
ส่วนปริมาณการเติมอะลูมิเนียมที่ 6% โดยน้ำหนักโดยผ่านการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศา
เซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมงและทำการบ่มแข็งอุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงที่
อุณหภูมิ และพบหลุมสีดำที่เกิดขึ้นชัดเจนที่อุณหภูมิการบ่มแข็งที่ 845 องศาเซลเซียส มีขนาดและ
ปริมาณที่เล็กลงด้วย

ชิ้นงานที่มีการเติมไทเทเนียม เช่นเดียวกับกับทุกๆอุณหภูมิการบ่มแข็ง โดยจะพบโครงสร้าง
ของชิ้นงานที่เติมไทเทเนียมเป็นโครงสร้าง Widmanstatten Pattern และเมื่อมีการเพิ่มปริมาณ
ไทเทเนียมมากขึ้นจะส่งผลทำให้เกิดการตกตะกอนของเฟสสีเทาเข้มเพิ่มขึ้น โดยจะมีเฟสสีเทาอ่อน
ล้อมรอบเฟสสีเทาเข้มทุก ๆ เฟส

ชิ้นงานที่มีการเติมอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียม เกิดการตกตะกอนของเฟสสีเทาเข้มในปริมาณที่มากขึ้น โดยลักษณะของการตกตะกอนนั้นจะมีรูปร่างไม่แน่นอน โดยจะตกตะกอนบนเนื้อพื้นของชิ้นงานที่มีโครงสร้างแบบ Widmanstatten Pattern เช่นเดียวกับชิ้นงานที่มีการเติมไทเทเนียม

หลังจากที่ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์โครงสร้างของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการการหลอมอาร์กผ่านการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมงและทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิต่างกันได้แก่ 760, 800 และ 845 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยการเติมอะลูมิเนียมไทเทเนียม และการเติมอะลูมิเนียมและไทเทเนียมที่ 2% 4% และ 6% โดยน้ำหนักด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด สามารถสรุปได้ดังนี้คือ

ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มแข็ง (อุณหภูมิ 760 800 และ 845 องศาเซลเซียส)

พบว่าอุณหภูมิการบ่มแข็งไม่ค่อยส่งผลต่อการตกตะกอนของเฟสสีเทาอ่อนและเฟสสีเทาเข้มเท่าที่ควร เนื่องจากเมื่อวิเคราะห์อุณหภูมิการบ่มแข็งที่ 760 800 และ 845 องศาเซลเซียสมีการตกตะกอนของเฟสที่มีปริมาณและโครงสร้างที่คล้ายกับทั้งการเติมอะลูมิเนียมไทเทเนียม และการเติมอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียม แต่อาจจะช่วยในเรื่องของการเพิ่มขนาดของเฟสให้มีขนาดที่ใหญ่ขึ้นเท่านั้น

ผลของการเติมธาตุผสม 3 กลุ่มได้แก่ อะลูมิเนียม ไทเทเนียมและ อะลูมิเนียมผสมไทเทเนียมที่ปริมาณธาตุผสมได้แก่ 2% 4% และ 6% โดยน้ำหนัก

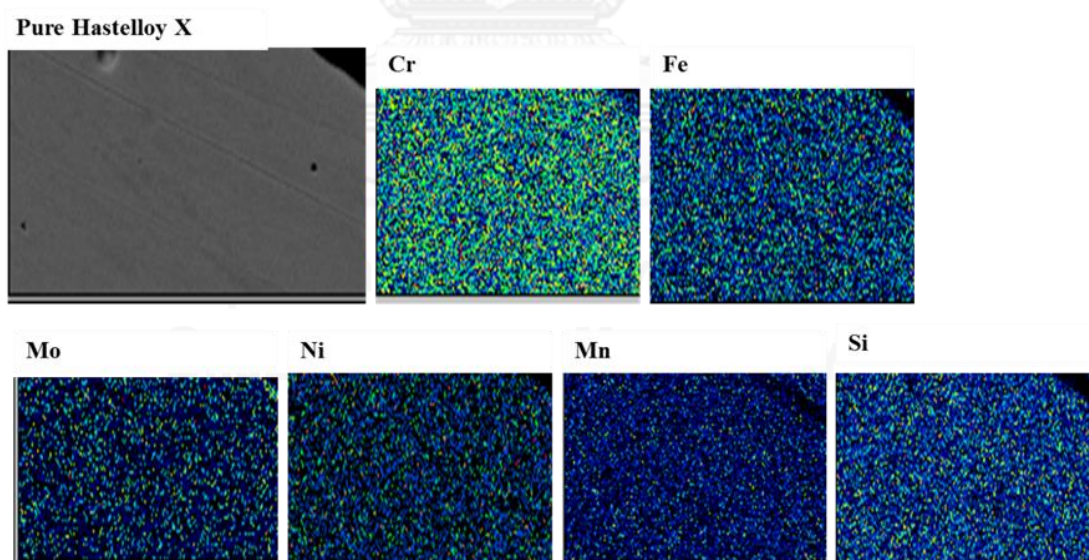
พบว่า การเติมธาตุผสมจะส่งผลต่อโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน กล่าวคือเมื่อมีการเติมอะลูมิเนียมเข้าไปจะทำให้เกิดเฟสขึ้นในโครงสร้างจุลภาคซึ่งมี 3 เฟสได้แก่เนื้อพื้นคือเฟสสีเทาเข้มและเกิดการตกตะกอนของเฟสสีเทาอ่อนซึ่งคาดว่าน่าจะเป็น Intermetallic Phase ของโครเมียม โมลิบดีนัมและเหล็ก ซึ่งสันนิษฐานว่าเป็นเฟสซิกมา [15] ส่วนเฟสสีดำที่พบในโครงสร้างจุลภาคจากการเติมอะลูมิเนียมนั้นคาดว่าจะเป็ลหลุมที่เกิดการหลุดร่อนเมื่อทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิที่สูงขึ้นหรือเกิดเป็นเฟสที่มีลักษณะที่เปราะเมื่อทำการเตรียมชิ้นงานเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคอาจจะทำให้เกิดการหลุดร่อนบริเวณช่วงนี้ ส่วนชิ้นงานที่มีการเติมไทเทเนียมและการเติมอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียมจะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันคือ โครงสร้างที่ได้เป็นโครงสร้างแบบ Widmanstatten Pattern [16] โดยเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของธาตุมากขึ้น โครงสร้างแบบนี้สามารถเห็นชัดเจนขึ้นเช่นกันโดยที่จะมีการตกตะกอนของเฟสสีเทาอ่อนที่มีรูปร่างไม่แน่นอนอยู่ในโครงสร้างของการเติมไทเทเนียมและการเติมอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียมเช่นเดียวกัน ซึ่งจะพบว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของธาตุต่างๆจาก 2% โดยน้ำหนักให้เป็น 6% โดยน้ำหนักจะส่งผลทำให้เกิดการตกตะกอนของเฟสต่างๆให้มีขนาดและปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น

ดังนั้นจึงทำการเลือกทำการศึกษาในด้านอื่นๆต่อไปของชิ้นงานที่มีปริมาณของการเติม อะลูมิเนียม ไทเทเนียม และอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียมที่ 6% โดยน้ำหนักเนื่องจาก โลหะผสมพิเศษ เกรดใหม่นี้มีสูตรทางเคมีใกล้เคียงกับ IN 738 โดยงานวิจัยนี้ต้องการปรับปรุงโครงสร้างให้เกิดการ ตกตะกอนของเฟส γ' ดังนั้นสำหรับ IN 738 ที่บ่มแข็งที่อุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงจะทำให้เกิดการตกตะกอนของเฟส γ' ในปริมาณที่มากซึ่งคาดว่าชิ้นงานที่ทำการศึกษามีการ ตกตะกอนของเฟสนี้ด้วยเช่นกัน

การเติมธาตุผสมปริมาณ 6% โดยน้ำหนัก ทำให้เห็นปริมาณและขนาดของเฟสที่ตกตะกอนที่ ชัดเจนกว่าอุณหภูมิการบ่มแข็งที่อุณหภูมิต่ำอื่น ๆ

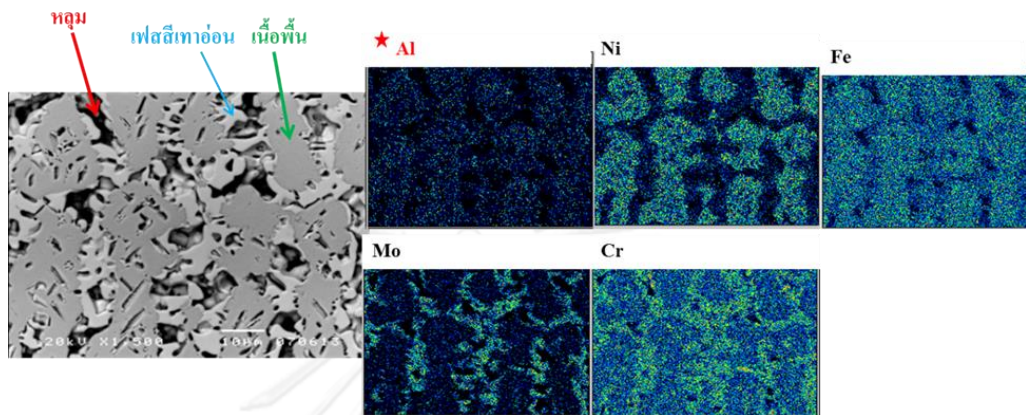
4.3 การวิเคราะห์ธาตุ

จากหัวข้อที่ 4.2 จะพบว่าในโครงสร้างของชิ้นงานที่ผ่านการหลอมและการทำละลายที่ อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมงและทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 760 800 และ 845 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยมีการการเติมอะลูมิเนียม การเติมไทเทเนียม และการเติม อะลูมิเนียมผสมไทเทเนียม ที่ 6% โดยน้ำหนัก ถูกนำมาใช้วิเคราะห์ปริมาณของธาตุต่าง ๆ ที่พบใน ชิ้นงานเหล่านี้โดยเทคนิค Mapping Element ของกล้อง SEM ดังแสดงผลการวิเคราะห์ธาตุหลัก ๆ ที่สนใจดังแสดงในภาพที่ 4.10 ถึง 4.19

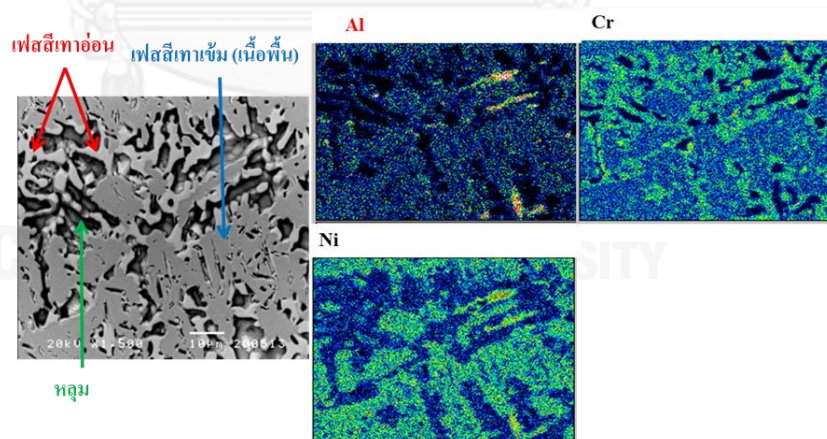


ภาพที่ 4. 10 Mapping Element ของชิ้นงาน Hastelloy X ที่ผ่านการทำละลายที่ 1175 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

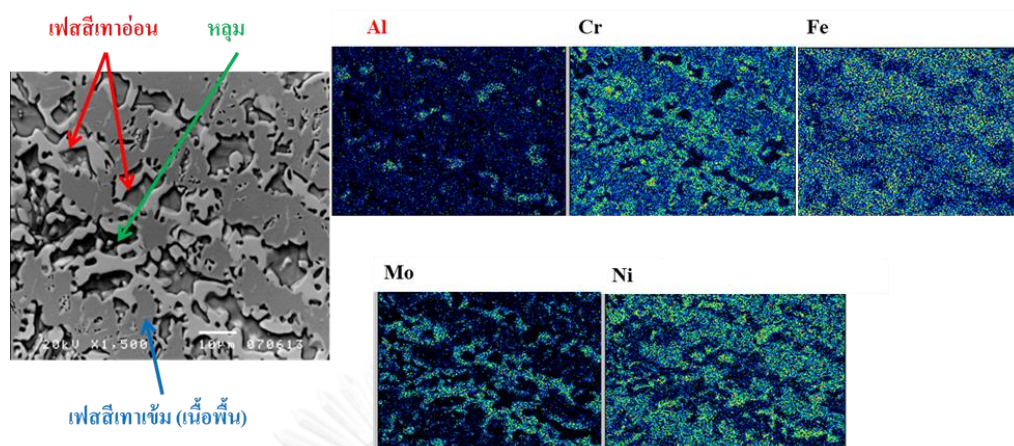
โดยจะพบว่าชิ้นงาน Hastelloy X ที่ผ่านการทำละลายที่ 1175 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่ไม่มีการผสมธาตุอะไรเพิ่มลงไป จะไม่มีการตกตะกอนของเฟสต่าง ๆ จากภาพที่ 4.10 จะพบว่าธาตุโครเมียม เหล็ก โมลิบดีนัม นิกเกิล แมงกานีสและซิลิคอนกระจายตัวอยู่ทั่วชิ้นงานและไม่จับตัวเป็นเฟส



ภาพที่ 4.11 Mapping Element ของชิ้นงาน Hastelloy X
ที่มีการเติมอะลูมิเนียม ปริมาณ 6% โดยน้ำหนัก
โดยผ่านการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
และผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.12 Mapping Element ของชิ้นงาน Hastelloy X
ที่มีการเติมอะลูมิเนียม ปริมาณ 6% โดยน้ำหนัก
โดยผ่านการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
และผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.13 Mapping Element ของชิ้นงาน Hastelloy X

ที่มีการเติมอะลูมิเนียม ปริมาณ 6 % โดยน้ำหนัก

โดยผ่านการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

และผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

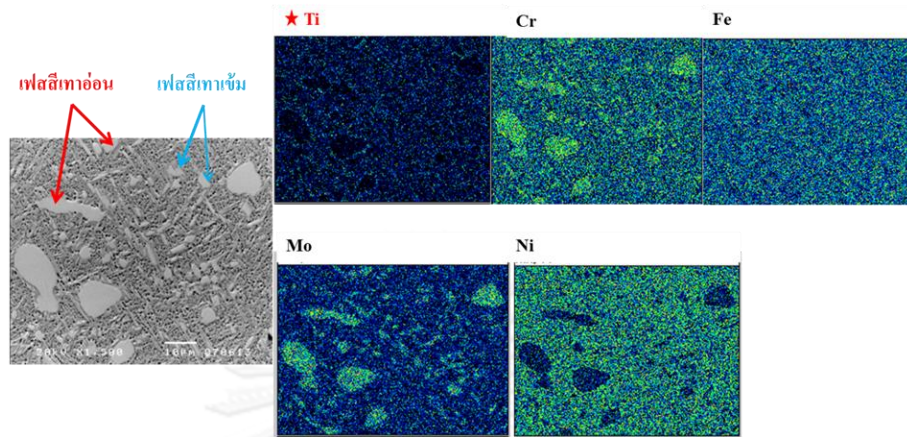
จากภาพที่ 4.11-4.13 เป็นการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและการกระจายตัวของธาตุต่าง ๆ ในชิ้นงานโดยจะทำการศึกษาผลของการเติมอะลูมิเนียมปริมาณ 6% โดยน้ำหนักในชิ้นงานที่ผ่านการทำละลายที่ 1175 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมงและผ่านการบ่มแข็งที่ 760 800 และ 845 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยศึกษาสารประกอบและธาตุที่อยู่ในเฟสต่าง ๆ ที่พบในโครงสร้างจากการตรวจสอบพบว่าเกิดเฟสสีเทาอ่อนที่ตกตะกอนบนเนื้อพื้นซึ่งเป็นเฟสสีเทาเข้มและเฟสสีดำนี่เกิดขึ้น โดยจากภาพที่ 4.11-4.13 จะประกอบด้วยเฟสทั้งหมด 3 เฟสได้แก่ เฟสสีเทาอ่อน เฟสสีเทาเข้มและบริเวณหลุมสีดำ

- เฟสสีเทาอ่อน เป็นเฟสที่เกิดจากการตกตะกอนเมื่อผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยจากภาพ พบเฟสสีเทาอ่อนประกอบด้วย โมลิบดีนัม โครเมียมและเหล็กเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งเกิดเป็นสารประกอบ Intermetallic Phase ซึ่งเป็นเฟสซิกมาที่มีสูตรทางเคมีคือ FeMoCr [15]

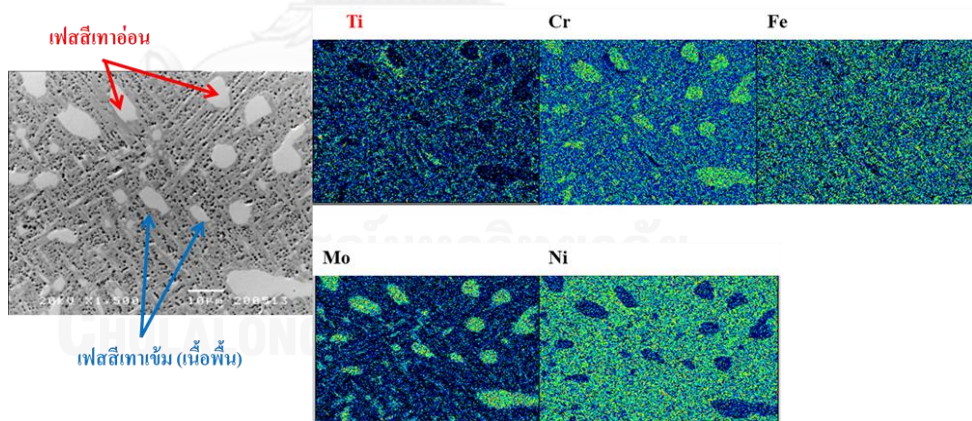
- เฟสสีเทาเข้ม ซึ่งจะอยู่คนละระดับกับเฟสสีเทาอ่อนและยังเป็นส่วนของเนื้อพื้นโดยที่เฟสสีเทาเข้มประกอบด้วยอะลูมิเนียมและนิกเกิลเป็นส่วนใหญ่ โดยที่นิกเกิลเป็นเนื้อพื้นของชิ้นงานส่วนอะลูมิเนียมเป็นธาตุที่ได้เติมลงไปชิ้นงาน พบว่าอะลูมิเนียมนั้นกระจายตัวอยู่ทั่วชิ้นงาน

- บริเวณหลุมสีดำที่เกิดในเฟสสีเทาอ่อนที่เกิดจากการตกตะกอนนั้นจะพบว่าในบางหลุมจะพบปริมาณของอะลูมิเนียมในปริมาณที่ค่อนข้างมาก บางหลุมก็จะมีปริมาณของนิกเกิลหรือโครเมียมอยู่โดยสันนิษฐานว่าหลุมที่เกิดขึ้นนั้นหลังจากที่ได้ทำการบ่มแข็งอาจจะเกิดการตกตะกอนของเฟสที่มีลักษณะที่ค่อนข้างเปราะ เมื่อทำการเตรียมชิ้นงานโดยการขัดกระดาษทรายหรือกัดกรด

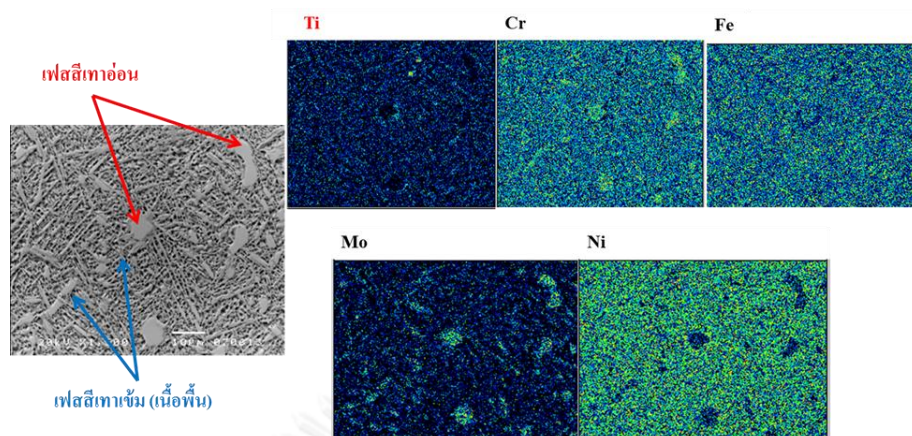
เพื่อที่จะศึกษาโครงสร้างอาจจะทำให้เฟสที่เกิดขึ้นในบริเวณนั้นเกิดการหลุดร่อน ทำให้เกิดเป็นหลุมที่มีขนาดใหญ่บนเฟสสีเทาที่เกิดจากการตกตะกอน ทั้งนี้สันนิษฐานว่าเฟสนี้ น่าจะเป็นเฟส NiAl



ภาพที่ 4.14 Mapping Element ของชิ้นงาน Hastelloy X
ที่มีการเติมไทเทเนียม ปริมาณ 6 % โดยน้ำหนัก
โดยผ่านการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
และผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.15 Mapping Element ของชิ้นงาน Hastelloy X
ที่มีการเติมไทเทเนียม ที่ 6 % โดยน้ำหนัก
โดยผ่านการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
และผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.16 Mapping Element ของชิ้นงาน Hastelloy X

ที่มีการเติมไทเทเนียม ที่ 6 % โดยน้ำหนัก

โดยผ่านการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

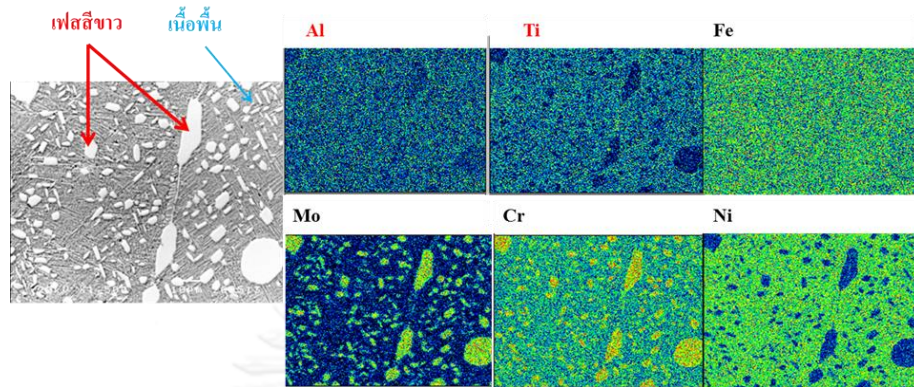
และผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

จากภาพที่ 4.14-4.16 เป็นการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและการกระจายตัวของธาตุต่าง ๆ ในชิ้นงานโดยจะทำการศึกษาผลของการเติมไทเทเนียมที่ 6% โดยน้ำหนักในชิ้นงานที่ผ่านการทำละลายที่ 1175 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมงและผ่านการบ่มแข็งที่ 760 800 และ 845 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยจะทำการศึกษาถึงความเป็นไปได้ของสารประกอบและธาตุที่อยู่ในเฟสต่าง ๆ ที่พบในโครงสร้าง โดยจากการตรวจสอบพบว่าเกิดการตกตะกอนของเฟสซีเทาอ่อนที่มีรูปร่างคล้ายทรงกลมและมีการตกตะกอนของเฟสซีเทาที่มีรูปร่างเป็นเส้นบาง โดยในทุกๆของเฟสซีเทาอ่อนจะพบว่าจะมีเฟสซีเทาเข้มล้อมรอบเฟสซีเทาอ่อน ดังแสดงในภาพที่ 4.14-4.16 ซึ่งประกอบด้วยเฟสทั้งหมด 2 เฟสได้แก่ เฟสซีเทาอ่อน เฟสซีเทาเข้ม โดยจะพบว่า

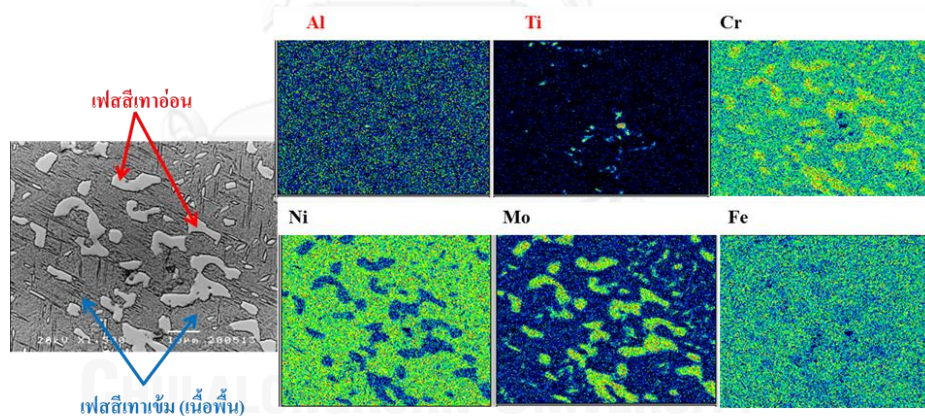
- เฟสซีเทาอ่อน จะเป็นเฟสที่เกิดจากการตกตะกอนขึ้นโดยจะพบว่าการตกตะกอนมีขนาดของอนุภาคที่ค่อนข้างเล็กโดยที่ส่วนมากจะประกอบด้วยโครเมียม โมลิบดีนัม และเหล็ก ซึ่งน่าจะเป็น Intermetallic Phase ที่เป็นซิกมาเฟสโดยมีสูตรทางเคมีคือ FeMoCr [15] โดยที่โครเมียมนอกจากจะอยู่บริเวณที่เกิดจากการตกตะกอน ยังพบว่ามีปริมาณของโครเมียมกระจายตัวอยู่ทั่วชิ้นงานในบางส่วนเช่นเดียวกับโมลิบดีนัมที่พบในส่วนของอนุภาคที่ตกตะกอนและพบโมลิบดีนัมอยู่ล้อมรอบอนุภาคที่ตกตะกอนขึ้นอีกด้วย

- เฟสซีเทาเข้ม พบว่าเป็นเฟสที่อยู่ล้อมรอบเฟสซีเทาอ่อนโดยส่วนมากจะประกอบด้วยนิกเกิล โมลิบดีนัมและไทเทเนียมเป็นส่วนใหญ่ โดยพบว่าไทเทเนียมที่เติมลงไปนั้นนอกจากจะไม่ได้จับตัวกับนิกเกิลทำให้เกิดการตกตะกอนเป็น γ' และไม่ได้จับตัวกับธาตุอื่นเพื่อเกิดเฟสใด ๆ อีกทั้งการที่เติม

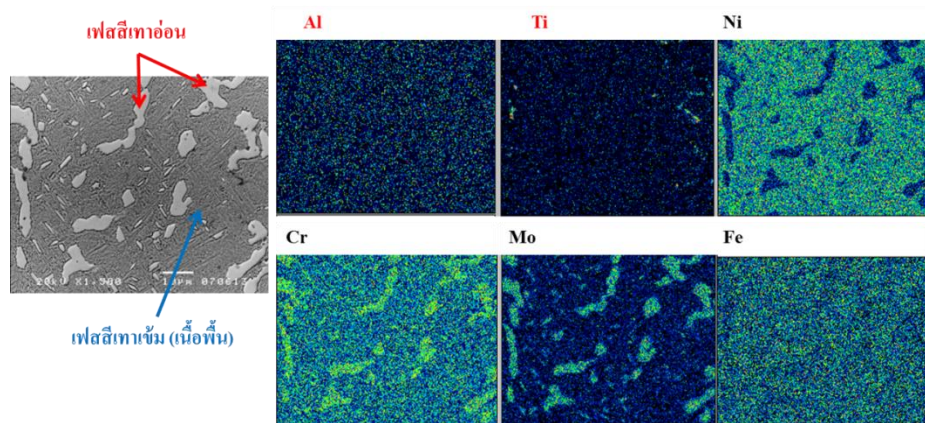
ไทเทเนียมลงไปยังจะทำให้ชิ้นงานเกิดความเสียหายนั้นก็คือการเกิดโครงสร้างที่มีโครงสร้างแบบ Widmanstatten Pattern [16]



ภาพที่ 4.17 Mapping Element ของชิ้นงาน Hastelloy X
ที่มีการเติมอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียม ปริมาณ 6 % โดยน้ำหนัก
โดยผ่านการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
และผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.18 Mapping Element ของชิ้นงาน Hastelloy X
ที่มีการเติมอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียม ปริมาณ 6 % โดยน้ำหนัก
โดยผ่านการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
และผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.19 Mapping Element ของชิ้นงาน Hastelloy X
ที่มีการเติมอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียม ปริมาณ 6 % โดยน้ำหนัก
โดยผ่านการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
และผ่านการบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

จากภาพที่ 4.17-4.19 เป็นการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและการกระจายตัวของธาตุต่าง ๆ ในชิ้นงานโดยจะทำการศึกษาผลของการเติมอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียมที่ 6% โดยน้ำหนักในชิ้นงานที่ผ่านการทำละลายที่ 1175 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมงและผ่านการบ่มแข็งที่ 760 800 และ 845 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยจะทำการศึกษถึงความเป็นไปได้ของสารประกอบและธาตุที่อยู่ในเฟสต่าง ๆ ที่พบในโครงสร้างโดยจากการตรวจสอบพบว่าเกิดการตกตะกอนของเฟสสีเทาอ่อนที่มีขนาดเล็ก ดังนั้นจากภาพที่ 4.17-4.19 จะประกอบด้วยเฟสหลัก ๆ ทั้งหมด 2 เฟสได้แก่ เฟสสีเทาอ่อนและเฟสสีเทาเข้ม

- เฟสสีเทาอ่อน เป็นเฟสที่เกิดจากการตกตะกอนโดยมีขนาดของเฟสที่ค่อนข้างใหญ่และขนาดของเฟสที่มีขนาดเล็กปนกันอยู่ในโครงสร้าง โดยจะพบว่าในโครงสร้างของเฟสสีเทาอ่อนประกอบด้วยโครเมียม โมลิบดีนัมและเหล็กเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งเป็น Intermetallic Phase โดยเป็นเฟสซิกมาที่มีสูตรทางเคมีคือ FeMoCr [15]

- เฟสสีเทาเข้ม เป็นเฟสของเนื้อพื้น ประกอบด้วย นิกเกิลซึ่งเป็นธาตุหลัก และพบปริมาณของธาตุที่กระจายตัวอยู่ในเนื้อพื้นคือ อะลูมิเนียมและไทเทเนียม โดยที่อะลูมิเนียมนั้นจะกระจายอยู่ทั่วทุกพื้นที่ของชิ้นงาน ส่วนไทเทเนียมจะพบว่าบางส่วนจะกระจายตัวอยู่ทั่วชิ้นงานและยังพบไทเทเนียมที่เป็นกลุ่มอยู่ในชิ้นงานด้วย เนื่องจากการหลอมที่ยังไม่สมบูรณ์ จากการตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงร่วมด้วยจะพบว่าจะมีก้อนสีดำเกิดขึ้นบนชิ้นงาน ซึ่งจากการทำการตรวจสอบโดยวิธีการนี้ก็จะพบธาตุของไทเทเนียมอย่างเห็นได้ชัดเจน เนื่องจากกระบวนการหลอมยังมีไทเทเนียมที่ยังหลอมละลายไม่หมดอยู่ภายในชิ้นงาน

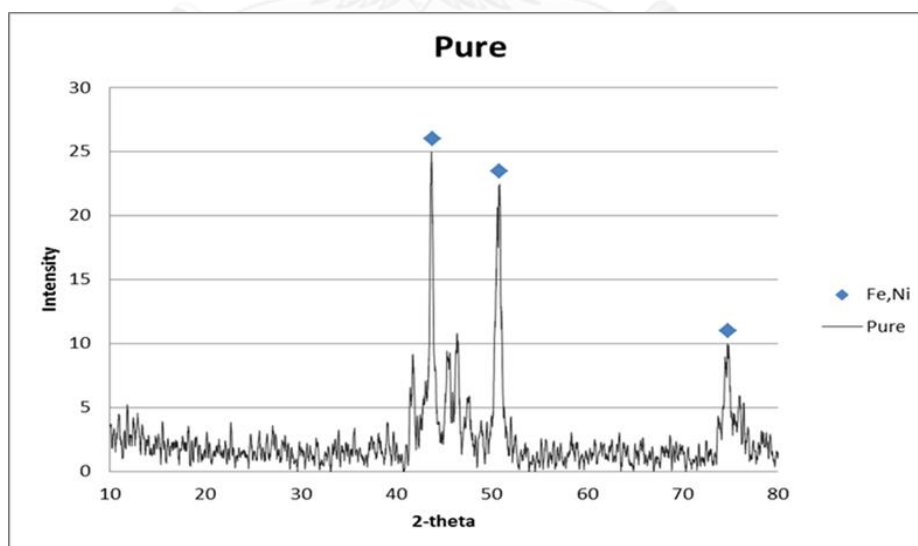
ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าโครงสร้างของการเติมไทเทเนียมและการเติมอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียมมีลักษณะโครงสร้างที่คล้ายกันคือ บริเวณเนื้อพื้นจะมีโครงสร้างแบบ Widmanstatten Pattern ส่วนบริเวณเฟสที่เกิดการตกตะกอนเกิดเป็นเฟสซิกมาที่มีธาตุโครเมียม โมลิบดีนัมและเหล็ก อยู่ในโครงสร้าง

4.4 การวิเคราะห์เฟส

ชิ้นงานที่เป็นโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิลเกรด Hastelloy X และผ่านการเติมธาตุอะลูมิเนียม การเติมธาตุอะลูมิเนียมและไทเทเนียมและการเติมไทเทเนียมที่ 6% โดยน้ำหนัก ได้รับการตรวจสอบเพื่อศึกษาถึงเฟสที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงานภายหลังจากการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมงและทำการบ่มแข็งที่ 845 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

4.4.1 ชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X ภายหลังจากหล่อแบบอาร์ก และผ่านการทำละลาย

เฟสต่าง ๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย X-Ray Diffractionmeter ของชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X ที่ไม่มีการเติมธาตุผสมเพิ่มเติม ภายหลังจากหล่อแบบอาร์กและหลอมใหม่โดยการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ดังแสดงในภาพที่ 4.20

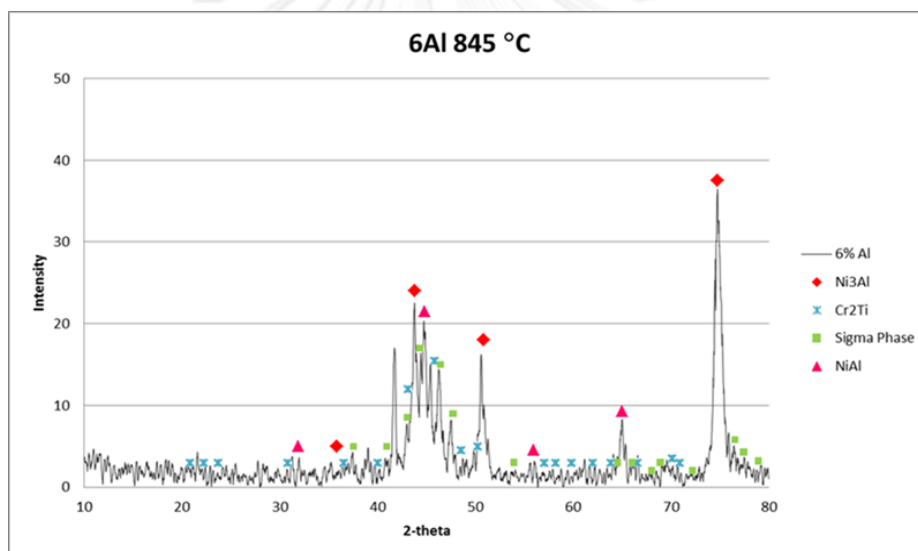


ภาพที่ 4.20 ผลจากการวิเคราะห์ด้วย X-Ray Diffractionmeter ของชิ้นงาน Hastelloy X โดยผ่านการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

โดยพบว่าไม่พบเฟสของการตกตะกอนขึ้นภายในชิ้นงาน Hastelloy X พบเพียงแต่เหล็ก นิกเกิล และคาดว่าน่าจะพบโครเมียมด้วยเนื่องจากมีปริมาณของธาตุเหล่านี้อยู่ในโลหะผสมพิเศษในปริมาณ สัดส่วนที่สูงภายในโครงสร้างเท่านั้น ซึ่งสามารถสรุปผลได้ว่าพบแต่โครงสร้างเนื้อพื้นแกมมา (γ) เท่านั้น

4.4.2 ชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X ที่เติมอะลูมิเนียมปริมาณ 6% โดย น้ำหนัก ภายหลังจากหล่อแบบอาร์ก การทำละลาย และผ่านการบ่มแข็ง

เฟสต่างๆที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย X-Ray Diffractionmeter ของชิ้นงานโลหะผสมพิเศษ เกรด Hastelloy X ที่เติมอะลูมิเนียมปริมาณ 6% โดยน้ำหนัก ภายหลังจากหล่อแบบอาร์กและหลอม ใหม่โดยการทำละลายอุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมงและบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดังแสดงในภาพที่ 4.21



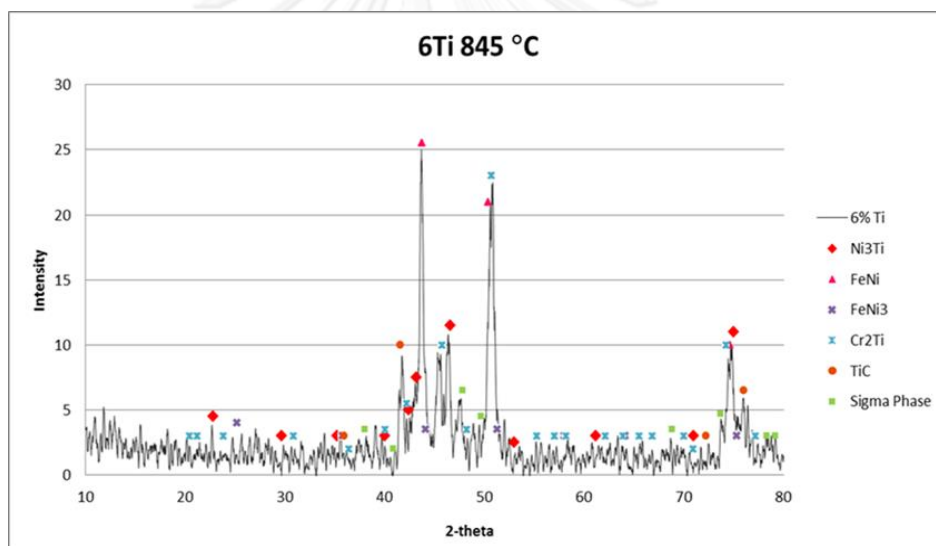
ภาพที่ 4.21 ผลจากการวิเคราะห์ด้วย X-Ray Diffractionmeter ของชิ้นงาน Hastelloy X ที่เติมอะลูมิเนียมปริมาณ 6% โดยน้ำหนักโดยผ่านการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมงและบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

จากภาพที่ 4.21 พบว่าภายในชิ้นงานที่ผ่านการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมงและบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบเฟส Ni_3Al ซึ่งเป็นเฟสแกมมาไพรม์ซึ่งจากการตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาดไม่สามารถพบเฟสนี้ภายในโครงสร้างทั้งนี้เนื่องจาก γ' มีขนาดที่ค่อนข้าง เล็กมากประมาณ 100 นาโนเมตรและคาดว่าน่าจะมีการตกตะกอนในปริมาณที่น้อยทำให้ไม่สามารถ พบได้ด้วยกล้อง OM และ SEM แต่สามารถตรวจสอบได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

(TEM) [8] อีกทั้งยังพบเฟสของ Cr_2Ti และ NiAl ซึ่งคาดว่าน่าจะอยู่ในบริเวณหลุมสีดำ เมื่อทำการตรวจสอบการเติมปริมาณอะลูมิเนียมหลังจากการร่วมวิเคราะห์ด้วย Mapping Element ส่วนเฟสซิกมา เป็นเฟสที่เกิดการตกตะกอนที่มีขนาดใหญ่และพบการตกตะกอนในปริมาณที่มากอยู่ในโครงสร้าง ยังสามารถเห็นได้ชัดเจน

4.4.3 ชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X ที่เติมไทเทเนียมปริมาณ 6% โดยน้ำหนัก ภายหลังจากหล่อแบบอาร์ก การทำละลาย และผ่านการบ่มแข็ง

เฟสต่าง ๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย X-Ray Diffractionmeter ของชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X ที่เติมไทเทเนียมปริมาณ 6% โดยน้ำหนัก ภายหลังจากหล่อแบบอาร์กและหลอมใหม่โดยการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมงและบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดังแสดงในภาพที่ 4.22



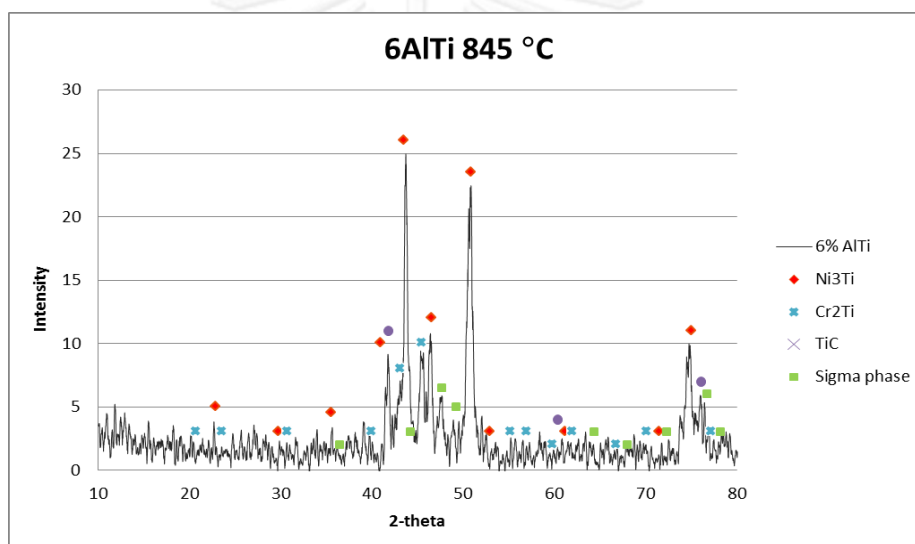
ภาพที่ 4.22 ผลจากการวิเคราะห์ด้วย X-Ray Diffractionmeter ของชิ้นงาน Hastelloy X ที่เติมไทเทเนียมที่ 6% โดยน้ำหนักโดยผ่านการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมงและบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

จากภาพที่ 4.22 จะพบว่าภายในชิ้นงานที่ผ่านการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมงและบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าเฟสที่เกิดขึ้น ได้แก่ Ni_3Ti ซึ่งเป็นเฟสสีดำ (η) ซึ่งเมื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดร่วมด้วย พบว่าเฟสนี้มีโครงสร้างที่มีรูปร่างเห็นได้อย่างชัดเจน ซึ่งเกิดจากการเติมไทเทเนียมลงไปในชิ้นงานทำให้ชิ้นงานมีโครงสร้างแบบ Widmanstatten Pattern ทั้งสอดคล้องกับทฤษฎี [16] ที่ชิ้นงานเมื่อมีการเติมปริมาณไทเทเนียมเพิ่มขึ้นจะทำให้เห็น

โครงสร้างแบบ Widmanstatten Pattern ที่ชัดเจนมากขึ้นและเกิดเฟสอิต้าในชิ้นงานด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ยังพบเฟส Cr_2Ti FeNi FeNi_3 ไทเทเนียมคาร์ไบด์ (TiC) และเฟสซิกมาซึ่งเป็นเฟสที่เกิดการตกตะกอนบนเนื้อพื้นเป็นส่วนใหญ่

4.4.4 ชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X ที่เติมอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียม ปริมาณ 6% โดยน้ำหนัก ภายหลังการหล่อแบบอาร์ก การทำละลาย และผ่านการบ่มแข็ง

เฟสต่าง ๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย X-Ray Diffractionmeter ของชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X ที่เติมอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียมที่ 6% โดยน้ำหนักโดยผ่านการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมงและบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดังแสดงในภาพที่ 4.23



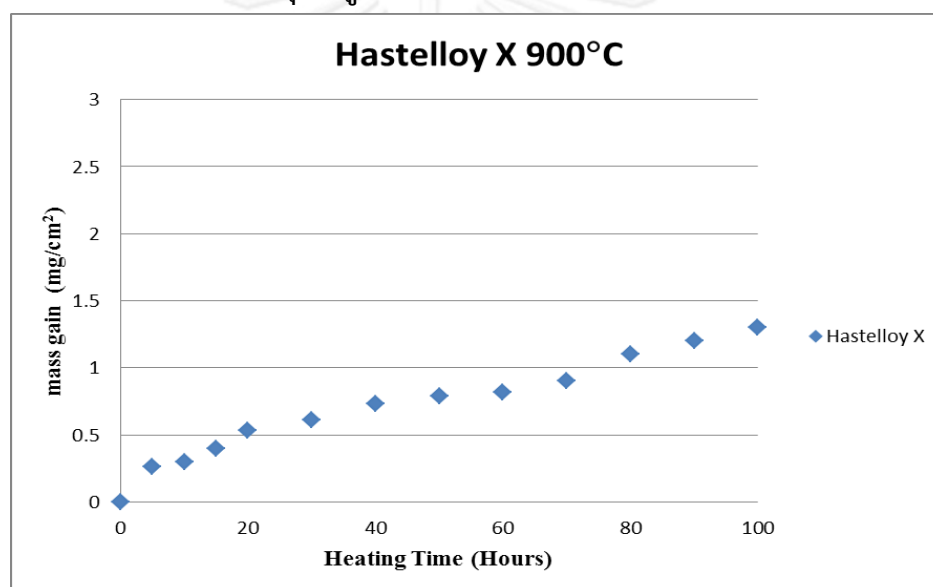
ภาพที่ 4.23 ผลจากการวิเคราะห์ด้วย X-Ray Diffractionmeter ของชิ้นงานที่เติมอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียมปริมาณ 6% โดยน้ำหนัก โดยผ่านการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

จากภาพที่ 4.23 จะพบว่าภายในชิ้นงานที่ผ่านการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมงและบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบเฟสซึ่งได้แก่ Ni_3Ti ซึ่งเป็นอิต้าเฟส (η) ซึ่งเป็นเฟสเดียวที่พบในชิ้นงานที่มีการเติมไทเทเนียมเนื่องจากสาเหตุเดียวกันคือ การเติมไทเทเนียมลงในชิ้นงานทำให้เกิดโครงสร้างแบบ Widmanstatten Pattern [16] ซึ่งทำให้ทราบว่าเฟสที่พบในเนื้อพื้นนั้นเป็นอิต้าเฟส นอกจากนี้ยังพบเฟส Cr_2Ti ไทเทเนียมคาร์ไบด์ (TiC) และเฟสซิกมาที่ตกตะกอนภายในชิ้นงานเช่นเดียวกับการเติมไทเทเนียม

4.5 ปัจจัยของธาตุผสมที่มีผลต่อการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูง

เมื่อนำชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิลเกรด Hastelloy X หลังจากการทำละลายที่ 1175 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ทำการบ่มแข็งในชิ้นงานที่เติมธาตุผสมที่อุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และทำการเผาทดสอบออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียสเปรียบเทียบเป็นเวลา 100 ชั่วโมง ในบรรยากาศปกติ โดยทำการชั่งน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานที่ระยะเวลาต่าง ๆ ทุก ๆ 10 ชั่วโมงจนครบ 100 ชั่วโมง โดยทำการเปรียบเทียบการเพิ่มน้ำหนักของชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X กับชิ้นงานที่เติมอะลูมิเนียม ไทเทเนียมและอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียม

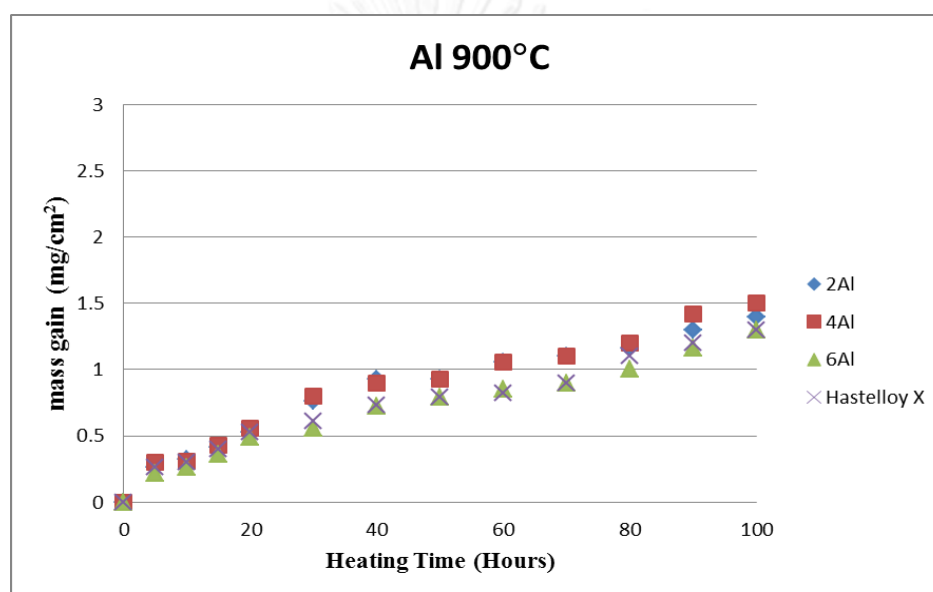
4.5.1 การทดสอบออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.24 กราฟน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X จากการทดสอบออกซิเดชันอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมง

จากภาพที่ 4.24 เป็นการศึกษาค่าผลของการทดสอบออกซิเดชันของชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X ที่ได้ทำการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมงและได้ผ่านการทดสอบออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมง ซึ่งชิ้นงานที่ได้ทำการทดสอบนั้นเป็นชิ้นงานเริ่มต้นโดยที่ไม่ได้เติมอะลูมิเนียมหรือไทเทเนียม พบว่าน้ำหนักของชิ้นงานเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการทดสอบออกซิเดชันเพิ่มมากขึ้น โดยในช่วงแรกพบว่า ในช่วงเวลาที่ 0-20 ชั่วโมง น้ำหนักของชิ้นงานเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่หลังจากนั้นเมื่ออยู่ในช่วง 30-60 ชั่วโมงพบว่า น้ำหนักของชิ้นงานจะเพิ่มขึ้นในอัตราที่ช้าลงแต่มีการเพิ่มของน้ำหนักเรื่อยๆและในช่วงท้ายสุดอยู่ในช่วงเวลาที่ 70-100 ชั่วโมงจะพบว่าน้ำหนักของชิ้นงานจะเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย โดยจะพบการเพิ่มขึ้น

ของน้ำหนักของชิ้นงานคล้ายกับการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักของชิ้นงานในช่วงแรกแต่อาจจะกล่าวได้ว่าในช่วงแรกที่ทำให้การทดสอบออกซิเดชันนั้นเกิดการฟอร์มตัวของชั้นฟิล์มออกไซด์ใหม่อย่างรวดเร็วทั้งทั่วผิวชิ้นงานและเริ่มคงที่เมื่อออกซิเจนจากภายนอกไม่สามารถฟอร์มตัวได้อย่างรวดเร็วทำให้การเพิ่มออกไซด์ช้าลงแต่ในช่วงท้ายที่มีการเพิ่มสูงอีกครั้ง อาจจะเนื่องมาจากการหลุดร่อนของออกไซด์ออกไปและมีการฟอร์มของชั้นออกไซด์ฟิล์มขึ้นมาใหม่อย่างรวดเร็วอีกครั้ง อย่างไรก็ตามออกไซด์ที่หลุดออกมายังคงอยู่ในเบ้าหลอมซึ่งถูกขังรวมกันทำให้น้ำหนักโดยรวมในช่วงท้ายเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วนั่นเอง



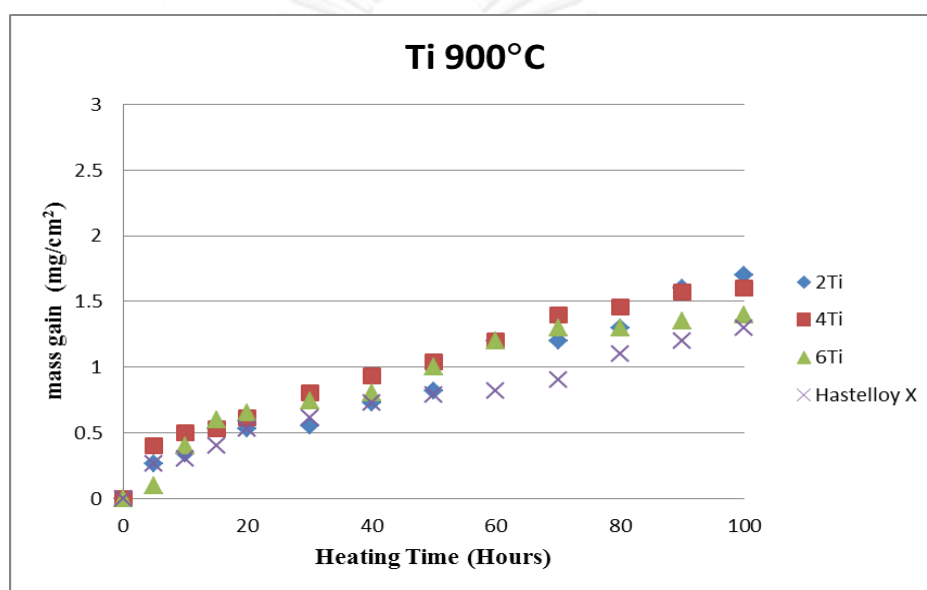
ภาพที่ 4.25 กราฟน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานโลหะผสมพิเศษ
เกรด Hastelloy X

โดยการเติมอะลูมิเนียมปริมาณ 2% 4% และ 6% โดยน้ำหนัก

จากการทดสอบออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมง

จากภาพที่ 4.25 เป็นการศึกษาผลของการทดสอบออกซิเดชันของชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X ที่ได้ทำการทำละลายที่อุณหภูมิที่ 1175 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมงทำการบ่มแข็งในชิ้นงานที่เติมธาตุผสมที่อุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงและได้ผ่านการทดสอบออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมง โดยชิ้นงานที่ได้ทำการทดสอบเปรียบเทียบกับชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X เป็นชิ้นงานที่ได้มีการเติมอะลูมิเนียมปริมาณ 2%, 4% และ 6% โดยน้ำหนัก โดยจากกราฟพิจารณาผลของการเติมอะลูมิเนียมพบว่าปริมาณอะลูมิเนียมที่เติม ทำให้ผลการทดลองนี้ใกล้เคียงกันมาก โดยจะพบว่าในช่วง 0-20 ชั่วโมงแรก กราฟมีการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักซึ่งมีการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักชิ้นงานค่อนข้างสูง

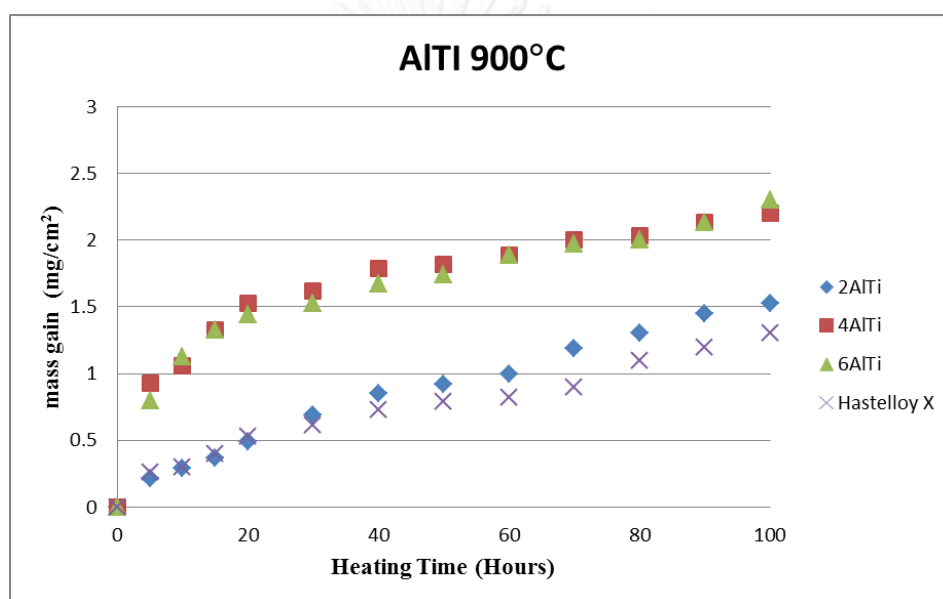
หลังจากผ่านช่วง 20 ชั่วโมงการเพิ่มของน้ำหนักจะมีค่าเกือบคงที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงการเพิ่มของน้ำหนักเล็กน้อยเท่านั้น โดยสำหรับการเติมอะลูมิเนียมปริมาณ 2% 4% และ 6% โดยน้ำหนักจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงของการเพิ่มของน้ำหนักมากเท่าที่ควรเมื่อทำการเปรียบเทียบกับชิ้นงาน Hastelloy X เนื่องจากอุณหภูมิในการทดสอบค่อนข้างต่ำ เมื่อเทียบกับอุณหภูมิการใช้งานของโลหะผสมพิเศษ เกรดนี้ จึงทำให้ความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมินี้ของการเติมอะลูมิเนียม ไม่มีผลมากนัก แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบพบว่าการเติมอะลูมิเนียมปริมาณ 6% โดยน้ำหนักจะมีความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชันได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับการเติมอะลูมิเนียมปริมาณ 2% และ 4% โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 4.26 กราฟน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเนื้อฟีนิกเกิล เกรด Hastelloy X โดยการเติมไทเทเนียมปริมาณ 2%, 4% และ 6% โดยน้ำหนัก และทำการทดสอบออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมง

จากภาพที่ 4.26 เป็นการศึกษามวลของการทดสอบออกซิเดชันของชิ้นงานที่โลหะผสมพิเศษ เกรด Hastelloy X ได้ทำการทำละลายที่อุณหภูมิที่ 1175 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมงทำการ บ่มแข็งในชิ้นงานที่เติมธาตุผสมที่อุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และได้ผ่านการ ทดสอบออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมง โดยชิ้นงานที่ได้ทำการ ทดสอบเปรียบเทียบกับชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X นั้นเป็นชิ้นงานที่ได้มีการเติม ไทเทเนียมปริมาณ 2%, 4% และ 6% โดยน้ำหนัก โดยพบว่าการเติมไทเทเนียม มีผลการทดลองที่ได้ ใกล้เคียงกันนั่นคือ กราฟทั้ง 3 เส้นเกาะกันเป็นกลุ่มและมีค่าของน้ำหนักของออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นสูง มากกว่าของ Hastelloy X อยู่เล็กน้อย โดยในช่วง 0-20 ชั่วโมงแรกจะมีการเพิ่มของน้ำหนักของ

ชิ้นงานที่ค่อนข้างเร็ว แต่เมื่ออยู่ในช่วง 30-50 ชั่วโมงจะพบว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักนั้นจะช้าลง และมีการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักในปริมาณที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับช่วงแรก สามารถสรุปแนวโน้มของการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักชิ้นงานหลังจากการทดสอบออกซิเดชันเป็นเวลา 100 ชั่วโมงที่ได้ทำการบันทึกข้อมูลพบว่า การเติมไทเทเนียมปริมาณ 2% 4% และ 6% โดยน้ำหนักจะมีความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชันใกล้เคียงกันและใกล้เคียงกับ Hastelloy X และยังสอดคล้องกับทฤษฎีนี้ที่ว่าผลการเติมไทเทเนียมลงไปโลหะผสมพิเศษส่งผลให้ค่าความต้านทานการเกิดออกซิเดชันลดลง [17] อย่างไรก็ตามการทดลองที่ออกซิเดชันที่อุณหภูมินี้อาจยังเห็นผลไม่ชัดเจนนัก



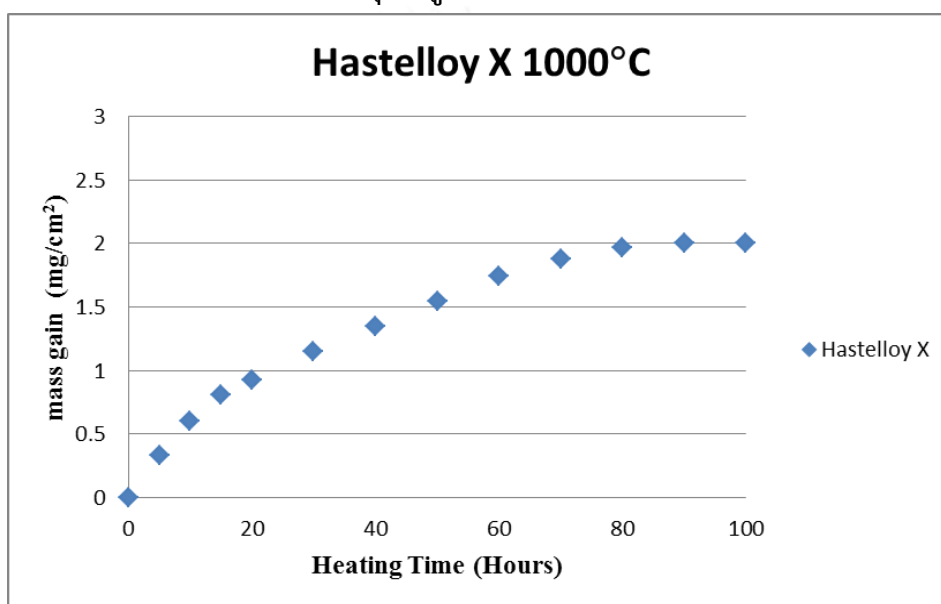
ภาพที่ 4.27 กราฟน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X โดยการเติมอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียมปริมาณ 2% 4% และ 6% โดยน้ำหนัก

จากการทดสอบออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมง

จากกราฟในภาพที่ 4.27 เป็นการศึกษาผลของการทดสอบออกซิเดชันของชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X ที่ได้ทำการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมงทำการบ่มแข็งในชิ้นงานที่เติมธาตุผสมที่อุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และได้ผ่านการทดสอบออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมง ชิ้นงานที่ได้ทำการทดสอบเปรียบเทียบกับชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X นั้นเป็นชิ้นงานที่ได้มีการเติมอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียมปริมาณ 2% 4% และ 6% โดยสามารถแบ่งผลการทดสอบออกเป็น 2 กลุ่มคือกลุ่มแรกคือการเติมอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียมที่ 2% โดยน้ำหนักกับชิ้นงาน Hastelloy X พบว่ามีการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักของออกไซด์ที่ช้าแต่เมื่อใช้เวลาในการทดสอบนานขึ้น พบว่ามี

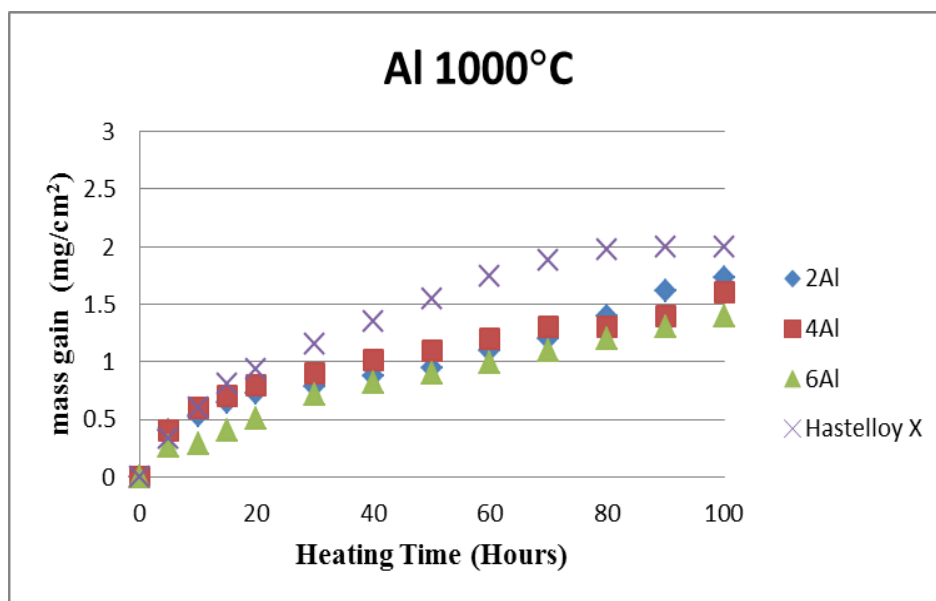
ความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่ต่ำกว่าชิ้นงาน Hastelloy X เพียงเล็กน้อย ส่วนอีกกลุ่มคือกลุ่มที่มีการเติมอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียมที่ 4% และ 6% โดยน้ำหนัก พบว่าในช่วง 10 ชั่วโมงแรก มีน้ำหนักของออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่เติมอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียมที่ 2% โดยน้ำหนักและชิ้นงาน Hastelloy X โดยเมื่อใช้เวลาดทดสอบเป็นเวลานานขึ้น พบว่าความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชันยิ่งต่ำลง [17]

4.5.2 ผลจากการทดสอบออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.28 น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X จากการทดสอบออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมง

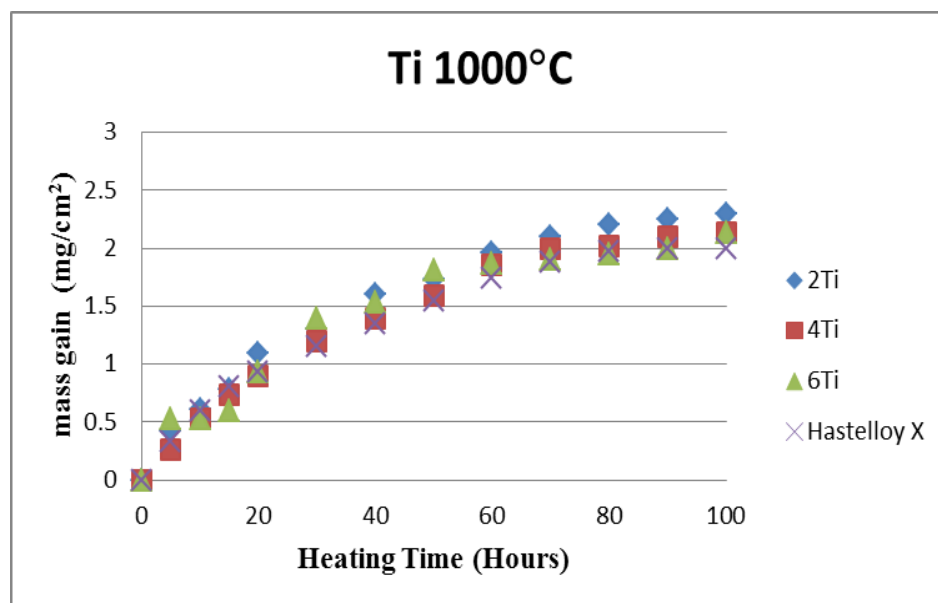
จากภาพที่ 4.28 เป็นการศึกษาผลของการทดสอบออกซิเดชันของชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X ที่ได้ทำการทำลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมงและได้ผ่านการทดสอบออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมง พบว่าน้ำหนักของชิ้นงานจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการทดสอบออกซิเดชันเพิ่มมากขึ้นโดยในช่วงแรกจะพบว่า น้ำหนักของชิ้นงานมีการเพิ่มขึ้นเรื่อยๆและมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 0-20 ชั่วโมง หลังจากนั้นมีการเพิ่มของน้ำหนักจะมีการเพิ่มขึ้นและช้าลงแต่ยังมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อทำการเปรียบเทียบการทดสอบออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส พบว่าการเพิ่มน้ำหนักของที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสนั้นจะมีค่าของน้ำหนักที่เพิ่ม เนื่องจากที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสยังเป็นอุณหภูมิที่ต่ำเกินกว่าจะใช้ในการทดสอบโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X แต่ที่ 1000 องศาเซลเซียสเป็นอุณหภูมิที่ใช้งานเป็นส่วนใหญ่จึงทำให้เห็นแนวโน้มของการเพิ่มของน้ำหนักชิ้นงานที่ชัดเจนมากกว่า



ภาพที่ 4.29 น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X โดยการเติมอะลูมิเนียมปริมาณ 2% 4% และ 6% โดยน้ำหนัก จากการทดสอบออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมง

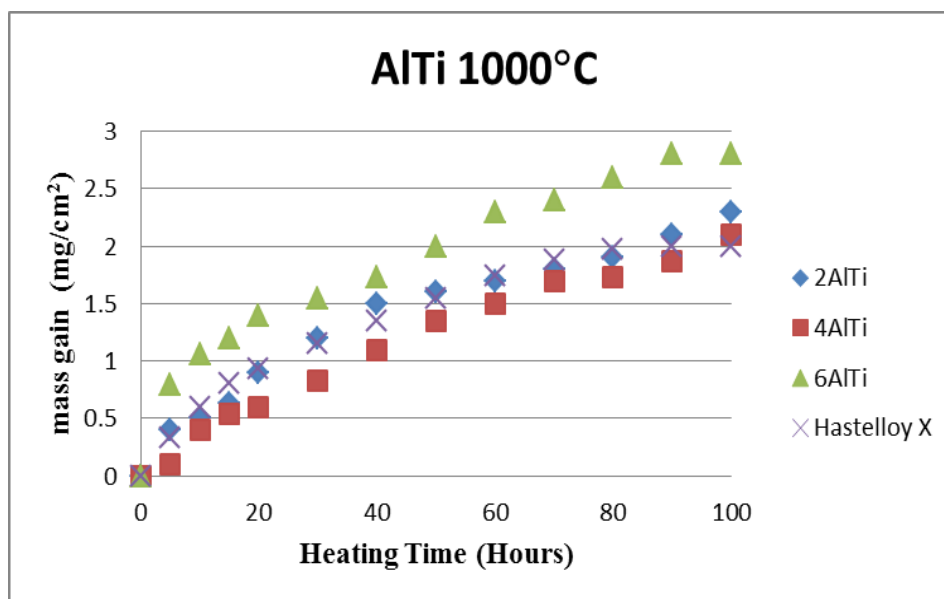
จากกราฟในภาพที่ 4.29 เป็นการศึกษาผลของการทดสอบออกซิเดชันของชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X ที่ได้ทำการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ทำการบ่มแข็งในชิ้นงานที่เติมธาตุผสมที่อุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงและได้ผ่านการทดสอบออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมง โดยชิ้นงานที่ได้ทำการทดสอบเปรียบเทียบกับชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X นั้นเป็นชิ้นงานที่ได้มีการเติมอะลูมิเนียมปริมาณ 2% 4% และ 6% โดยน้ำหนัก โดยจากกราฟเราจะพิจารณาผลของการเติมอะลูมิเนียมปริมาณ 2% โดยน้ำหนัก พบว่าในช่วง 0-20 ชั่วโมงแรกจะมีการเพิ่มของน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่มีการเพิ่มของน้ำหนักที่ค่อนข้างช้าลงแล้วเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและค่อนข้างคงที่ในช่วง 30-100 ชั่วโมง ส่วนผลของการเติมอะลูมิเนียมปริมาณ 6% โดยน้ำหนัก ผลที่ได้มีผลลักษณะใกล้เคียงกับการเติมอะลูมิเนียมปริมาณ 2% และ 4% โดยน้ำหนัก โดยพบว่าการเพิ่มของน้ำหนักที่มากขึ้นในช่วงแรกและหลังจากนั้นจะมีการเพิ่มของน้ำหนักที่ช้าลง โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบผลของการเติมอะลูมิเนียม กับ Hastelloy X พบว่าชิ้นงานที่มีการเติมอะลูมิเนียมจะมีความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่ดีกว่าชิ้นงาน Hastelloy X โดยที่การเติมอะลูมิเนียมปริมาณ 6% โดยน้ำหนัก จะให้ผลที่ดีที่สุดคือ มีความสามารถต่อการต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่ต่ำรองลงมาคือ การเติมอะลูมิเนียมปริมาณ 4% โดยน้ำหนัก และสุดท้ายคือการเติมอะลูมิเนียมปริมาณ 2% โดยน้ำหนัก ซึ่งเกิดการฟอร์มชั้นฟิล์มออกไซด์ที่ค่อนข้างเสถียรและมีความต่อเนื่องของชั้นฟิล์ม Al_2O_3

และยังสามารถป้องกันหรือลดการแพร่ของออกซิเจนทะลุชั้นฟิล์มเข้าไปฟอร์มเป็นออกไซด์เพิ่มเติมขึ้นได้



ภาพที่ 4.30 กราฟน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X โดยการเติมไทเทเนียมปริมาณ 2% 4% และ 6% โดยน้ำหนัก จากการทดสอบออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมง

จากกราฟในภาพที่ 4.30 เป็นการศึกษาผลของการทดสอบออกซิเดชันของชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X ที่ได้ทำการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมงทำการบ่มแข็งในชิ้นงานที่เติมธาตุผสมที่อุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และได้ผ่านการทดสอบออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมง โดยชิ้นงานที่ได้ทำการทดสอบเปรียบเทียบกับชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X นั้นเป็นชิ้นงานที่ได้มีการเติมไทเทเนียมปริมาณ 2% 4% และ 6% โดยน้ำหนัก โดยจากกราฟจะพบว่ามีอัตราการเพิ่มของน้ำหนักของการเกิดออกซิเดชันที่ใกล้เคียงกันทั้งหมดรวมถึงเมื่อเปรียบเทียบกับของ Hastelloy X ด้วย โดยจะมีการเพิ่มของน้ำหนักในช่วงแรกที่ค่อนข้างเร็วและจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อใช้เวลาในการทดสอบออกซิเดชันที่เพิ่มขึ้น โดยที่ไม่ว่าจะมีการเติมไทเทเนียมที่ปริมาณเท่าไรค่าที่ได้นั้นจะมีค่าที่ใกล้เคียงกันมากจนแทบมองไม่เห็นความแตกต่างกันอย่างชัดเจน ซึ่งจะให้ผลที่มีค่าใกล้เคียงกับชิ้นงาน Hastelloy X ตลอดเส้นกราฟ อย่างไรก็ตามยังสามารถเห็นได้ว่าการเติมไทเทเนียมส่งผลให้ความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมินี้ลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับของ Hastelloy X



ภาพที่ 4.31 กราฟน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X โดยการเติมอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียม ปริมาณ 2% 4% และ 6% โดยน้ำหนัก

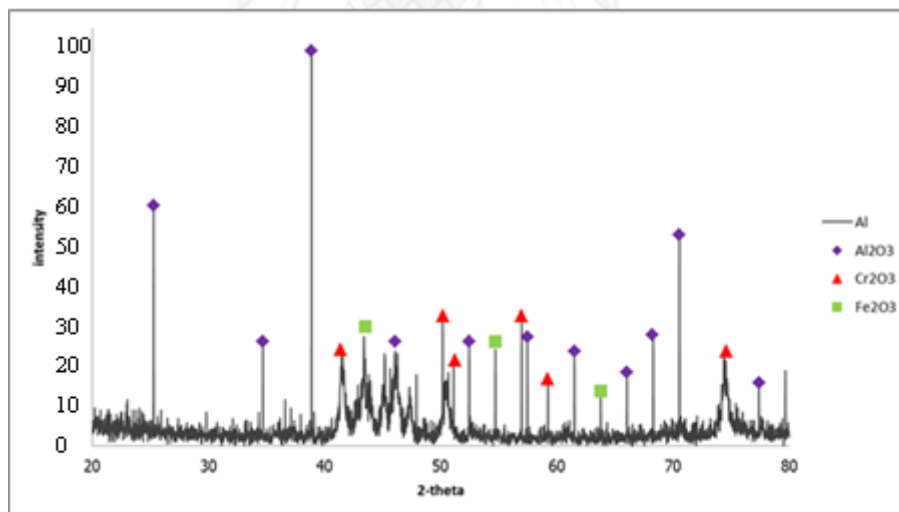
จากการทดสอบออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมง

จากกราฟในภาพที่ 4.31 เป็นการศึกษาผลของการทดสอบออกซิเดชันของชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X ที่ได้ทำการทำละลายที่อุณหภูมิที่ 1175 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ทำการบ่มแข็งในชิ้นงานที่เติมธาตุผสมที่อุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงและได้ผ่านการทดสอบออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมงโดยชิ้นงานที่ได้ทำการทดสอบเปรียบเทียบกับชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X นั้นเป็นชิ้นงานที่ได้มีการเติมอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียมปริมาณ 2% 4% และ 6% โดยน้ำหนัก โดยจากกราฟจะสามารถแบ่งเป็น 2 กลุ่มเช่นเดียวกับการทดสอบออกซิเดชันที่ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมงเช่นกัน โดยกลุ่มแรกมีชิ้นงาน Hastelloy X ชิ้นงานที่เติมอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียมที่ 2% และ 4% โดยน้ำหนัก พบว่ามีน้ำหนักของออกไซด์ที่มีปริมาณที่ใกล้เคียง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงาน Hastelloy X พบว่าชิ้นงานที่มีการเติมอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียมที่ 2% และ 4% โดยน้ำหนักมีความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่ต่ำกว่า ซึ่งเมื่อใช้เวลาในการทดสอบออกซิเดชันนานขึ้นพบว่าน้ำหนักของชิ้นงานจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ส่วนการเติมอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียมที่ 6% โดยน้ำหนัก พบว่ามีความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชันต่ำที่สุด โดยในช่วง 10 ชั่วโมงแรกพบว่าการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักออกไซด์ที่รวดเร็วและเมื่อใช้เวลาในการทดสอบนานขึ้นพบว่าความสามารถในการต้านทานในการเกิดออกซิเดชันยิ่งต่ำเช่นเดียวกับการทดสอบออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 900 องศา

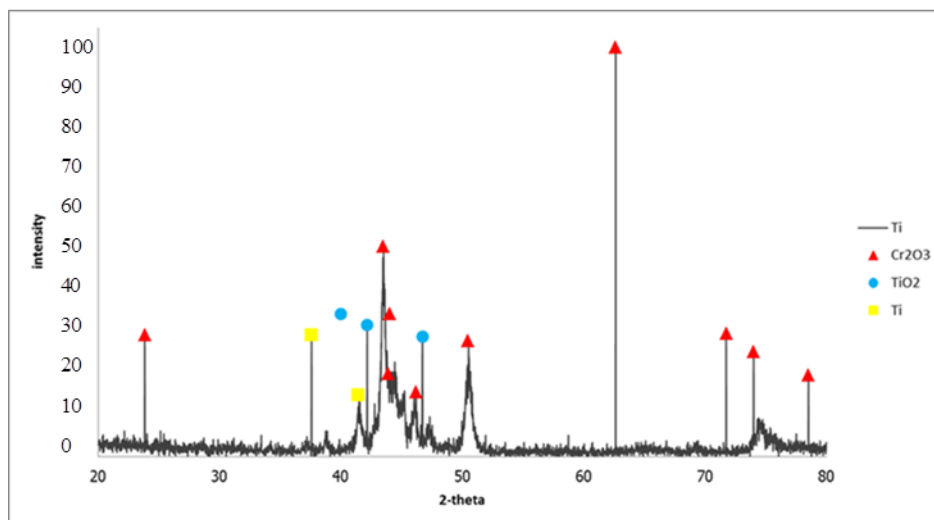
เซลเซียส ซึ่งจากผล XRF พบว่าชิ้นงานที่มีการเติมอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียมพบว่ามีปริมาณไทเทเนียม 5% โดยน้ำหนักและมีปริมาณอะลูมิเนียม 2.32% โดยน้ำหนัก ตามทฤษฎีที่ได้ทำการศึกษาพบว่า ไทเทเนียมจะส่งผลทำให้ความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชันแย่งลง [17] ซึ่งจากผลการทดลองของการทดสอบออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียสมีปริมาณของไทเทเนียมที่สูง ส่งผลทำให้ความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชันต่ำลงและสอดคล้องกับทฤษฎีที่ได้ทำการศึกษา ซึ่งรายละเอียดของกลไกในการเกิดออกซิเดชันในการเติมอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียมจะได้ทำการศึกษาต่อไปในหัวข้อถัดไป

4.6 ผลการวิเคราะห์ชั้นฟิล์มออกไซด์

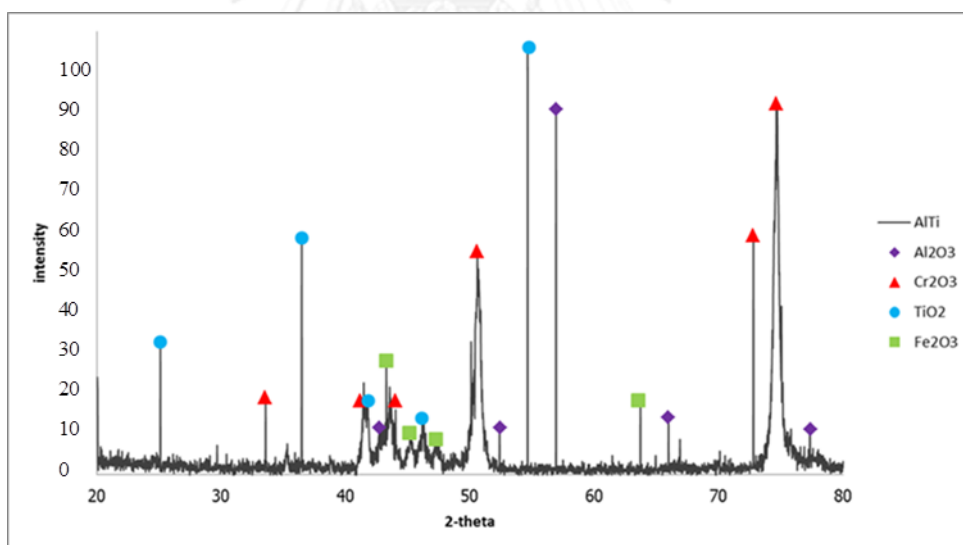
เฟสต่าง ๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย X-Ray Diffractionmeter ที่ชั้นฟิล์มออกไซด์ที่เกิดขึ้น [18] ของชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด Hastelloy X ที่มีการเติมธาตุอะลูมิเนียมไทเทเนียมและการเติมอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียมที่ 6% โดยน้ำหนัก โดยผ่านการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง การบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผ่านการทดสอบออกซิเดชันที่ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมง ภายใต้สภาวะบรรยากาศปกติ ดังแสดงผลในภาพที่ 4.32-4.34



ภาพที่ 4.32 ผลจากการวิเคราะห์ด้วย X-Ray Diffractionmeter ที่ชั้นออกไซด์ฟิล์มของชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X ที่เติมอะลูมิเนียม 6% โดยน้ำหนัก ภายหลังจากทดสอบออกซิเดชันที่ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.33 ผลจากการวิเคราะห์ด้วย X-Ray Diffractionmeter ที่ชั้นออกไซด์ฟิล์มของชิ้นงาน โลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X ที่เติมไทเทเนียม 6% โดยน้ำหนัก ภายหลังจากทดสอบออกซิเดชันที่ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.34 ผลจากการวิเคราะห์ด้วย X-Ray Diffractionmeter ที่ชั้นออกไซด์ฟิล์มของชิ้นงาน โลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X ที่เติมอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียม 6% โดยน้ำหนัก ภายหลังจากทดสอบออกซิเดชันที่ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมง

ภาพที่ 4.32 เป็นชิ้นงานที่มีการเติมอะลูมิเนียม 6% โดยน้ำหนัก พบชั้นฟิล์มออกไซด์ของ Cr_2O_3 และ Al_2O_3 ซึ่งพบว่าความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชันของการเติมอะลูมิเนียม

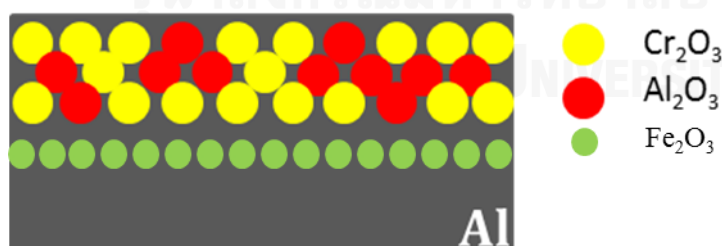
ที่ 6% โดยน้ำหนักที่ดีที่สุด เนื่องจากมีปริมาณของอะลูมิเนียม 5.85% โดยน้ำหนักซึ่งมีปริมาณที่สามารถฟอร์มชั้นฟิล์มออกไซด์ Al_2O_3 ได้มีความต่อเนื่องและมีความเสถียรจึงมีความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชันดีที่สุด

ภาพที่ 4.33 เป็นชิ้นงานที่มีการเติมไทเทเนียม 6% โดยน้ำหนัก พบว่าจะเกิดการฟอร์มชั้นฟิล์มออกไซด์ของ Cr_2O_3 TiO_2 โดยที่จะพบว่าในชิ้นงานที่มีการเติมปริมาณไทเทเนียมมากจะส่งผลทำให้ความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชันลดลง[17] ได้ทำการวิเคราะห์ว่าการเติมไทเทเนียมส่งผลทำให้ความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชันลดลงโดยจากภาพที่ 4.34 จะพบก่อนไทเทเนียมอยู่ในเนื้อพื้น อีกทั้งยังพบการฟอร์มชั้นฟิล์ม Cr_2O_3 และ TiO_2 ที่เสถียรแต่จะมีความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิต่ำกว่า 900 องศาเซลเซียสทำให้ความสามารถในการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิต่ำลดลง

ภาพที่ 4.34 เป็นชิ้นงานที่มีการเติมอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียม 6% โดยน้ำหนัก พบว่าเกิดการฟอร์มชั้นฟิล์มออกไซด์ของ Al_2O_3 Cr_2O_3 TiO_2 และ Fe_2O_3 โดยจากการศึกษาเพิ่มเติมพบว่าเกิดการฟอร์มชั้นฟิล์ม Al_2O_3 เนื่องจากมีปริมาณของอะลูมิเนียม 2.32% โดยน้ำหนัก แต่มีการฟอร์มในลักษณะของชั้นฟิล์ม Al_2O_3 ที่ไม่ต่อเนื่อง และมีการฟอร์มชั้นฟิล์ม TiO_2 แทรกตัวระหว่างชั้นฟิล์ม Al_2O_3 เนื่องจากมีปริมาณของไทเทเนียมที่สูงถึง 5% โดยน้ำหนัก ทำให้ชั้นฟิล์ม TiO_2 ชัดขวางการฟอร์มของชั้นฟิล์ม Al_2O_3 ทำให้ทั้ง Al_2O_3 และ TiO_2 มีชั้นฟิล์มที่ไม่ต่อเนื่องและทำให้ความสามารถของการต้านทานการเกิดออกซิเดชันโดยรวมลดลง

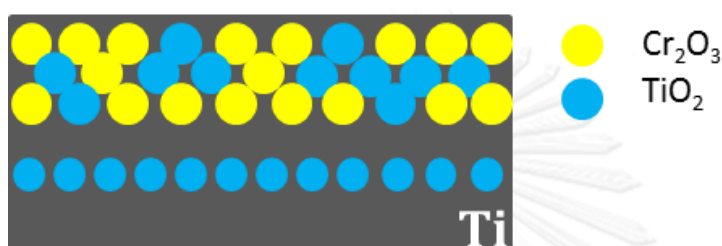
4.6.1 กลไกการเกิดชั้นฟิล์มออกไซด์

จากผลการทดสอบออกซิเดชันสามารถวิเคราะห์ [19] ได้ดังนี้



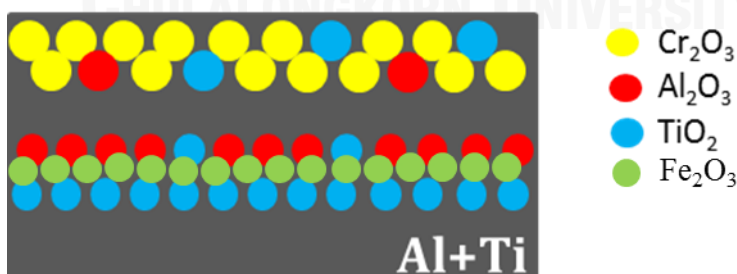
ภาพที่ 4.35 ชิ้นงานที่เติมอะลูมิเนียม 6% โดยน้ำหนักทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมงและบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทดสอบออกซิเดชันที่ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมง

ในกรณีของชิ้นงานที่มีการเติมอะลูมิเนียมลงไปผสมใน Hastelloy X ทำให้ชิ้นงานมีความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูงได้ดีที่สุด เนื่องจากการที่มีปริมาณอะลูมิเนียมเพียงพอในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน ออกซิเจนจะฟอร์มตัวเป็นออกไซด์ฟิล์ม (Al_2O_3) ร่วมกับโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) เป็นชั้นฟิล์มที่มีประสิทธิภาพในการชะลอการเกิดออกซิเดชันภายใต้ชั้นฟิล์มออกไซด์นี้เมื่อมีการทดสอบความร้อนที่อุณหภูมิที่สูงขึ้นเรื่อยๆ



ภาพที่ 4.36 ชิ้นงานที่เติมอะลูมิเนียม 6% โดยน้ำหนักทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมงและบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทดสอบออกซิเดชันที่ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมง

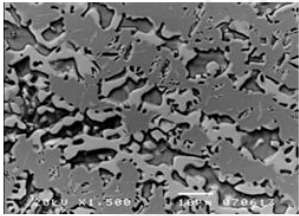
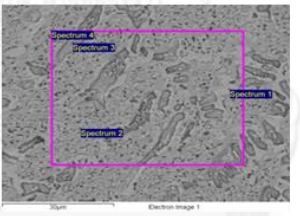
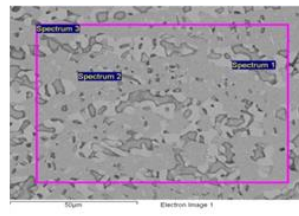
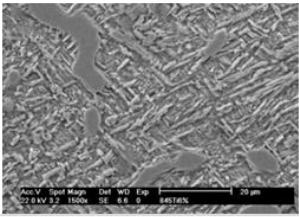
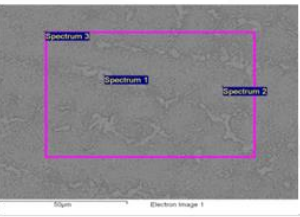
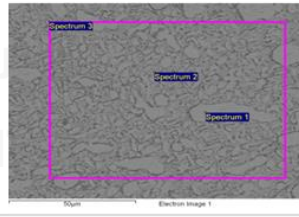
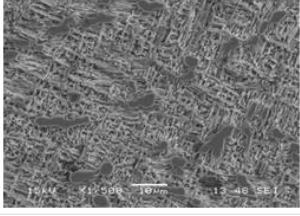
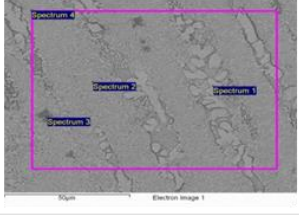
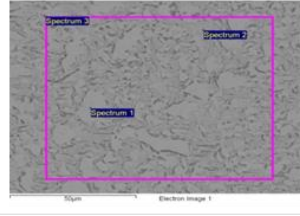
ชิ้นงานที่มีการเติมไทเทเนียมใน Hastelloy X พบว่าไทเทเนียมน่าจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเป็นไทเทเนียมออกไซด์ (TiO_2) อยู่ร่วมกับชั้นฟิล์มโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) เป็นชั้นฟิล์มออกไซด์ที่ต่อเนื่องชะลอการแพร่ของออกซิเจนเข้าไปทำปฏิกิริยากับเนื้อพื้นเป็นออกไซด์ขึ้นมา อย่างไรก็ตามภายใต้ชั้นฟิล์มนี้ ไทเทเนียมยังคงทำปฏิกิริยากับออกซิเจนทำให้ชั้นฟิล์มเกิดการหลุดร่อนและออกซิเจนสามารถแพร่เข้าไปยังชิ้นงานได้ทำให้เกิดการฟอร์มตัวเป็นไทเทเนียมออกไซด์ (TiO_2) เกิดขึ้นได้เรื่อยๆภายในชิ้นงานจึงทำให้การเพิ่มขึ้นของออกไซด์สูงกว่าในชิ้นงานที่มีการเติมอะลูมิเนียมอย่างเดียว ดังแสดงในภาพที่ 4.36



ภาพที่ 4.37 ชิ้นงานที่เติมอะลูมิเนียม 6% โดยน้ำหนักทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมงและบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทดสอบออกซิเดชันที่ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมง

ชิ้นงาน Hatelloy X ที่เติมอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียมและทำให้มีความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่ต่ำที่สุด สามารถอธิบายได้ว่า เมื่อชิ้นงานทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่อุณหภูมิสูงจะเกิดชั้นฟิล์มออกไซด์ของ Al_2O_3 , Cr_2O_3 และ TiO_2 ขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4.37 แต่อย่างไรก็ตามการที่มีออกไซด์ของ TiO_2 ทำให้ชั้นฟิล์ม Al_2O_3 ที่เกิดขึ้นนี้มีความไม่ต่อเนื่อง ทำให้ออกซิเจนสามารถแพร่เข้าสู่ชิ้นงานเพื่อทำปฏิกิริยากับอะลูมิเนียมและไทเทเนียมเกิดเป็นออกไซด์ภายใต้ชั้นฟิล์มออกไซด์ของ Cr_2O_3 รวมทั้งทำให้ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่เติมอะลูมิเนียมและชิ้นงานที่เติมไทเทเนียม นอกจากนี้ยังเป็นไปได้ว่าการมีออกไซด์ฟิล์มของไทเทเนียมออกไซด์ (TiO_2) แทรกตัวอยู่ในชั้นฟิล์มนี้อาจจะทำให้เกิดการยึดเกาะของชั้นฟิล์มออกไซด์ไม่ดีนัก ซึ่งอาจจะเกิดการหลุดร่อนได้ง่ายกว่าปกติ ซึ่งเมื่อชั้นฟิล์มออกไซด์มีการหลุดร่อนไปแล้วจะเกิดการฟอร์มตัวของออกไซด์ผสมขึ้นมา

4.7 โครงสร้างจุลภาคเปรียบเทียบการทำละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมงและบ่มแข็งที่ 845 องศาเซลเซียสกับชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบออกซิเดชันที่ 900 และ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมงดังแสดงในภาพที่ 4.40

%โดยน้ำหนัก	aging 845°C	oxidation 900°C	oxidation 1000°C
6%Al			
6%Ti			
6%Al+Ti			

ภาพที่ 4.38 เปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคระหว่างชิ้นงานที่บ่มแข็งที่อุณหภูมิ 845 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงกับชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบออกซิเดชันที่ 900 และ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมง

เมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานที่ทำละลายที่ 1175 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมงและบ่มแข็งที่ 845 องศาเซลเซียสกับชิ้นงานที่ทำการทดสอบออกซิเดชันที่ 900 และ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมง พบว่าหลังชิ้นงานที่เติมอะลูมิเนียมที่ 6% โดยน้ำหนัก จากการทดสอบออกซิเดชันทั้ง 900 และ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมง พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างมากเท่าที่ควร โดยที่พบเฟสฮีทอออนและเฟสซีเอ็มจะตกต่อนอยู่ในชิ้นงานเช่นเดิม ส่วนการเติมไทเทเนียมและการเติมอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียมพบว่าโครงสร้างที่ 900 และ 1000 องศาเซลเซียสมีแนวโน้มเช่นเดียวกันคือ ยังพบเฟสที่เกิดการตกตะกอนบนชิ้นงานเช่นเดิมแต่โครงสร้างที่ได้จะมีลักษณะถูกละลายลงไปใ้เนื้อพื้นแล้วบางส่วนและขนาดของเฟสที่เกิดการตกตะกอนมีขนาดเล็กลงเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ทำละลายที่ 1175 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมงและบ่มแข็งที่ 845 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของการเติมอะลูมิเนียม ไทเทเนียมและอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียม ในโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X เพื่อปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคโดยการอบละลายที่อุณหภูมิ 1175 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมงและบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 760, 800 และ 845 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดเฟสแกมมาไพร์ม (γ') ภายในโครงสร้างและช่วยเพิ่มความต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส โดยทดสอบออกซิเดชันในบรรยากาศเวลา 100 ชั่วโมง สามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1 ผลของการเติมธาตุอะลูมิเนียม ทำให้เกิดการตกตะกอนของเฟสซิกมาขนาดใหญ่กระจายตัวอยู่ทั่วไปบนเนื้อพื้นแกมมา (γ) และมีเฟส NiAl เกิดขึ้นอยู่บริเวณตามหลุมสีดำบนชิ้นงานโดยปริมาณและขนาดเฟสซิกมา (MoCrFe) และเฟส NiAl มีเพิกขึ้นตามการเติมธาตุผสมอะลูมิเนียมมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบเฟสแกมมาไพร์ม (Ni_3Al) จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD

5.2 ผลของการเติมธาตุผสมไทเทเนียม ทำให้เกิดการตกตะกอนของเฟสซิกมา (MoCrFe) ลักษณะเป็นก้อนกลมขนาดใหญ่และขนาดเล็กกระจายตัวอยู่บนเนื้อพื้นที่มีโครงสร้างแบบ Widmanstatten Pattern ซึ่งเป็นเฟสอีต้า ($\eta, \text{Ni}_3\text{Ti}$) ผลของการเพิ่มปริมาณธาตุผสมไทเทเนียมทำให้ปริมาณและขนาดเฟสซิกมาเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบเฟส Cr_2Ti , FeNi, FeNi_3 และ TiC จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD

5.3 ผลของการเติมธาตุผสมอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียม ทำให้เกิดการตกตะกอนของเฟสซิกมา (MoCrFe) กระจายอยู่บนเนื้อพื้นที่มีโครงสร้างแบบ Widmanstatten Pattern ซึ่งเป็นเฟสอีต้า ($\eta, \text{Ni}_3\text{Ti}$) โดยการเพิ่มปริมาณธาตุผสมอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียม ส่งผลต่อปริมาณและขนาดของการตกตะกอนของเฟสซิกมา เช่นเดียวกับการเติมธาตุผสมไทเทเนียมและยังพบเฟส Cr_2Ti , TiC จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD

5.4 การเพิ่มอุณหภูมิบ่มแข็ง ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคสุดท้ายอย่างมีนัยสำคัญ

5.5 ผลการทดสอบการเกิดออกซิเดชันของโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X ที่มีการเติมธาตุผสมอะลูมิเนียม มีความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชันดีที่สุดที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส โดยเฉพาะการเติมอะลูมิเนียมที่ 6% โดยน้ำหนัก พบการเกิดชั้นฟิล์มโครเมียมออกไซด์

(Cr₂O₃) ชั้นฟิล์มอะลูมินาออกไซด์ (Al₂O₃) และเหล็กออกไซด์ (Fe₂O₃) เมื่อเปรียบเทียบกับชั้นฟิล์มออกไซด์อื่นๆ

5.6 ผลการทดสอบออกซิเดชันของโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X ที่เติมธาตุผสมไทเทเนียมที่ปริมาณต่างๆ มีค่าความต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่ไม่แตกต่างเมื่อเปรียบเทียบกับของโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X ที่ไม่มีการเติมธาตุผสมใดๆ

5.7 ผลการทดสอบออกซิเดชันของโลหะผสมพิเศษเกรด Hastelloy X ที่เติมธาตุผสมอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียม ความต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่ต่ำที่สุด โดยเฉพาะการเติมอะลูมิเนียมผสมไทเทเนียมปริมาณที่ 6% โดยน้ำหนัก โดยพบการเกิดชั้นฟิล์มโครเมียมออกไซด์ (Cr₂O₃) อะลูมินาออกไซด์ (Al₂O₃) ไทเทเนียมออกไซด์ (TiO₂) และเหล็กออกไซด์ (Fe₂O₃)

รายการอ้างอิง

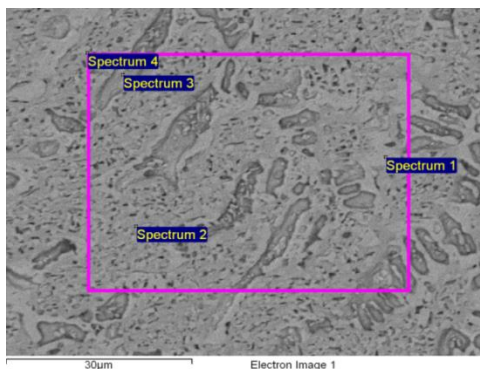
1. ปัญญวัชร วัลยาว, เอกสารประกอบ TECHNICAL TRAINING, วิศวกรรมโลหะสำหรับใช้ที่อุณหภูมิสูง ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค). 2548, สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ: กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.
2. C.T.SIMS. and W.C.HAGEL, The superalloys. 1972, New York: Wiley.
3. ปัญญวัชร วัลยาว, เอกสารประกอบ วิชา High temperature Materials. 2548, ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ: คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
4. Haynes International Inc., A nickel-base alloy with an exceptional combination of oxidation resistance, fabricability and high-temperature strength,.
5. Alloy wire international., Hastelloy X* Specification.
6. Chester T. Sims. and William C. Hagel, The superalloys. p. p15-21.
7. Matthew J. Donachie and Stepen J. Donachie, Understanding Superalloy Metallurgy, in SUPERALLOYS A Technical Guide. p. 25-39
8. Zhao, J.C., M. Larsen, and V. Ravikumar, Phase precipitation and time-temperature-transformation diagram of Hastelloy X. Materials Science and Engineering: A, 2000. 293(1-2): p. 112-119.
9. Xu, L., C. Cui, and X. Sun, The effects of Co and Ti additions on microstructures and compressive strength of Udimet710. Materials Science and Engineering: A, 2011. 528(27): p. 7851-7856.
10. Yulai Xua, C.Y., Xueshan Xiaoa,, Xiuli Caob, Guoqing Jia c, Zhi Shenc, , Evolution of microstructure and mechanical properties of Ti modified superalloy Nimonic 80A. Materials Science and Engineering: A, 2011: p. 315-326.
11. Xu, Y., et al., Relationship between Ti/Al ratio and stress-rupture properties in nickel-based superalloy. Materials Science and Engineering: A, 2012. 544(0): p. 48-53.
12. J. Kucera and M. Hajduga, Long-time oxidation of superalloys, in High-temperature and long-time oxidation of iron and steels. 1998. p. 58-69.
13. อรอินท์ สีหะกุลัง, ผลของการเติมธาตุโครเมียมและนิกเกิลในเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ที่ผลติดด้วยการหล่อต่อโครงสร้างจุลภาคและความต้านทานการเกิดออกซิเดชัน, in สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์. 2556, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. p. 50.
14. อรอินท์ สีหะกุลัง, ผลของการเติมธาตุโครเมียมและนิกเกิลในเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ที่ผลติดด้วยการหล่อต่อโครงสร้างจุลภาคและความต้านทานการเกิดออกซิเดชัน, in สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์. 2556, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย p. 53.
15. Matthew J. Donachie and Stepen J. Donachie, Understanding Superalloy Metallurgy, in SUPERALLOYS A Technical Guide. p. 28.

16. Matthew J. Donachie and Stepen J. Donachie, Understanding Superalloy Metallurgy, in SUPERALLOYS A Technical Guide. p. 27.
17. J. Kucera and M. Hajduga, Long-time oxidation of superalloys, in High-temperature and long-time oxidation of iron and steels. 1998. p. 68.
18. ญดา พลเสน, ผลของการเติมโครเมียมและนิกเกิลในเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ที่ผลิตโดยกรรมวิธีโลหะผงต่อโครงสร้างจุลภาคและความต้านทานการเกิดออกซิเดชัน, in สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์. 2555, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
19. Matthew J. Donachie and Stepen J. Donachie, Understanding Superalloy Metallurgy, in SUPERALLOYS A Technical Guide. p. 288.



ภาคผนวก

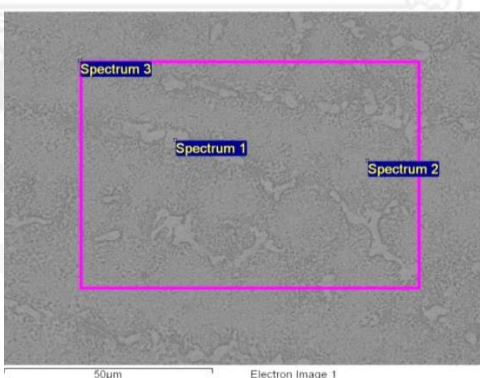
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่มีการเติมอะลูมิเนียมที่ 6% โดยน้ำหนักหลังการทดสอบ ออกซิเดชันที่ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมงที่วิเคราะห์โดยใช้ SEM และการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย EDX

ตารางแสดง ค่าสัดส่วนของธาตุต่างๆ ที่พบในชิ้นงานที่มีการเติมอะลูมิเนียมที่ 6% โดยน้ำหนักหลังการทดสอบออกซิเดชันที่ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมง

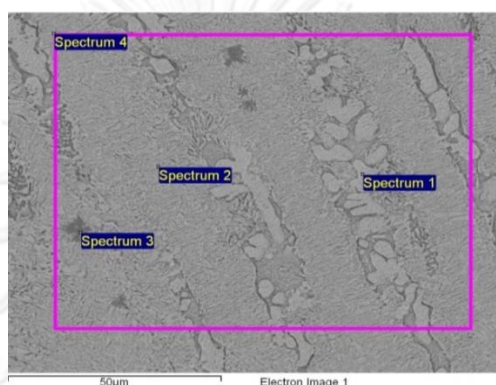
spectrum	Ni	Cr	Al	Fe	Mo
Spectrum1	16.99	38.52	0	22.85	21.63
Spectrum2	57.39	15.26	3.51	16.80	7.04
Spectrum3	59.99	10.21	13.53	9.31	6.96
Spectrum4	44.77	24.44	1.73	14.03	15.03



โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่มีการเติมอะลูมิเนียมและไทเทเนียมที่ 6% โดยน้ำหนักหลังการทดสอบออกซิเดชันที่ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมงที่วิเคราะห์โดยใช้ SEM และการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย EDX

ตาราง แสดงค่าสัดส่วนของธาตุต่างๆ ที่พบในชิ้นงานที่มีการเติมอะลูมิเนียมและไทเทเนียมที่ 6% โดยน้ำหนักหลังการทดสอบออกซิเดชันที่ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมง

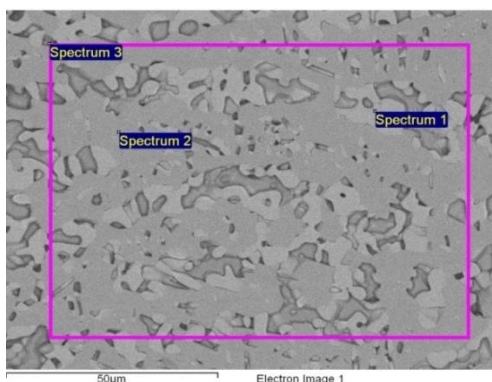
spectrum	Ni	Cr	Al	Ti	Fe	Mo
Spectrum1	20.25	34.73	0	0	22.39	22.63
Spectrum2	38.73	25.75	0.91	0.45	23.23	10.94
Spectrum3	36.38	25.72	0.67	0.88	22.96	13.39



ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่มีการเติมไทเทเนียมที่ 6% โดยน้ำหนักหลังการทดสอบ ออกซิเดชันที่ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมงที่วิเคราะห์โดยใช้ SEM และการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย EDX

ตารางแสดงค่าสัดส่วนของธาตุต่างๆ ที่พบในชิ้นงานที่มีการเติมไทเทเนียมที่ 6% โดยน้ำหนักหลังการทดสอบออกซิเดชันที่ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมง

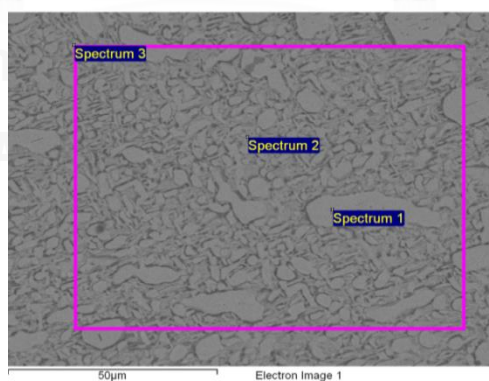
spectrum	Ni	Cr	Ti	Fe	Mo
Spectrum1	26.36	32.74	1.24	22.47	17.19
Spectrum2	42.79	26.13	0	23.20	7.88
Spectrum3	30.14	24.13	7.78	24.16	13.80
Spectrum4	34.82	25.14	1.49	21.74	16.80



ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่มีการเติมอะลูมิเนียมที่ 6% โดยน้ำหนักหลังผ่านการทดสอบออกซิเดชันที่ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมงที่วิเคราะห์โดยใช้ SEM และการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย EDX

ตารางแสดงค่าสัดส่วนของธาตุต่างๆ ที่พบในชิ้นงานที่มีการเติมอะลูมิเนียมที่ 6% โดยน้ำหนักหลังการทดสอบออกซิเดชันที่ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมง

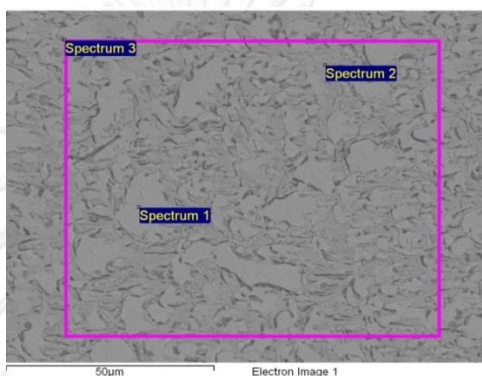
spectrum	Ni	Cr	Al	Fe	Mo
Spectrum1	23.30	29.73	1.01	17.23	28.73
Spectrum2	55.43	18.70	3.53	17.29	5.01
Spectrum3	41.66	25.61	2.24	19.63	10.85



ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่มีการเติมอะลูมิเนียมและไทเทเนียมที่ 6% โดยน้ำหนักหลังผ่านการทดสอบออกซิเดชันที่ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมงที่วิเคราะห์โดยใช้ SEM และการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย EDX

ตารางแสดงค่าสัดส่วนของธาตุต่างๆ ที่พบในชิ้นงานที่มีการเติมอะลูมิเนียมและไทเทเนียมที่ 6% โดยน้ำหนักหลังการทดสอบออกซิเดชันที่ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมง

spectrum	Ni	Cr	Al	Ti	Fe	Mo
Spectrum1	18.83	38.27	0	0.73	24.03	18.15
Spectrum2	27.66	29.19	1.13	1.85	25.82	14.36
Spectrum3	30.04	22.72	0.83	1.53	25.80	15.52



ภาพแสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่มีการเติมไทเทเนียมที่ 6% โดยน้ำหนักหลังผ่านการทดสอบออกซิเดชันที่ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมงที่วิเคราะห์โดยใช้ SEM และการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย EDX

ตารางแสดงค่าสัดส่วนของธาตุต่างๆ ที่พบในชิ้นงานที่มีการเติมไทเทเนียมที่ 6% โดยน้ำหนักหลังการทดสอบออกซิเดชันที่ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 100 ชั่วโมง

spectrum	Ni	Cr	Ti	Fe	Mo
Spectrum1	22.53	38.57	0	18.25	22.65
Spectrum2	44.61	21.65	2.46	22.71	10.11
Spectrum3	33.96	26.29	1.65	21.75	8.18

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ - นามสกุล : ปาจริย์ ศรีเกี่ยวฝัน

วัน - เดือน - ปีเกิด : วันอังคาร 28 มิถุนายน 2531

ที่อยู่ : 532 ถนนพหลโยธิน ต.หัวเวียง อ.เมือง จ.ลำปาง 52000

วุฒิการศึกษา : เข้าศึกษาระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนบุญวาทย์วิทยาลัย ปีการศึกษา 2544

: เข้าศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ปีการศึกษา 2550

: เข้าศึกษาระดับปริญญาโทบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2554

อีเมล : b_twinstar@hotmail.com



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY