

การปรับปรุงผิว Incoloy 825 ด้วยวิธีอะลูมิเนียมไนซิงแบบผง

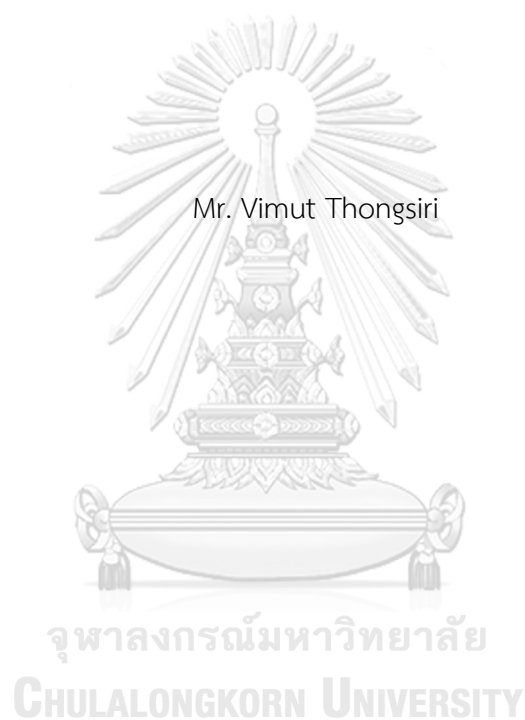


บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการและวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2560
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SURFACE MODIFICATION OF INCOLOY 825 BY PACK ALUMINIZING



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 2017

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงผิว Incoloy 825 ด้วยวิธีอะลูมิเนียมในเชิงแบบผง
โดย	นายวิมุติ ตงศิริ
สาขาวิชา	วิศวกรรมโลหการและวัสดุ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. ปฐมา วิสุทธิพิทักษ์กุล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร. ศิริชัย ลีลาเชาว์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร. ปฐมา วิสุทธิพิทักษ์กุล)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ดร. ศิริชัย ลีลาเชาว์)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปัญญาธิ์ ว่างยาว)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปิโยรส พรหมดิเรก)

วิมุตติ ตงศิริ : การปรับปรุงผิว Incoloy 825 ด้วยวิธีอะลูมิเนียมในเชิงแบบผง (SURFACE MODIFICATION OF INCOLOY 825 BY PACK ALUMINIZING) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
 หลัก: รศ. ดร. ปฐมมา วิสุทธิพิทักษ์กุล, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร. ศิริชัย สีสากะ, 50
 หน้า.

ในวิทยานิพนธ์นี้ศึกษาการปรับปรุงผิวโลหะผสมเกรด INCOLOY 825 ด้วยวิธีอะลูมิเนียมในเชิงแบบผง ใช้อุณหภูมิการทำอะลูมิเนียมในเชิงที่ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบอะลูมิเนียมได้ตรวจสอบและวิเคราะห์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แสง กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ทดสอบการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง รวมทั้งสิ้น 50 ชั่วโมง

พบว่าชั้นเคลือบ 2 ชั้น ชั้นเคลือบด้านนอกจะประกอบไปด้วยเฟสของสารประกอบ Ni_2Al_3 , $NiAl_3$ และ Fe_2Al_5 และชั้นเคลือบด้านในจะประกอบไปด้วยเฟสของสารประกอบ Ni_3Al และ Fe_3Al ผลจากชุดเอกซเรย์สเปกโตรสโคปีแบบกระจายพลังงานแสดงให้เห็นการกระจายตัวของธาตุโครเมียมบริเวณชั้นรอยต่อระหว่างชั้นเคลือบด้านในกับวัสดุพื้น ผลจากเทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แสดงให้เห็นว่าธาตุโครเมียมที่อยู่บริเวณชั้นรอยต่อจะอยู่ในรูปของอะตอมของธาตุโครเมียม ความหนาเฉลี่ยของชั้นเคลือบจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเคลือบเพิ่มขึ้น ค่าพลังงานก่อกัมมันต์สำหรับการทำอะลูมิเนียมในเชิงแบบผงบนโลหะผสมเกรด INCOLOY 825 มีค่าเท่ากับ 70.64 กิโลจูลต่อโมล ผลการทดสอบการเกิดออกซิเดชันแสดงให้เห็นว่าชั้นงานที่ผ่านการเคลือบจะมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นมากกว่าชั้นงานโลหะผสมเกรด INCOLOY 825

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาควิชา	วิศวกรรมโลหการ	ลายมือชื่อนิสิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโลหการและวัสดุ	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก
ปีการศึกษา	2560	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5870243821 : MAJOR METALLURGICAL AND MATERIALS ENGINEERING

KEYWORDS: PACK CEMENTATION / ALUMINIZATION / SURFACE MODIFICATION / INCOLOY 825 / PACK ALUMINIZING

VIMUT THONGSIRI: SURFACE MODIFICATION OF INCOLOY 825 BY PACK ALUMINIZING. ADVISOR: ASSOC. PROF. PATAMA VISUTTIPITUKUL, Ph.D., CO-ADVISOR: SIRICHAJ LEELACHAO, D.Eng., 50 pp.

In this thesis, we study a surface modification of Incoloy 825 superalloys using pack aluminization. The temperatures were 700°C, 800°C and 900°C with processing times of 1, 2.25, 4 and 6.25 hours. Microstructure of aluminide coatings were examined and analyzed by optical microscope, scanning electron microscope and x-ray diffractometry technique. Oxidation test was cyclically performed at 1000°C and 10 hours, a total time was 50 hours

It was found that there are 2 layers obtained. The outer coating consisted of 3 compounds of Ni_2Al_3 , $NiAl_3$ and Fe_2Al_5 . The inner layer contained Ni_3Al and Fe_3Al . According to EDS results, it shows a dispersion of chromium at the interface between the inner coating and substrate. It was in forms of elemental Cr, regarding to XRD patterns. Average thickness of coatings increases with an increase of time and temperature. The activation energy for aluminizing process on Incoloy 825 superalloys were calculated as 70.64 kJ/mol. The oxidation test shows that a mass gain of the aluminized alloys is greater than that of bare metal.

Department: Metallurgical Engineering Student's Signature

Field of Study: Metallurgical and Advisor's Signature

Materials Engineering Co-Advisor's Signature

Academic Year: 2017

กิตติกรรมประกาศ

ความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะไม่สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี หากขาดความช่วยเหลือและความอนุเคราะห์จากหลายฝ่าย ทั้งตัวบุคคลและองค์กรที่ให้ความสนับสนุนงานวิจัยนี้ทุกด้าน ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ปฐมมา วิสุทธิพิทักษ์กุล และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม อาจารย์ ดร.ศิริชัย ลีลาเชาว์ ที่ได้กรุณาให้ความรู้ ความช่วยเหลือ และคำแนะนำอันเป็นแนวทางที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยและการใช้ชีวิตของผู้วิจัย ขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ ศรีเจริญชัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปัญญาวัชร วังยาว และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิโยรส พรหมดิเรก ที่ให้ความรู้ คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

กราบขอบพระคุณ คณาจารย์และเจ้าหน้าที่ธุรการภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่านที่ให้ความรู้ ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ศูนย์วิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้งานสถานที่และเครื่องมือทดสอบสำหรับดำเนินงานวิจัย

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ มารดาและครอบครัวของข้าพเจ้า ที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจแก่ผู้วิจัยมาตลอด ขอกราบขอบพระคุณคุณครูและอาจารย์ทุกท่านที่อบรมสั่งสอนตั้งแต่อดีต ขอขอบคุณพี่และเพื่อนนิสิตในภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำและกำลังใจแก่ผู้วิจัยด้วยดีเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ปรีทรรศน์วรรณกรรม.....	3
2.1 โลหะผสมพิเศษ (superalloys).....	3
2.2 โลหะผสม Incoloy 825.....	4
2.3 อะลูมิเนียมไนซิง (aluminizing)	5
2.3.1 Low-activity aluminization.....	5
2.3.2 High-activity aluminization	7
2.4 อะลูมิเนียมไนซิงแบบผง (pack aluminizing).....	9
2.5 ความต้านทานการเกิดออกซิเดชัน	10
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	11
3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	11
3.2 เครื่องมือการทดลอง.....	11

3.3 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดสอบ.....	11
3.4 ขั้นตอนการเคลือบผิว	12
3.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์ชิ้นงานการทดลอง	13
3.6 ขั้นตอนการทดสอบความแข็งของชั้นเคลือบ.....	13
3.7 ขั้นตอนการทดสอบความต้านทานการเกิดออกซิเดชัน	13
บทที่ 4 ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	14
4.1 ผลการตรวจสอบรูปร่างภายนอกของชิ้นงานหลังจากกระบวนการอะลูมิเนียมในเชิงแบบผง	14
4.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังจากกระบวนการอะลูมิเนียมในเชิงแบบผง	16
4.2.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ 700 องศาเซลเซียส	16
4.2.2 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ 800 องศาเซลเซียส	17
4.2.3 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ 900 องศาเซลเซียส	18
4.3 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบด้วย Scanning electron microscope (SEM)	20
4.4 ผลการตรวจสอบเฟสของชั้นเคลือบด้วย X-ray diffractometer (XRD)	23
4.5 ผลการตรวจสอบอัตราการโตของชั้นเคลือบ (Growth rate)	32
4.6 ผลการทดสอบความต้านทานการเกิดออกซิเดชัน (Oxidation test)	36
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	38
รายการอ้างอิง	39
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	50

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงส่วนผสมทางเคมีของ โลหะผสม Incoloy 825	4
ตารางที่ 2.2 แสดงผลของธาตุผสมต่างๆ ต่อคุณสมบัติของโลหะผสมพิเศษ	4
ตารางที่ 3.1 แสดงอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการทดลอง	12
ตารางที่ 4.1 แสดงเฟสของสารประกอบที่เกิดขึ้นจากการบวมการอะลูมิเนียมในเชิงแบบผง	25
ตารางที่ ก-1 แสดงความหนาชั้นเคลือบของโลหะผสม Incoloy 825 ที่ผ่านกระบวนการ	40
ตารางที่ ก-2 แสดงข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณค่า Activation energy (Q)	40
ตารางที่ ก-3 อัตราส่วนน้ำหนักต่อพื้นที่ผิวเมื่อทดสอบออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสของโลหะผสม Incoloy 825 และชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอะลูมิเนียมในเชิงแบบผง	41

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดง Kirkendall voids จากทำการอะลูมิเนียมในเชิงแบบผง (ก) Ni, (ข) Ni-20Cr [3].....	6
รูปที่ 2.2 โครงสร้างจุลภาคของ Fe-Ni-Cr base alloy 800 ที่ผ่านอะลูมิเนียมในเชิงแบบผงที่ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง [4].....	6
รูปที่ 2.3 ความเข้มข้นของ Al, Ni, Fe และ Cr ที่จุดต่างๆของชิ้นงาน Fe-Ni-Cr base alloy 800....	7
รูปที่ 2.4 แสดงภาพตัดขวางของ K3 ที่ผ่านกระบวนการอะลูมิเนียมในเชิงแบบผงที่ 700 องศาเซลเซียส....	8
รูปที่ 2.5 แสดงผล EDS ของ K3 ที่ผ่านกระบวนการอะลูมิเนียมในเชิงแบบผงที่ 700 องศาเซลเซียส	8
รูปที่ 2.6 แสดงผล XRD ของ K3 ที่ผ่านกระบวนการอะลูมิเนียมในเชิงแบบผงที่ 700 องศาเซลเซียส	9
รูปที่ 2.7 การทดสอบออกซิเดชันของชิ้นงานที่ผ่านและไม่ผ่านการเคลือบ ที่ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 200 ชั่วโมง [7]	10
รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายชิ้นงาน Incoloy 825 ที่ผ่านกระบวนการอะลูมิเนียมในเชิงแบบผงที่ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา ก.) 1 ชั่วโมง ข.) 2.25 ชั่วโมง ค.) 4 ชั่วโมง ง.) 6.25 ชั่วโมง.....	14
รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายชิ้นงาน Incoloy 825 ที่ผ่านกระบวนการอะลูมิเนียมในเชิงแบบผงที่ 800 องศาเซลเซียสเป็นเวลา ก.) 1 ชั่วโมง ข.) 2.25 ชั่วโมง ค.) 4 ชั่วโมง ง.) 6.25 ชั่วโมง	15
รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายชิ้นงาน Incoloy 825 ที่ผ่านกระบวนการอะลูมิเนียมในเชิงแบบผงที่ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา ก.) 1 ชั่วโมง ข.) 2.25 ชั่วโมง ค.) 4 ชั่วโมง ง.) 6.25 ชั่วโมง	15
รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายโครงจุลภาคภาคตัดขวางชิ้นงาน Incoloy 825 ที่ผ่านกระบวนการอะลูมิเนียมในเชิงแบบผงที่ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา ก.)1 ชั่วโมง ข.)2.25 ชั่วโมง ค.)4 ชั่วโมง ง.)6.25 ชั่วโมง....	16
รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายโครงจุลภาคภาคตัดขวางชิ้นงาน Incoloy 825 ที่ผ่านกระบวนการอะลูมิเนียมในเชิงแบบผงที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา ก.)1 ชั่วโมง ข.)2.25 ชั่วโมง ค.)4 ชั่วโมง ง.)6.25 ชั่วโมง....	17
รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายโครงจุลภาคภาคตัดขวางชิ้นงาน Incoloy 825 ที่ผ่านกระบวนการอะลูมิเนียมในเชิงแบบผงที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา ก.)1 ชั่วโมง ข.)2.25 ชั่วโมง ค.)4 ชั่วโมง ง.)6.25 ชั่วโมง....	18
รูปที่ 4.7 กราฟเปรียบเทียบความหนาเฉลี่ยของชั้นเคลือบบนโลหะผสม Incoloy 825	19
รูปที่ 4.8 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วย SEM ของชิ้นงาน Incoloy 825.....	20

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.9 รูปแสดงผลการตรวจสอบชั้นเคลือบด้วยวิธี EDS แสดงผลแบบ mapping ของชิ้นงาน Incoloy 825 ที่ผ่านกระบวนการอะลูมิเนียมในเชิงแบบผงที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ก.)อะลูมิเนียม ข.)นิกเกิล ค.)เหล็ก ง.)โครเมียม จ.)โมลิบดีนัม และ ฉ.)ออกซิเจน.....	21
รูปที่ 4.10 รูปแสดงผลการตรวจสอบชั้นเคลือบด้วยวิธี EDS แสดงผลแบบ Line scan ของชิ้นงาน Incoloy 825 ที่ผ่านกระบวนการอะลูมิเนียมในเชิงแบบผงที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ก.)อะลูมิเนียม ข.)นิกเกิล ค.)เหล็ก ง.)โครเมียม จ.)โมลิบดีนัม และ ฉ.)ออกซิเจน	22
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงผล XRD ของชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวที่ 700 องศาเซลเซียส.....	23
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงผล XRD ของชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวที่ 800 องศาเซลเซียส.....	24
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงผล XRD ของชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวที่ 900 องศาเซลเซียส.....	24
รูปที่ 4.14 แสดงตำแหน่งที่ทำการ XRD ของชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวที่ 900 องศาเซลเซียส	26
รูปที่ 4.15 แสดงผล XRD ที่ความลึกจากผิวที่แตกต่างกันของชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวที่.....	26
รูปที่ 4.16 แบบจำลองกลไกการเกิดชั้นเคลือบของกระบวนการอะลูมิเนียมในเชิงแบบผง	28
รูปที่ 4.17 แผนภูมิสมมูลของเหล็กและอะลูมิเนียม [6].....	29
รูปที่ 4.18 แผนภูมิสมมูลของนิกเกิลและอะลูมิเนียม [6]	30
รูปที่ 4.19 แผนภูมิสมมูลระหว่างนิกเกิล โครเมียมและอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส[8].....	31
รูปที่ 4.20 ผล XRD ของบริเวณลึกจากผิว 120µm ของชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง	31
รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความหนาเฉลี่ยของชั้นเคลือบต่อรากที่สองของเวลาของโลหะผสม	32
รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความหนาเฉลี่ยของชั้นเคลือบต่อรากที่สองของเวลาของโลหะผสม	33
รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความหนาเฉลี่ยของชั้นเคลือบต่อรากที่สองของเวลาของโลหะผสม	33
รูปที่ 4.24 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิต่อความหนาของชั้นเคลือบในเวลาการเคลือบผิวที่เท่ากัน บนโลหะผสม Incoloy 825 ที่ผ่านกระบวนการอะลูมิเนียมในเชิงแบบผง.....	34
รูปที่ 4.25ความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมธรรมชาติของอัตราการเกิดชั้นเคลือบ	35
รูปที่ 4.26 แสดงผลการทดสอบออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส บนโลหะผสม	36

รูปที่

หน้า

รูปที่ 4.27 กราฟแสดงผล XRD ของออกไซด์ที่เกิดขึ้นการทดสอบออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1000..... 37



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันวัสดุโลหะผสมพิเศษ (superalloys) ถูกนำมาใช้มากขึ้น เนื่องจากวัสดุกลุ่มนี้มีคุณสมบัติเด่นคือ ทนความร้อน ทนต่อการกัดกร่อน ทนต่อการคืบได้ดีและรักษาความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง บ่อยครั้งที่มีการนำวัสดุกลุ่มนี้มาใช้ในกระบวนการต่างๆ ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เนื่องจากมีหลายขั้นตอนในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีที่ใช้อุณหภูมิสูงและเสี่ยงต่อการเกิดการกัดกร่อน

โลหะผสมพิเศษกลุ่ม Incoloy 825 จัดอยู่ในกลุ่ม Incoloy 800 ที่มีส่วนผสมหลักคือ นิกเกิล โครเมียม เหล็ก มีการเติมโมลิบดีนัม ทองแดงและไทเทเนียมเพิ่มเข้าไป เพื่อเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูง และเพิ่มความต้านทานการคืบ รวมทั้งสามารถรักษาความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง จึงมีการนำ Incoloy 825 ไปใช้เป็นตัวส่งแก๊สในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี หากใช้งานที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน ปัญหาที่พบเจอได้คือการเกิดโค้ก (coke formation) ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนลดลง ส่งผลถึงอายุการใช้งานของวัสดุและต้องทำการหยุดการผลิตเพื่อเปลี่ยนท่อใหม่ ซึ่งจะทำให้เสียค่าใช้จ่ายทั้งในส่วนของการสั่งซื้อและยังสูญเสียเวลาในการผลิตอีกด้วย

เนื่องจากโลหะผสมพิเศษกลุ่ม Incoloy 825 เป็นวัสดุที่ราคาสูง จึงมีแนวคิดที่จะทำการเคลือบผิวด้วยวิธีการต่างๆ ในการสร้างชั้นป้องกัน (protective film) ช่วยยืดอายุของวัสดุ ในการวิจัยนี้จะศึกษาวิธีการอะลูมิเนียมในเชิงแบบผง (pack aluminizing) ซึ่งเป็นวิธีการที่สามารถใช้สร้างสารประกอบอะลูมิเนียมไนด์บน Incoloy 825 โดยสารประกอบอะลูมิเนียมไนด์จะเพิ่มความแข็งแรงและความต้านทานการกัดกร่อนให้กับวัสดุ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาผลของตัวแปรในกระบวนการอะลูมิเนียมในเชิงแบบผงเพื่อปรับปรุงผิวโลหะผสม Incoloy 825 เพื่อออกแบบสภาวะการทำอะลูมิเนียมในเชิงแบบผงให้เหมาะสม
2. ตรวจสอบลักษณะของชั้นเคลือบบนผิวโลหะผสม Incoloy 825 หลังผ่านกระบวนการอะลูมิเนียมในเชิงแบบผง
3. เปรียบเทียบความสามารถในการต้านทานการเสื่อมสภาพภายใต้บรรยากาศที่มีออกซิเจนของโลหะผสม Incoloy 825 ที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการอะลูมิเนียมในเชิงแบบผง

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. ศึกษากระบวนการอะลูมิเนียมในเชิงแบบผง สำหรับชิ้นงานโลหะผสม Incoloy 825 ในช่วงอุณหภูมิ 700 ถึง 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ถึง 6.25 ชั่วโมง
2. ศึกษาลักษณะของชั้นเคลือบที่เกิดจากกระบวนการอะลูมิเนียมในเชิงแบบผงบนผิวโลหะผสม Incoloy 825

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงผลของอุณหภูมิและเวลาในการทำอะลูมิเนียมในเชิงแบบผงบนผิวของโลหะผสม Incoloy 825
2. ทราบถึงลักษณะของชั้นเคลือบที่เกิดจากกระบวนการอะลูมิเนียมในเชิงแบบผงบนผิวโลหะผสม Incoloy 825



บทที่ 2

ปริทรรศน์วรรณกรรม

2.1 โลหะผสมพิเศษ (superalloys) [1]

โลหะผสมพิเศษเป็นโลหะที่มีสมบัติพิเศษกว่าโลหะทั่วไปคือ สามารถรักษาความแข็งแรงได้ในขณะใช้งานที่อุณหภูมิสูง มีความต้านทานการกัดกร่อนและต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่ดี จึงนิยมนำไปใช้สำหรับงานที่อุณหภูมิสูงเช่นเครื่องยนต์ใบพัดกังหันแก๊ส ท่อแก๊สสำหรับงานปิโตรเคมี และอุตสาหกรรมที่ใช้อุณหภูมิสูงอื่น สมบัติทางกายภาพและทางกลที่พิเศษเกิดจากโครงสร้างจุลภาคที่มีการจัดเรียงอะตอมแบบ face-centered cubic (fcc) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่รักษาความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง มีความสามารถในการเติมธาตุผสมในรูปแบบสารละลายของแข็ง (solid solution) และสามารถควบคุมการตกตะกอนของสารละลายของแข็ง (precipitation) ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมพิเศษจะประกอบด้วยโลหะต่างๆ ได้แก่ นิกเกิล (Ni) โครเมียม (Cr) โคบอลต์ (Co) อะลูมิเนียม (Al) ไทเทเนียม (Ti) เหล็ก (Fe) และธาตุอื่นๆ

โดยสามารถแบ่งประเภทของโลหะผสมพิเศษออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่

กลุ่มที่ 1 Nickel base superalloys เป็นกลุ่มที่มีนิกเกิลเป็นเนื้อพื้นหลัก มีนิกเกิลผสมมากกว่า 50% โดยน้ำหนัก และผสมอะลูมิเนียม ไทเทเนียม หรือไนโอเบียม (Nb) เพื่อสร้างสารประกอบเชิงโลหะกับนิกเกิล ช่วยเพิ่มความแข็งแรงขณะใช้งานที่อุณหภูมิสูง เป็นกลุ่มที่นิยมนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องยนต์เครื่องบิน อุตสาหกรรมพลังงาน และอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เพราะโลหะกลุ่มนี้มีความสามารถต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูง ความสามารถต้านทานการกัดกร่อนและความต้านทานการคืบที่ดีกว่าโลหะทั่วไป

กลุ่มที่ 2 Cobalt base superalloys เป็นกลุ่มที่มีโคบอลต์เป็นเนื้อพื้นหลัก มีโคบอลต์ผสมมากกว่า 50% โดยน้ำหนัก โครเมียม 25% โดยน้ำหนัก และผสมธาตุอื่นๆ มีความต้านทานการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูงดีมาก กว่า Nickel base superalloys แต่จะมีความแข็งแรงน้อยกว่า นิยมนำไปใช้งานประเภท Static part

กลุ่มที่ 3 Iron base superalloys เป็นกลุ่มที่มีเนื้อพื้นหลักเป็นเหล็กผสมนิกเกิล โดยจะผสมเหล็ก 15-60% โดยน้ำหนัก นิกเกิล 25-60% โดยน้ำหนัก และผสมธาตุอื่นๆเช่น อะลูมิเนียม ไทเทเนียม โครเมียมและโมลิบดีนัม การใช้เหล็กเป็นส่วนผสมเนื้อพื้นเพื่อลดต้นทุน แต่จะใช้มีช่วงการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำลง เมื่อเทียบกับ Nickel base superalloys

2.2 โลหะผสม Incoloy 825

โลหะผสม Incoloy 825 จัดเป็นโลหะผสมพิเศษกลุ่ม Iron base superalloys ที่ปรับปรุงมาจาก Incoloy 800 โดยมีการเติมธาตุ โครเมียม โมลิบดีนัม ทองแดง และ ไทเทเนียม (Ti) มีส่วนผสมเคมีตามตารางที่ 2.1 ถูกออกแบบมาให้มีความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน (oxidation resistance) ส่วนผสมของนิกเกิลช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อน (corrosion resistance) และ chloride-ion stress corrosion cracking ทองแดง (Cu) ช่วยเพิ่มความต้านทานต่อบรรยากาศที่มีกรด sulfuric และ phosphoric โมลิบดีนัม (Mo) ช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (pitting corrosion) และการกัดกร่อนแบบซอก (crevice corrosion) ซึ่งผลของธาตุต่างๆที่ผสมลงไป ใน Incoloy 825 เพื่อปรับปรุงสมบัติได้แสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 แสดงส่วนผสมทางเคมีของ โลหะผสม Incoloy 825

	Chemical composition (wt%)										
	Ni	Fe	Cr	Mo	Cu	Ti	C	Mn	S	Si	Al
Incoloy 825	38.0-46.0	22.0 min	19.5-23.5	2.5-3.5	1.5-3.0	0.6-1.2	0.05 max	1.0 max	0.03 max	0.5 max	0.2 max

ตารางที่ 2.2 แสดงผลของธาตุผสมต่างๆ ต่อคุณสมบัติของโลหะผสมพิเศษ

ธาตุ	ผลของการเติม
Ni	<ul style="list-style-type: none"> เป็นส่วนประกอบหลักของเนื้อพื้น ทำให้วัสดุมีโครงสร้างผลึกแบบ fcc เพิ่มความสามารถในการเติมธาตุผสม
Fe	<ul style="list-style-type: none"> เป็นส่วนประกอบเนื้อพื้นหลักของวัสดุ
Cr	<ul style="list-style-type: none"> เพิ่มความแข็งแรงจากกลไกการเกิด solid solution strengthening เพิ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนและการเกิดออกซิเดชัน
Mo	<ul style="list-style-type: none"> เพิ่มความแข็งแรงจากกลไกการเกิด solid solution strengthening เพิ่มความต้านทานการเกิดการกัดกร่อนแบบรูเข็มและแบบซอก
Cu	<ul style="list-style-type: none"> เพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนในสภาพแวดล้อมที่ประกอบด้วยกรดซัลฟิวริก และฟอสฟอริก
Ti	<ul style="list-style-type: none"> เพิ่มแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงโดยรวมตัวกับนิกเกิลเป็น intermetallic compound (Ni_3Ti)
C	<ul style="list-style-type: none"> เพิ่มความแข็งแรงจากการเป็นส่วนประกอบในการเกิดคาร์ไบด์กับธาตุผสมอื่นๆ

Mn	<ul style="list-style-type: none"> ■ เพิ่มความแข็งแรงจากกลไกการเกิด solid solution strengthening
Si	<ul style="list-style-type: none"> ■ เพิ่มความแข็งแรงจากกลไกการเกิด solid solution strengthening
Al	<ul style="list-style-type: none"> ■ เพิ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนและการเกิดออกซิเดชัน ■ เพิ่มความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงโดยรวมตัวกับนิกเกิลเป็นสารประกอบเชิงโลหะ (intermetallic compound)

โลหะผสม Incoloy 825 เป็นที่นิยมนำไปใช้กับงานอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ท่อส่งน้ำมันและแก๊ส รวมถึงอุปกรณ์อื่นๆ เช่น ใบพัดกังหันแก๊ส รวมถึงงานที่ใช้งานที่อุณหภูมิสูง ซึ่งมักจะเกิดปัญหาจากการเกิดออกซิเดชันและทำให้อายุการใช้งานลดลง จึงมีแนวทางการปรับปรุงผิวของวัสดุโดยวิธีการเคลือบผิวเพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชัน เช่น วิธีอะลูมิเนียมไนซิง (aluminizing)

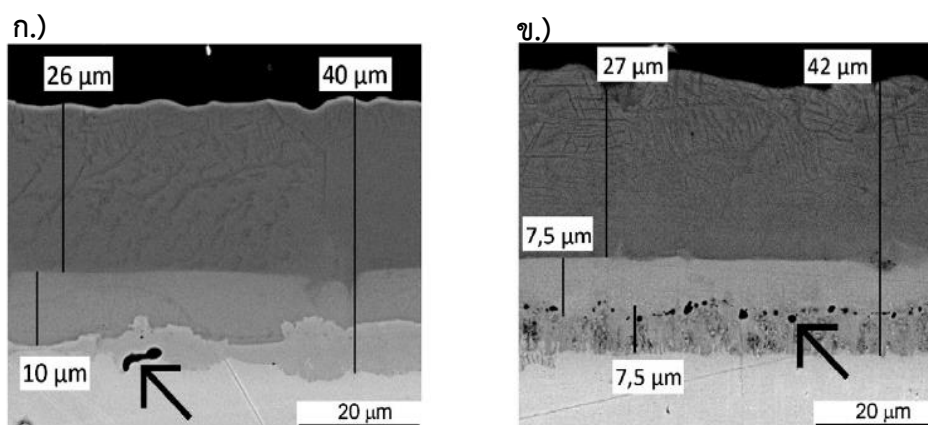
การใช้วิธีอะลูมิเนียมไนซิงกับโลหะผสม Incoloy 825 ที่มีส่วนผสมของนิกเกิลจะสามารถสร้างสารประกอบระหว่างนิกเกิลและอะลูมิเนียมที่ผิวบนสุดของวัสดุ ซึ่งอะลูมิเนียมจะสร้างอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เป็นชั้นป้องกันที่ผิว ซึ่งมีความเสถียร สามารถซ่อมแซมตัวเองได้ (self healing) และป้องกันวัสดุไม่ให้สัมผัสกับออกซิเจนโดยตรงเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูง [2]

2.3 อะลูมิเนียมไนซิง (aluminizing)

อะลูมิเนียมไนซิงจัดเป็นกระบวนการเคลือบผิวแบบอาศัยการแพร่ (diffusion coating process) เกิดการเปลี่ยนแปลงของส่วนผสมทางเคมีบริเวณผิวโดยมีการแพร่ของอะลูมิเนียมเข้าสู่ผิวเนื้อพื้น และเกิดเป็นสารประกอบอะลูมิเนียมไนต์ ขั้นตอนการเคลือบผิวสามารถแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอน คือ การสร้างชั้นเคลือบ (aluminizing) และการอบเป็นเนื้อเดียวกัน (heat treatment) การสร้างชั้นเคลือบสามารถแบ่งตามอุณหภูมิที่ใช้ได้ 2 กรณี คือ

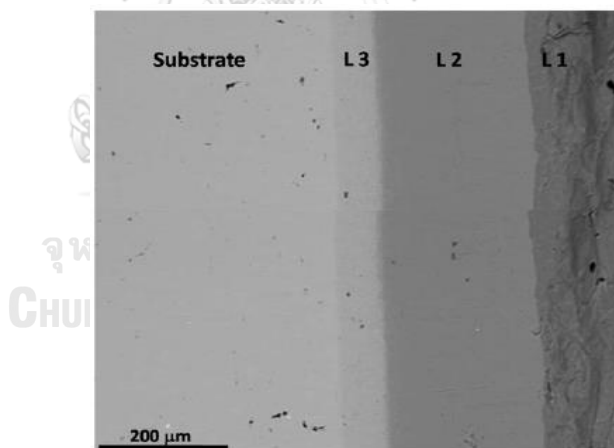
2.3.1 Low-activity aluminization ใช้อุณหภูมิประมาณ 950-1100 องศาเซลเซียส จะทำให้อะตอมของวัสดุเนื้อพื้นแพร่ไปที่ชั้นเคลือบ เกิดเป็นช่องว่างในเนื้อวัสดุจากการแพร่ตามปรากฏการณ์ Kirkendall's effect และมีความเข้มข้นของอะลูมิเนียมที่แพร่เข้าสู่ผิววัสดุพื้นต่ำ

จากการศึกษาของ Francesco Bozza [3] ได้ทำการทดลองอะลูมิเนียมไนซิงแบบผงที่ 950 ถึง 1040 องศาเซลเซียส บนนิกเกิลบริสุทธิ์, Ni-20Cr, Inconel 738 และ CM274LC พบว่าเกิด Kirkendall voids ในชั้นสารประกอบอะลูมิเนียมไนต์หลังการเคลือบผิว ซึ่งเป็นผลมาจาก outward diffusion ของนิกเกิล

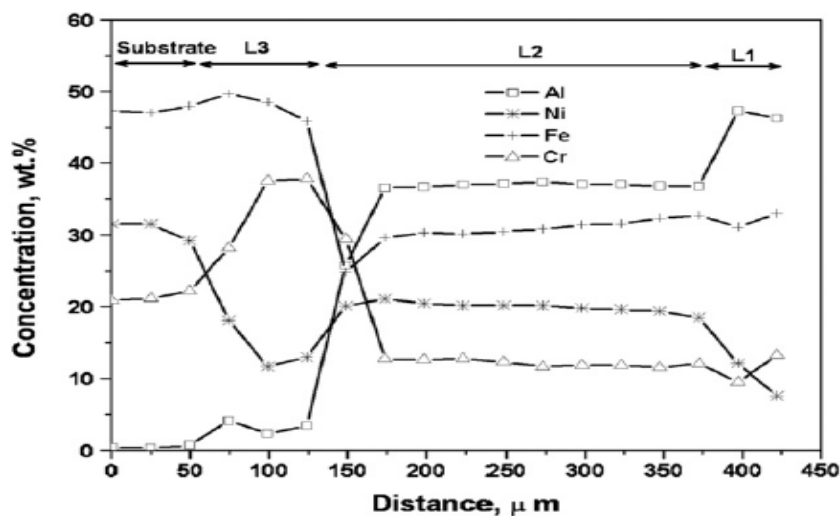


รูปที่ 2.1 แสดง Kirkendall voids จากทำการอะลูมิเนียมในเชิงแบบผง (ก) Ni, (ข) Ni-20Cr [3]

จากการศึกษาของ R.S. Dutta และคณะ [4] ได้ทำการเคลือบผิว Fe-Ni-Cr alloy 800 ด้วยวิธีอะลูมิเนียมในเชิงแบบผง ที่ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยใช้อัตราส่วนของ pack mixture $\text{NH}_4\text{Cl} : \text{Al} : \text{Al}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 5 : 10 : 85 ผลการตรวจสอบเฟสของสารประกอบของชั้นเคลือบด้วยวิธี XRD สามารถแบ่งได้เป็น 3 ชั้น โดยชั้นนอกสุดมีความหนา 150 ไมครอน เป็นเฟสของ FeAl และ Fe_2Al_5 ชั้นถัดมามีความหนา 250 ไมครอน เป็นเฟสของ FeAl และชั้นในสุดมีความหนา 60 ไมครอน เป็นเฟสของสารละลายของแข็งที่ประกอบไปด้วย 43 at%Fe, 38 at%Cr, 11 at%Ni และ 6 at%Al

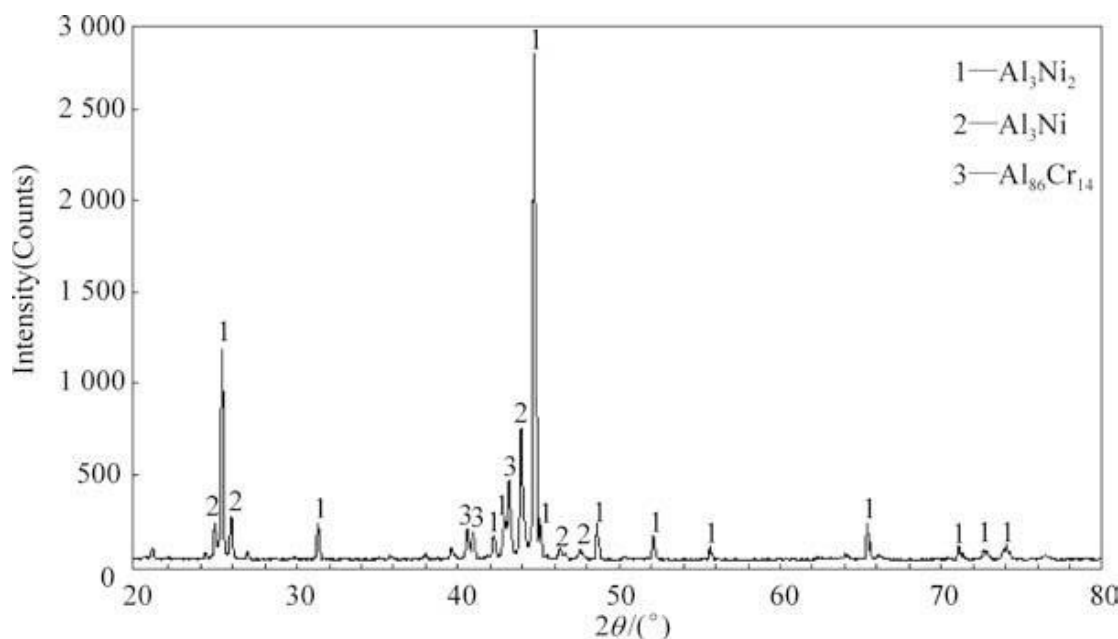


รูปที่ 2.2 โครงสร้างจุลภาคของ Fe-Ni-Cr base alloy 800 ที่ผ่านอะลูมิเนียมในเชิงแบบผงที่ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง [4]



รูปที่ 2.3 ความเข้มข้นของ Al, Ni, Fe และ Cr ที่จุดต่างๆของชิ้นงาน Fe-Ni-Cr base alloy 800 ที่ผ่านกระบวนการอะลูมิเนียมในเชิงแบบผงที่ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง [4]

2.3.2 High-activity aluminization ใช้อุณหภูมิประมาณ 700-950 องศาเซลเซียส วิธีนี้ จะมีความเข้มข้นของอะลูมิเนียมที่แพร่เข้าสู่ผิววัสดุพื้นมากกว่าวิธี low-activity จากการทดลองของ Lu Tong และคณะ [5] ได้ทำการอะลูมิเนียมในเชิงแบบผงบน Ni base superalloys K3 ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง โดยใช้อัตราส่วนของ Al, Al₂O₃ และ NH₄Cl เป็น 10 : 80 : 10 รวม 20 กรัม และใช้อัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ในเตาที่ปกคลุมบรรยากาศด้วยแก๊สอาร์กอน พบว่าชั้นเคลือบสามารถแบ่งเป็น 2 ชั้น โดยชั้นเคลือบด้านนอกประมาณ 90 ไมครอน ผลจาก XRD พบว่าชั้นเคลือบด้านนอกประกอบไปด้วยเฟสของ Ni₂Al₃, NiAl₃ และ สารประกอบเชิงโลหะระหว่างโครเมียม อะลูมิเนียม โดยมีส่วนผสมของ นิกเกิล 40 เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนัก และ อะลูมิเนียม 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ชั้นเคลือบด้านในมีความหนาประมาณ 30 ไมครอน มีความหนาแน่น ความเป็นเนื้อเดียวกันและยึดเกาะกับวัสดุพื้นดีมาก เฟสหลักคือ Ni₂Al₃



รูปที่ 2.6 แสดงผล XRD ของ K3 ที่ผ่านกระบวนการอะลูมิเนียมในเชิงแบบผงที่ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

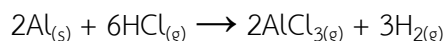
2.4 อะลูมิเนียมในเชิงแบบผง (pack aluminizing) [6]

อะลูมิเนียมในเชิงแบบผงเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการสร้างชั้นเคลือบของสารประกอบอะลูมิเนียมได้จากไอของเกลืออะลูมิเนียมคลอไรด์ โดยการนำวัสดุเนื้อพื้นและสารตั้งต้นของปฏิกิริยาเคมีมาใส่ไว้ในภาชนะเดียวกัน สารตั้งต้นของปฏิกิริยาเคมีในสถานะของแข็งซึ่งประกอบไปด้วยผงอะลูมิเนียมทำหน้าที่เป็นแหล่งของอะตอมอะลูมิเนียม สารประกอบ halide เช่น NH_4Cl ทำหน้าที่เป็น activator และ ผงอะลูมิเนียมใช้ในการป้องกันการเกิดหลอมติดกันของอะลูมิเนียม (sintering) จากนั้นนำไปให้ความร้อนตามอุณหภูมิและเวลาที่กำหนด

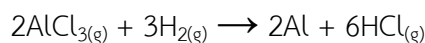
เมื่อ NH_4Cl ได้รับความร้อนจะทำให้เกิดการสลายตัวตามสมการ



จากนั้น HCl จะทำปฏิกิริยาเคมีกับผงอะลูมิเนียม และเกิดปฏิกิริยาตามสมการ



จากนั้น $\text{AlCl}_3_{(g)}$ ที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับพื้นของวัสดุเนื้อพื้น โดย $\text{AlCl}_3_{(g)}$ จะสลายตัวได้ Al และจากนั้น Al จะแพร่เข้าไปที่ผิวของวัสดุเนื้อพื้น ตามสมการ

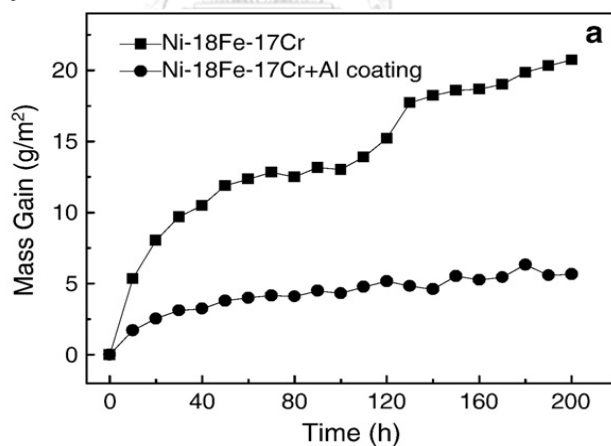


ในกรณีของการทำอะลูมิเนียมในเชิงแบบผงบน Iron base superalloys อะลูมิเนียมที่แพร่เข้าสู่ผิว จะทำปฏิกิริยากับเนื้อวัสดุได้ชั้นเคลือบที่ประกอบด้วยเฟสต่างๆ เช่น Ni_2Al_3 , CrAl_5 , และ Fe_2Al_5

จากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวจากขั้นตอนที่ 1 มาอบเป็นเนื้อเดียวกัน (heat treatment) เพื่อเปลี่ยนเฟสของชั้นเคลือบ

2.5 ความต้านทานการเกิดออกซิเดชัน

จากการศึกษาของ Zhaolin Zhan[7] และคณะ ได้ทำการเคลือบผิว Ni-18Fe-17Cr ด้วยวิธี low temperature pack aluminizing โดยใช้อุณหภูมิ 540 ถึง 600 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราส่วนของ pack mixture Al powder 10-30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก Al_2O_3 60-80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ NH_4Cl 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีน้ำหนักรวม 40 กรัม และนำชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบมาทำการวิธีทางความร้อนที่ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และทดสอบความต้านทานการเกิดออกซิเดชัน ที่ 1000 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลาต่างๆ ผลการทดลองพบว่าความหนาของชั้นเคลือบเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ทำอะลูมิเนียมแบบผง ชั้นเคลือบปรากฏเป็น 2 ชั้น โดยชั้นเคลือบด้านนอกจะมี $NiAl_3$ เป็นเฟสหลัก มี $CrAl_5$ และ Fe_2Al_5 เล็กน้อย มีความหนาประมาณ 5 ไมครอน ส่วนชั้นเคลือบด้านในจะเป็นชั้นที่มีเกรนแบบ homogeneous equiaxial grain ที่มีเฟสหลักเป็น Al-rich ($NiAl_3$) มีความหนา 20 ไมครอน ผลการทดสอบความต้านทานการเกิดออกซิเดชันพบว่า ชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบมีการสูญเสียเนื้อวัสดุน้อยกว่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านการเคลือบอย่างชัดเจน



รูปที่ 2.7 การทดสอบออกซิเดชันของชิ้นงานที่ผ่านและไม่ผ่านการเคลือบ ที่ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 200 ชั่วโมง [7]

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. โลหะผสม Incoloy 825
2. ผงอะลูมิเนียม (Al)
3. ผงอะลูมินา (Al_2O_3)
4. ผงแอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl)
5. กระดาษทรายเบอร์ 80, 120, 400, 600, 800, 1000, 2500, 4000
6. แก๊สอาร์กอน (Ar)
7. Resin
8. ลวดเหล็กกล้าไร้สนิม
9. ผงขัดชิ้นงานแบบอะลูมินา

3.2 เครื่องมือการทดลอง

1. เครื่องตัด
2. เครื่องขัด Turn table grinder
3. เครื่องซังน้ำหนักดิจิตอล
4. ถ้วยอะลูมินา
5. กล้องจุลทรรศน์แสง (optical microscope, OM)
6. เครื่อง X-ray diffractometer (XRD)
7. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning electron microscope, SEM)
8. เตา

3.3 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดสอบ

1. ตัดโลหะผสม Incoloy 825 ให้มีขนาด $10 \times 10 \times 2.5 \text{ mm}^3$
2. ขัดผิวชิ้นงานกระดาษทรายเบอร์ 80, 120, 400, 600, 800, 1000, 2500, 4000
3. ทำความสะอาดชิ้นงานและจัดเก็บไว้ในภาชนะ

3.4 ขั้นตอนการเคลือบผิว

1. เตรียมผงแอมโมเนียมคลอไรด์ 1 กรัม, ผงอะลูมิเนียม 3 กรัม และผงอะลูมินา 16 กรัม อัตราส่วน $\text{NH}_4\text{Cl} : \text{Al} : \text{Al}_2\text{O}_3$ หรือเทียบเท่ากับ 5: 15 : 80 ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล
2. ผสมผงแอมโมเนียมคลอไรด์ ผงอะลูมิเนียม และผงอะลูมินา ลงในถ้วยอะลูมินา ประมาณ 2ใน3ส่วน และอัดให้แน่น
3. นำชิ้นงานโลหะผสม Incoloy 825 ที่เตรียมไว้วางลงไปถ้วยอะลูมินา และนำผงที่ผสมจากข้อ 2 กลบชิ้นงานและอัดให้แน่น
4. นำผงอะลูมินาทับอีกชั้น และอัดให้แน่น เพื่อป้องกันการการเผาผนึก
5. ปิดฝาถ้วยอะลูมินา และใช้ลวดสเหล็กกล้าไร้สนิมพันรอบถ้วย
6. นำถ้วยอะลูมินาไปวางในเตาและใช้ถ้วยอะลูมินาขนาดใหญ่ครอบไว้และใช้แก๊สอาร์กอนในการควบคุมบรรยากาศ
7. ตั้งค่าอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการเคลือบตามเงื่อนไขการทดลองตามตารางที่ 3.1 โดยใช้ อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที
8. ปลดชิ้นงานให้เย็นตัวในเตา จากนั้นนำชิ้นงานไปวิเคราะห์

ตารางที่ 3.1 แสดงอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการทดลอง

การทดลองที่	อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง (องศาเซลเซียส)	เวลาที่ใช้ในการทดลอง (ชั่วโมง)
1	700	1
2	700	2.25
3	700	4
4	700	6.25
5	800	1
6	800	2.25
7	800	4
8	800	6.25
9	900	1
10	900	2.25
11	900	4
12	900	6.25

3.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์ชิ้นงานการทดลอง

1. นำชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวมาตัดด้วยเครื่องตัด ตามแนวขวาง (cross section) และนำไปขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 80, 120, 400, 600, 800, 1000, 2500, 4000 ตามลำดับ
2. นำชิ้นงานที่ผ่านการขัดด้วยกระดาษทรายมาขัดด้วย ผงขัดชิ้นงานแบบอะลูมินาบนผ้าสักหลาด จนได้ผิวที่ใสคล้ายกระจกเงา
3. ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง (optical microscope)
4. วิเคราะห์เฟสของสารประกอบที่ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (XRD)
5. วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ Scanning electron microscope (SEM)
6. วิเคราะห์ความหนาและอัตราการเกิดชั้นเคลือบ

3.6 ขั้นตอนการทดสอบความแข็งของชั้นเคลือบ

1. นำชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวมาตัดด้วยเครื่องตัด ตามแนวขวาง (cross section) และนำไปขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 80, 120, 400, 600, 800, 1000, 2500, 4000 ตามลำดับ
2. นำชิ้นงานที่ผ่านการขัดด้วยกระดาษทรายมาขัดด้วย ผงขัดชิ้นงานแบบอะลูมินาบนผ้าสักหลาด จนได้ผิวที่ใสคล้ายกระจกเงา

3.7 ขั้นตอนการทดสอบความต้านทานการเกิดออกซิเดชัน

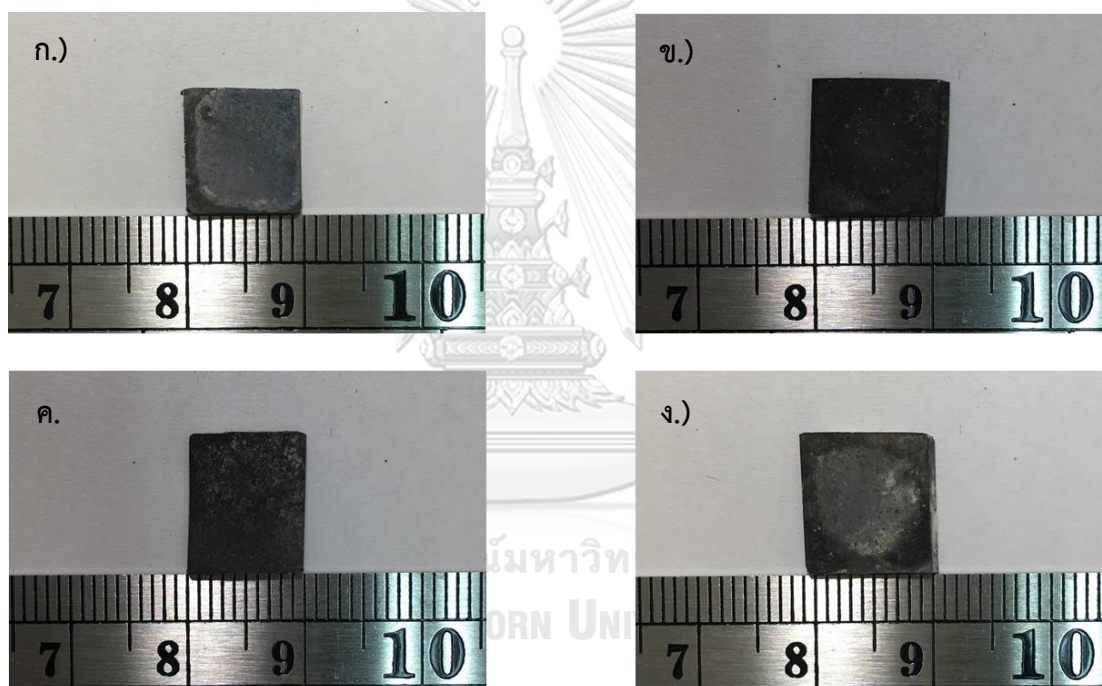
1. นำชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบมาชั่งน้ำหนักชิ้นงานและบันทึกไว้
2. นำชิ้นงานเข้าเตาอบเพื่อทดสอบการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง โดยจะทำการทดลองรวม 50 ชั่วโมง
3. นำชิ้นงานมาชั่งน้ำหนัก และจดค่าน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป ทุกครั้งหลังจบการทดลอง

บทที่ 4

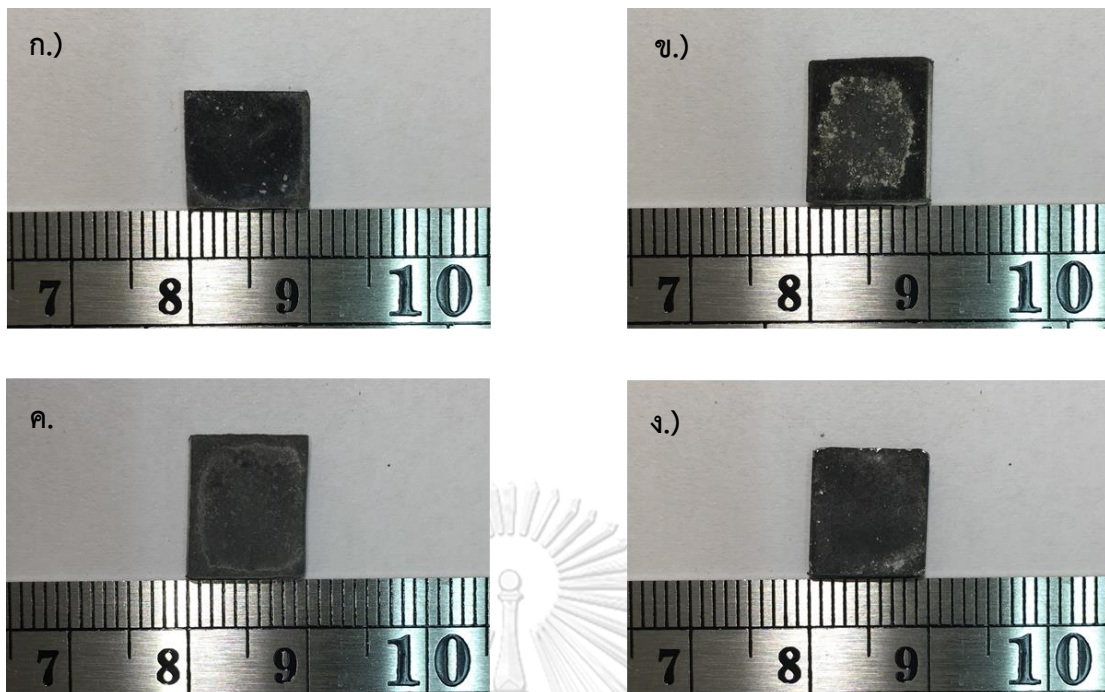
ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการตรวจสอบรูปร่างภายนอกของชิ้นงานหลังจากกระบวนการอะลูมิเนียมในเชิงแบบผง

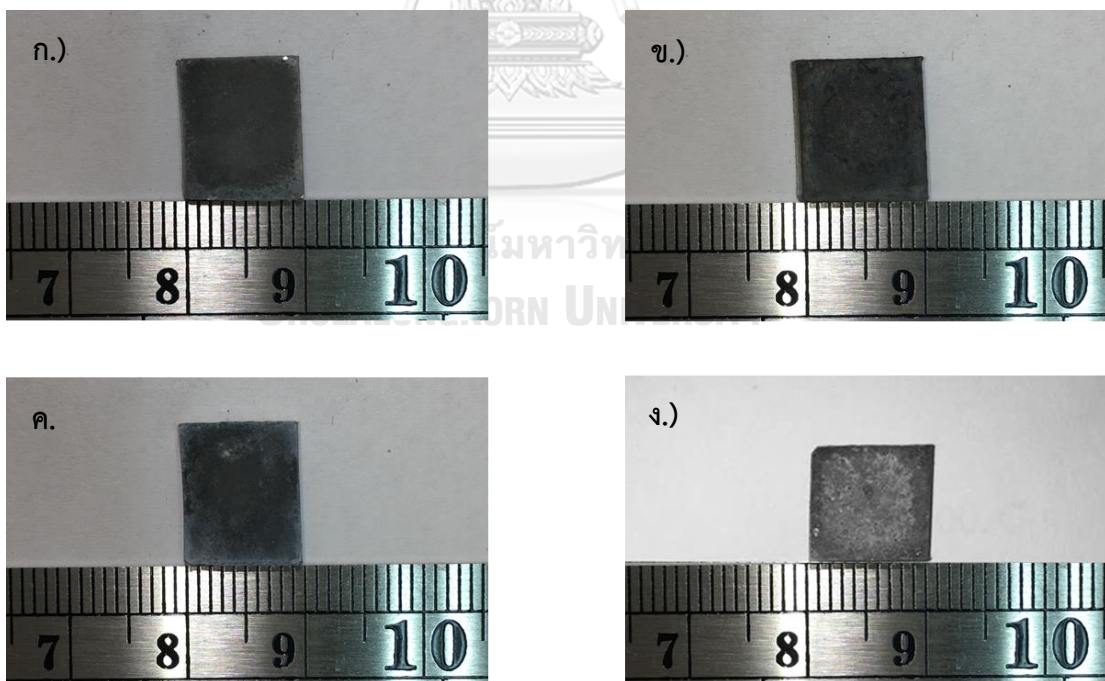
จากการทำอะลูมิเนียมในเชิงแบบผงบนโลหะผสม Incoloy 825 ที่อุณหภูมิ 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 2.25 4 และ 6.25 ชั่วโมง พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวไม่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นงานตามรูปที่ 4.1 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ ทำให้ทราบว่า การเพิ่มอุณหภูมิ และเวลาในการเคลือบในช่วงดังกล่าว จะไม่ส่งผลให้ชิ้นเคลือบแตกและหลุดร่อน



รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายชิ้นงาน Incoloy 825 ที่ผ่านกระบวนการอะลูมิเนียมในเชิงแบบผงที่ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา ก.) 1 ชั่วโมง ข.) 2.25 ชั่วโมง ค.) 4 ชั่วโมง ง.) 6.25 ชั่วโมง



รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายชิ้นงาน Incoloy 825 ที่ผ่านกระบวนการอะโนไดซิงแบบผงที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา ก.) 1 ชั่วโมง ข.) 2.25 ชั่วโมง ค.) 4 ชั่วโมง ง.) 6.25 ชั่วโมง

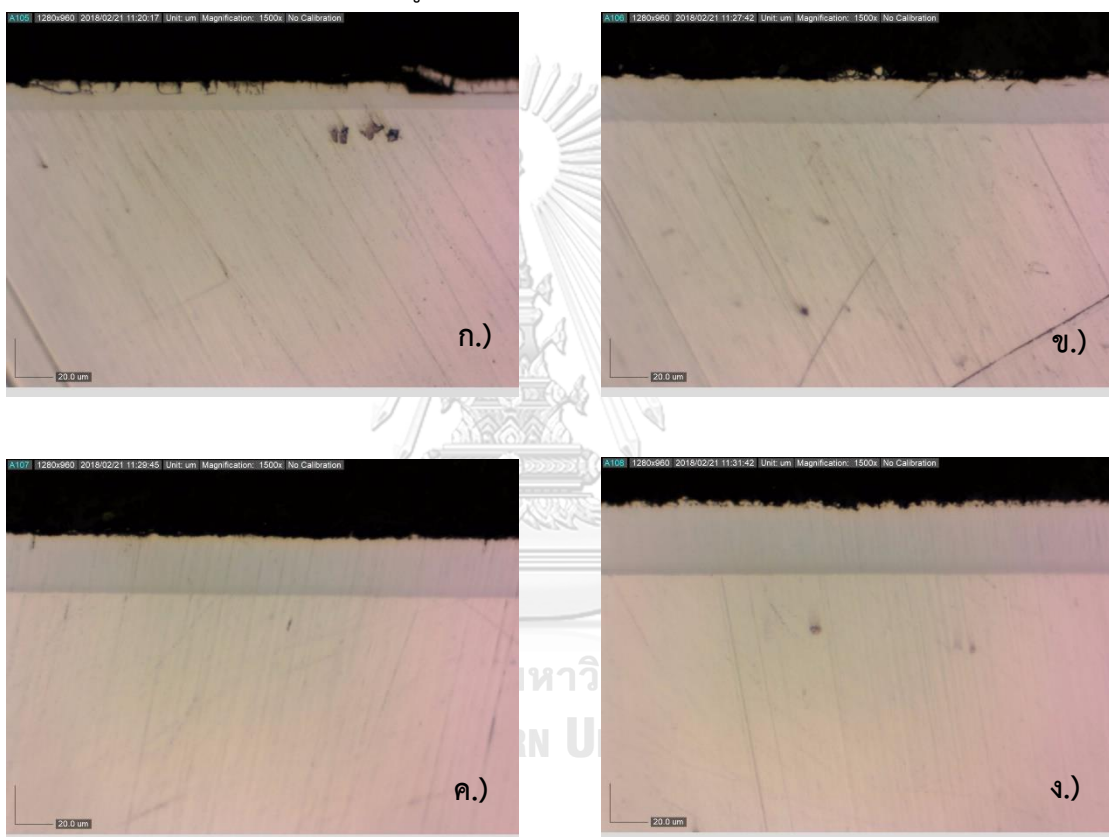


รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายชิ้นงาน Incoloy 825 ที่ผ่านกระบวนการอะโนไดซิงแบบผงที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา ก.) 1 ชั่วโมง ข.) 2.25 ชั่วโมง ค.) 4 ชั่วโมง ง.) 6.25 ชั่วโมง

4.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังจากกระบวนการอะลูมิเนียมในเชิงแบบผง

4.2.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ 700 องศาเซลเซียส

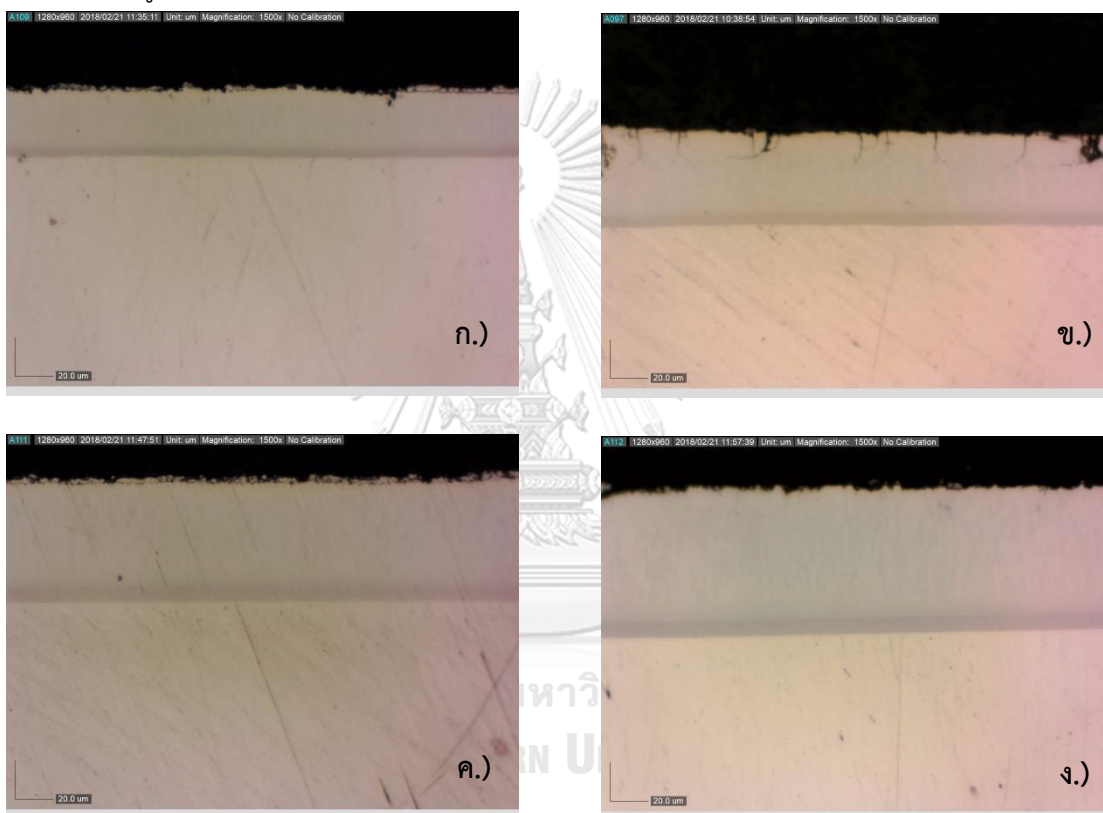
เมื่อนำโลหะผสม Incoloy 825 ที่ผ่านกระบวนการอะลูมิเนียมในเชิงแบบผงที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 2.25 4 และ 6.25 ชั่วโมง มาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวางด้วย กล้องจุลทรรศน์แบบแสง พบว่าลักษณะของชั้นเคลือบจะแบ่งเป็น 2 ชั้น โดยชั้นเคลือบด้านนอก (outer layer) จะมีความหนาแน่นมากกว่าชั้นเคลือบด้านใน (inner layer) และจะสังเกตเห็นได้ว่าชั้นเคลือบด้านนอกจะมีสีอ่อนกว่าชั้นเคลือบด้านใน ตามรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวางชิ้นงาน Incoloy 825 ที่ผ่านกระบวนการอะลูมิเนียมในเชิงแบบผงที่ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา ก.)1 ชั่วโมง ข.)2.25 ชั่วโมง ค.)4 ชั่วโมง ง.)6.25 ชั่วโมง

4.2.2 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ 800 องศาเซลเซียส

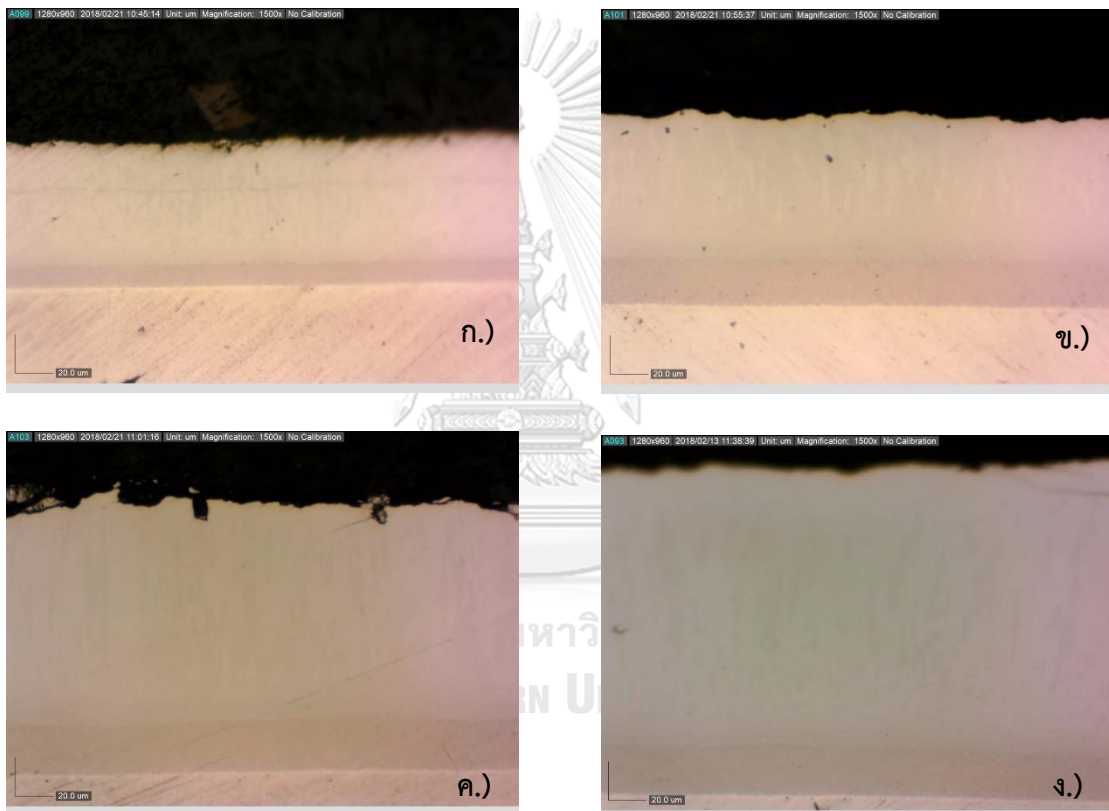
เมื่อนำโลหะผสม Incoloy 825 ที่ผ่านกระบวนการอะลูมิเนียมไนซิงแบบผงที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 2.25 4 และ 6.25 ชั่วโมง มาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวางด้วย กล้องจุลทรรศน์แบบแสง พบว่าลักษณะของชั้นเคลือบจะแบ่งเป็น 2 ชั้น โดยชั้นเคลือบด้านนอกจะมีความหนามากกว่าชั้นเคลือบด้านในและจะสังเกตเห็นได้ว่าชั้นเคลือบด้านนอกจะมีสีอ่อนกว่าชั้นเคลือบด้านใน เมื่อพิจารณาความหนาของชั้นเคลือบ จะเห็นได้ว่าความหนาจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาที่ใช้ในการเคลือบเพิ่มขึ้น ตามรูปที่ 4.5



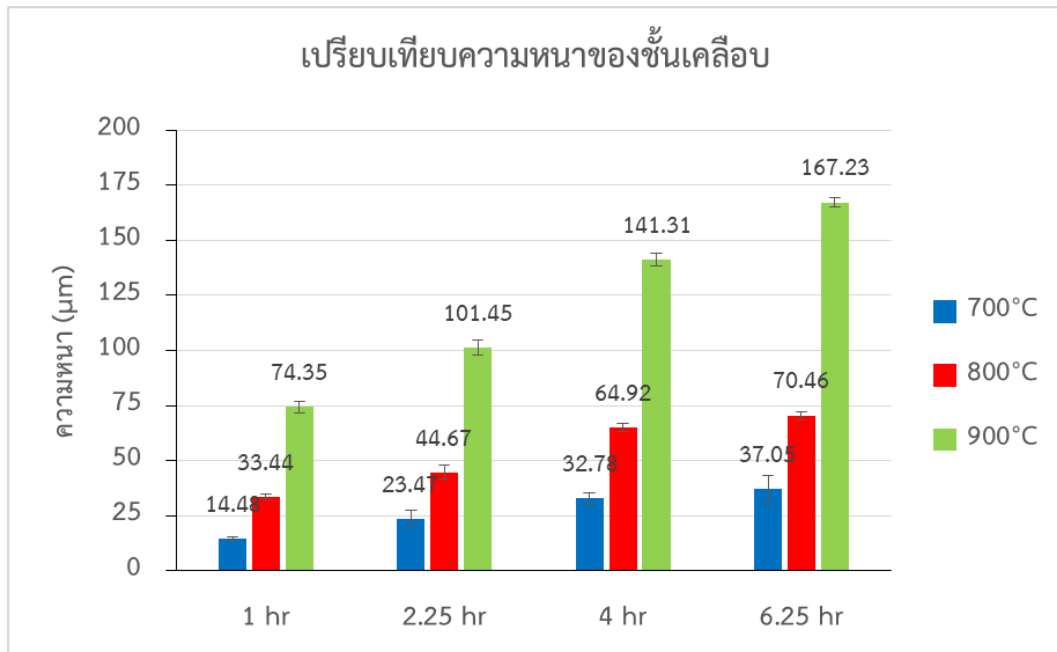
รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวางชิ้นงาน Incoloy 825 ที่ผ่านกระบวนการอะลูมิเนียมไนซิงแบบผงที่ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา ก.)1 ชั่วโมง ข.)2.25 ชั่วโมง ค.)4 ชั่วโมง ง.)6.25 ชั่วโมง

4.2.3 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ 900 องศาเซลเซียส

เมื่อนำโลหะผสม Incoloy 825 ที่ผ่านกระบวนการอะลูมิเนียมไนซิงแบบผงที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 2.25 4 และ 6.25 ชั่วโมง มาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวางด้วย กล้องจุลทรรศน์แบบแสง พบว่าลักษณะของชั้นเคลือบจะแบ่งเป็น 2 ชั้นโดยชั้นเคลือบด้านนอกจะมีความหนามากกว่าชั้นเคลือบด้านในและจะสังเกตเห็นได้ว่าชั้นเคลือบด้านนอกจะมีสีอ่อนกว่าชั้นเคลือบด้านในเมื่อเปรียบเทียบความหนาของชั้นเคลือบกับชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบที่อุณหภูมิ 700 และ 800 องศาเซลเซียส จะพบว่าการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสจะมีความหนาของชั้นเคลือบมากที่สุดตามรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวางชิ้นงาน Incoloy 825 ที่ผ่านกระบวนการอะลูมิเนียมไนซิงแบบผงที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา ก.)1 ชั่วโมง ข.)2.25 ชั่วโมง ค.)4 ชั่วโมง ง.)6.25 ชั่วโมง

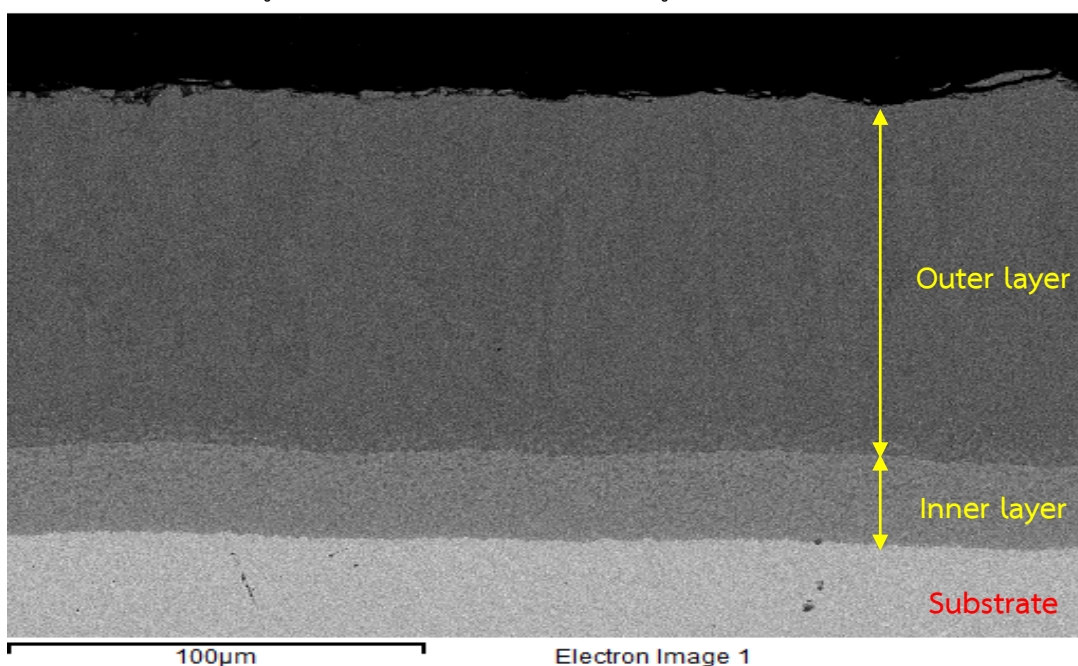


รูปที่ 4.7 กราฟเปรียบเทียบความหนาเฉลี่ยของชั้นเคลือบบนโลหะผสม Incoloy 825 ที่ผ่านกระบวนการอะลูมิเนียมในเชิงแบบผง

จากรูปที่ 4.7 เมื่อพิจารณาความหนาเฉลี่ยของชั้นเคลือบบนโลหะผสม Incoloy 825 ที่ผ่านกระบวนการอะลูมิเนียมในเชิงแบบผง จะเห็นว่าความหนาเฉลี่ยของชั้นเคลือบ จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิวเพิ่มขึ้น

4.3 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบด้วย Scanning electron microscope (SEM)

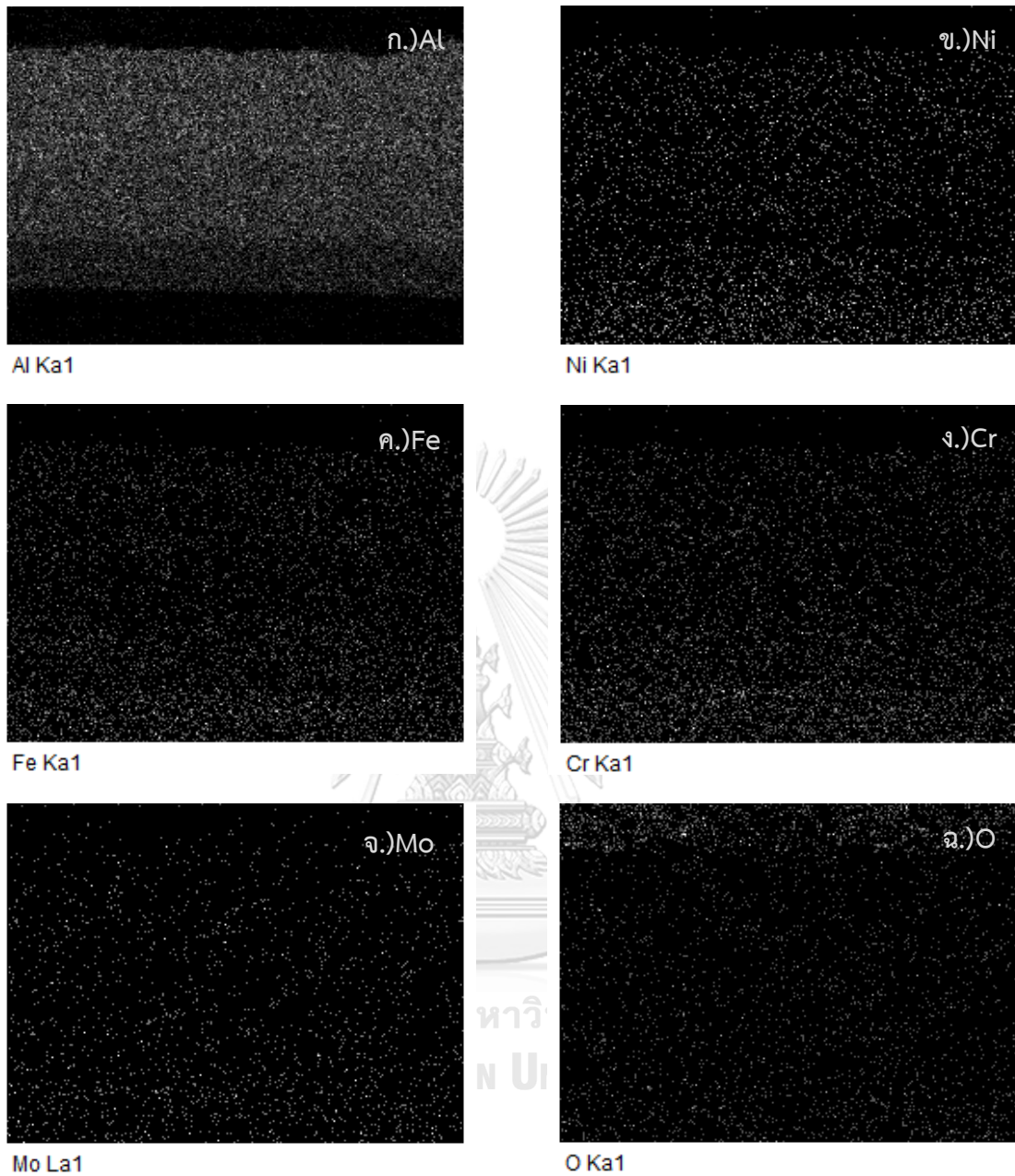
เมื่อนำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอะลูมิเนียมในเชิงแบบผงมาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วย SEM ผลการตรวจสอบพบว่าลักษณะของชั้นเคลือบแบ่งออกเป็น 2 ชั้นอย่างชัดเจน โดยชั้นเคลือบที่อยู่ด้านนอกจะมีสีเทาเข้ม และชั้นเคลือบที่อยู่ด้านในจะมีสีเทาอ่อน หมายความว่าชั้นเคลือบด้านนอก (สีเทาเข้ม) จะมีปริมาณของนิกเกิลและเหล็กน้อยกว่าชั้นเคลือบด้านใน (สีเทาอ่อน) ในขณะที่ชั้นเคลือบด้านนอกจะมีปริมาณของอะลูมิเนียมเนี่ยมมากกว่าชั้นเคลือบด้านใน ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แสดงภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคด้วย SEM ของชิ้นงาน Incoloy 825

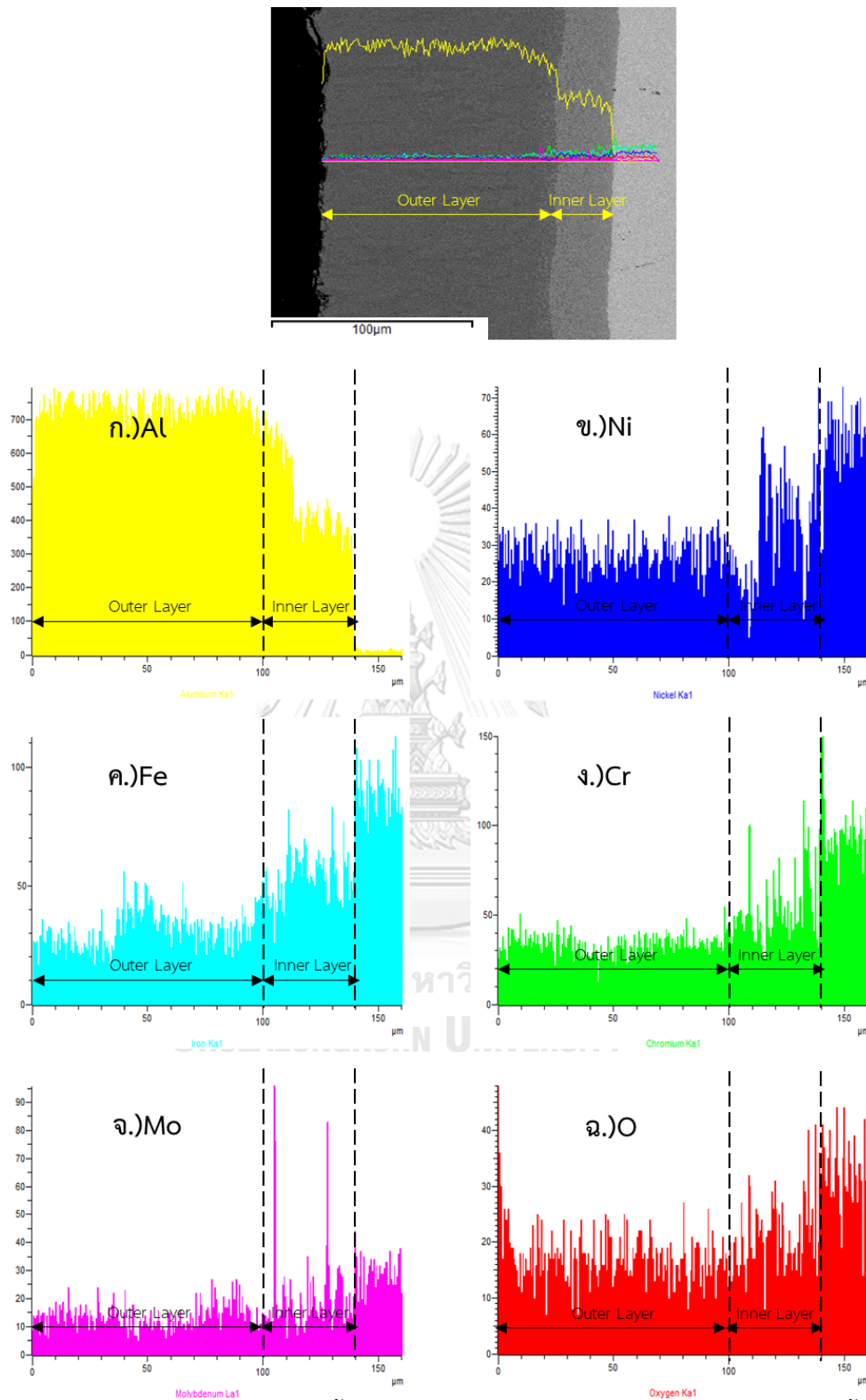
ที่ผ่านกระบวนการอะลูมิเนียมในเชิงแบบผงที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

จากนั้นทำการตรวจสอบด้วยวิธี energy dispersive x-ray spectrometry (EDS) แสดงผลแบบ mapping จะแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของธาตุต่างๆในชั้นเคลือบทั้งสองชั้น โดยจะพบว่าชั้นเคลือบด้านนอกมีปริมาณของอะลูมิเนียมเนี่ยมสูงกว่าชั้นเคลือบด้านใน ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.9 รูปแสดงผลการตรวจสอบชั้นเคลือบด้วยวิธี EDS แสดงผลแบบ mapping ของชิ้นงาน Incoloy 825 ที่ผ่านกระบวนการอะลูมิเนียมในเชิงแบบผงที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
 ก.)อะลูมิเนียม ข.)นิกเกิล ค.)เหล็ก ง.)โครเมียม จ.)โมลิบดีนัม และ ฉ.)ออกซิเจน

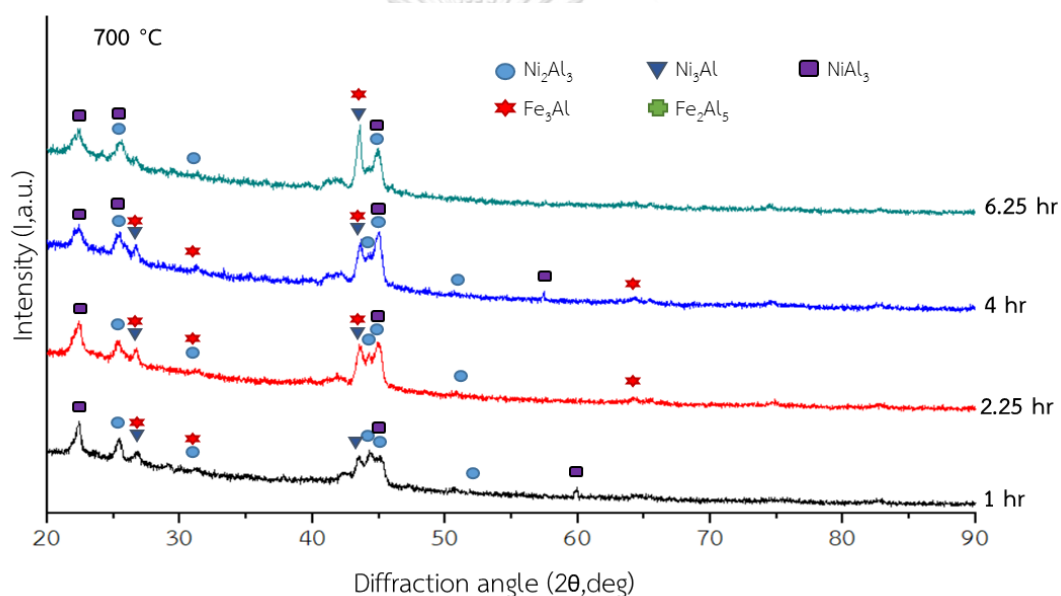
จากนั้นทำการตรวจสอบด้วยวิธี energy dispersive x-ray spectrometry (EDS) แสดงผลแบบ line scan ได้ผลเช่นเดียวกันคือ ชั้นเคลือบด้านนอกมีปริมาณอะลูมิเนียมสูงกว่าด้านใน มีการกระจายตัวของโครเมียมบริเวณ interlayer ระหว่างชั้นเคลือบด้านในกับเนื้อวัสดุ ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 รูปแสดงผลการตรวจสอบชั้นเคลือบด้วยวิธี EDS แสดงผลแบบ line scan ของชิ้นงาน Incoloy 825 ที่ผ่านกระบวนการอะลูมิเนียมไนซิงแบบผงที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
 ก.)อะลูมิเนียม ข.)นิกเกิล ค.)เหล็ก ง.)โครเมียม จ.)โมลิบดีนัม และ ฉ.)ออกซิเจน

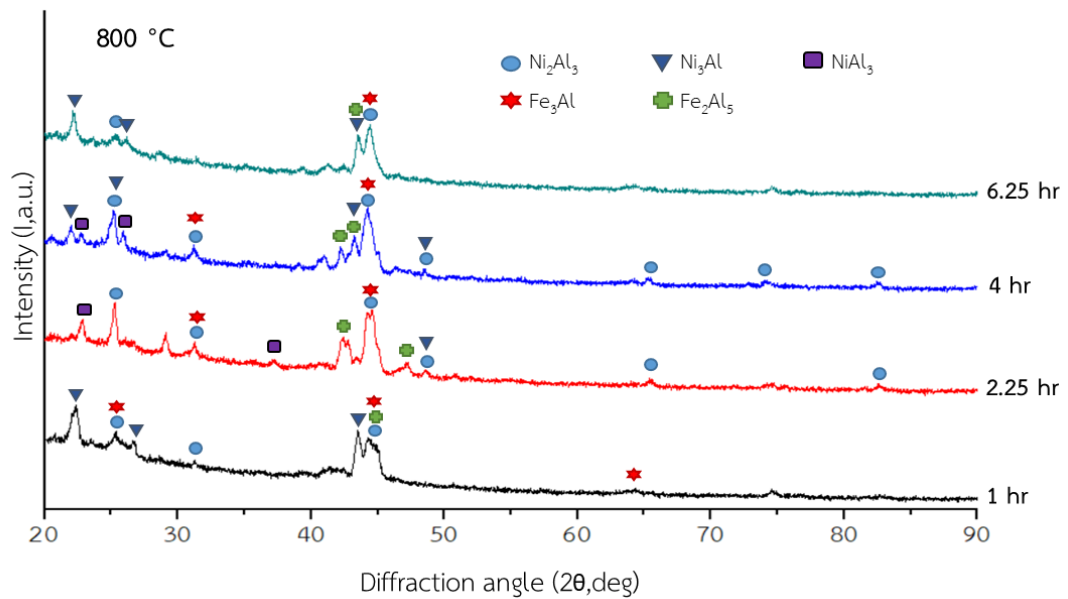
จากการตรวจสอบขนาดและรูปร่างภายนอกพบว่า ไม่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของชั้นงาน การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วย OM และ SEM จะพบว่าชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นจะแบ่งออกเป็น 2 ชั้นอย่างชัดเจนและไม่พบลักษณะของ Kirkendall's effect ทำให้ทราบว่า การทดลองนี้เป็นกลไกแบบ high-activity aluminizing ความหนาของชั้นงานจะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้อุณหภูมิและเวลาในการเคลือบเพิ่มขึ้น และชั้นเคลือบทั้ง 2 ชั้นแสดงสีที่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาผลจาก EDS จะพบว่ามีกระจายตัวของธาตุต่างๆแตกต่างกันบริเวณชั้นเคลือบทั้ง 2 ชั้น โดยชั้นเคลือบด้านนอกจะมีปริมาณของอะลูมิเนียมมากกว่าชั้นเคลือบด้านใน

4.4 ผลการตรวจสอบเฟสของชั้นเคลือบด้วย X-ray diffractometer (XRD)

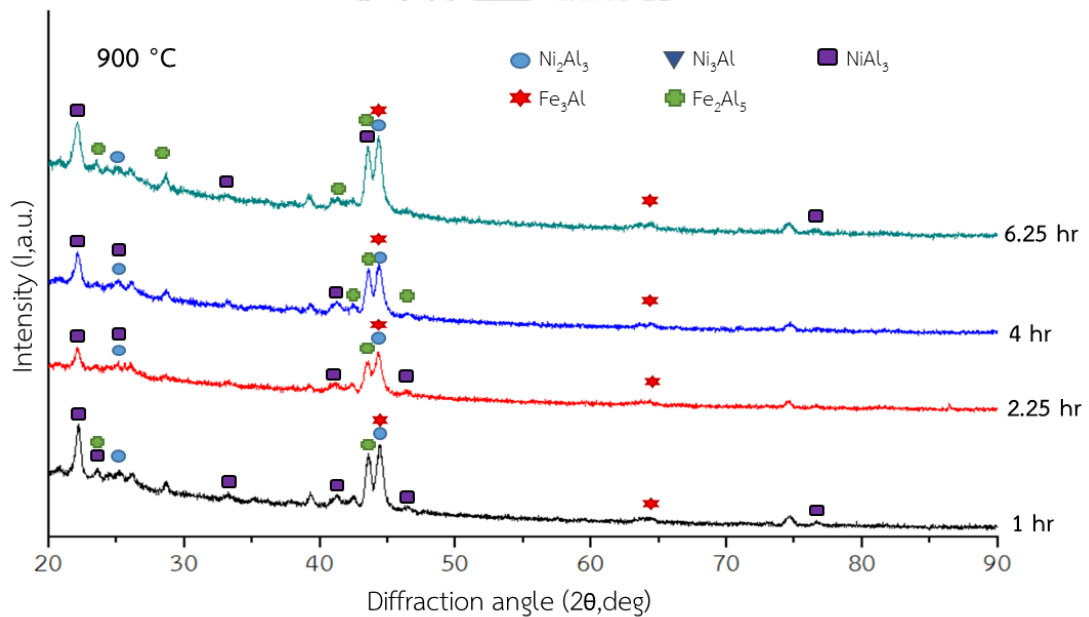


รูปที่ 4.11 กราฟแสดงผล XRD ของชั้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวที่ 700 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.11 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบของโลหะผสม Incoloy 825 ที่ผ่านกระบวนการอะลูมิเนียมในเชิงแบบผง ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 2.25 4 และ 6.25 ชั่วโมง ด้วย XRD พบว่าเกิดพีคของเฟส Ni_2Al_3 Ni_3Al NiAl_3 และ Fe_3Al โดยมีพีคของ Ni_3Al และ Fe_3Al สูงขึ้นเมื่อใช้เวลานานในการเคลือบเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงผล XRD ของชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวที่ 800 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงผล XRD ของชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวที่ 900 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.12 และ 4.13 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบของโลหะผสม Incoloy 825 ที่ผ่านกระบวนการอะลูมิเนียมไนซิงแบบผง ที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 2.25 4 และ 6.25 ชั่วโมง ด้วย XRD พบว่าเกิดฟิสิกของเฟส Ni_2Al_3 Ni_3Al NiAl_3 Fe_3Al และ Fe_2Al_5 เมื่อเพิ่มเวลาการเคลือบผิว กราฟยังคงมีลักษณะใกล้เคียงกัน โดยฟิสิกที่มีความเข้มสัมพัทธ์สูงที่สุดคือ Ni_2Al_3

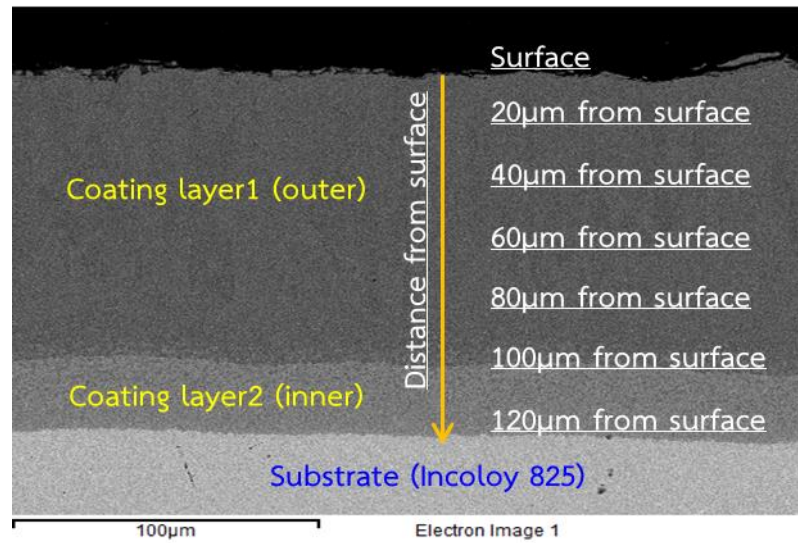
ทำการเปรียบเทียบผลของเวลาที่ส่งผลต่อเฟสของชั้นเคลือบของโลหะผสม Incoloy 825 ที่ผ่านกระบวนการอะลูมิเนียมไนซิง แบบผง ที่อุณหภูมิ 700, 800 และ 900 องศาเซลเซียส ด้วยวิธี XRD พบว่าพีคที่เกิดขึ้นเป็นสารประกอบอะลูมิเนียมไนต์ของนิกเกิล และสารประกอบอะลูมิเนียมไนต์ของเหล็ก ตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงเฟสของสารประกอบที่เกิดขึ้นจากการบวนการอะลูมิเนียมไนซิงแบบผง

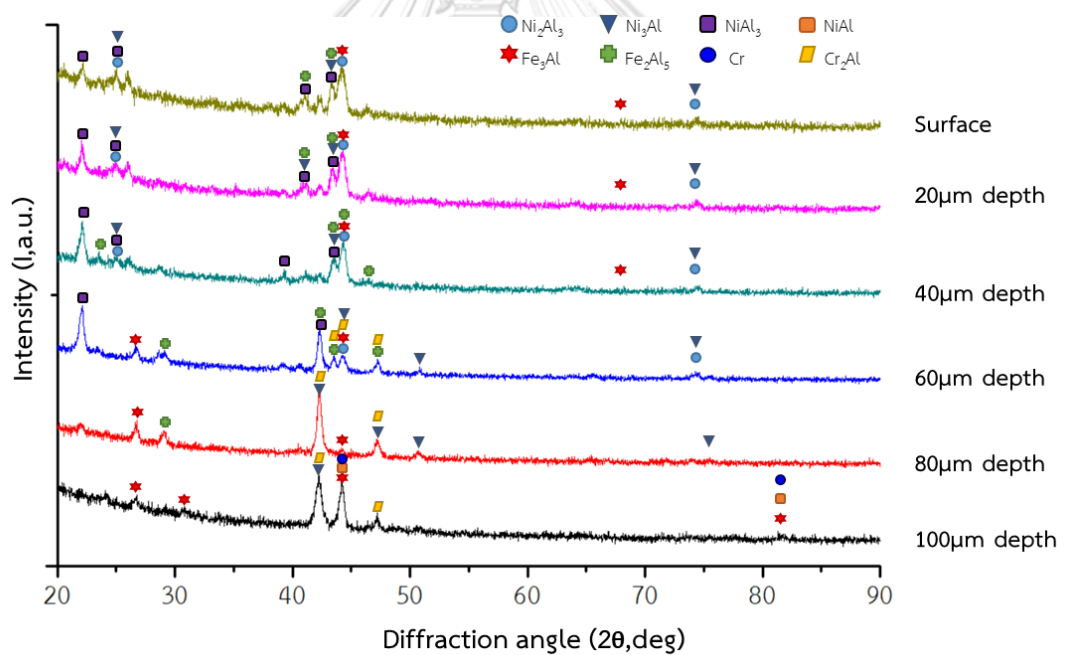
อุณหภูมิ	1 ชั่วโมง	2.25 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง	6.25 ชั่วโมง
700°C	Ni ₂ Al ₃	Ni ₂ Al ₃	Ni ₂ Al ₃	Ni ₂ Al ₃
	Ni ₃ Al	Ni ₃ Al	Ni ₃ Al	Ni ₃ Al
	NiAl ₃	NiAl ₃	NiAl ₃	NiAl ₃
	Fe ₃ Al	Fe ₃ Al	Fe ₃ Al	Fe ₃ Al
800°C	Ni ₂ Al ₃	Ni ₂ Al ₃	Ni ₂ Al ₃	Ni ₂ Al ₃
	Ni ₃ Al	Ni ₃ Al	Ni ₃ Al	Ni ₃ Al
	Fe ₃ Al	NiAl ₃	NiAl ₃	Fe ₃ Al
	Fe ₂ Al ₅	Fe ₃ Al	Fe ₃ Al	Fe ₂ Al ₅
		Fe ₂ Al ₅	Fe ₂ Al ₅	
900°C	Ni ₂ Al ₃	Ni ₂ Al ₃	Ni ₂ Al ₃	Ni ₂ Al ₃
	Ni ₃ Al	Ni ₃ Al	Ni ₃ Al	Ni ₃ Al
	NiAl ₃	NiAl ₃	NiAl ₃	NiAl ₃
	Fe ₃ Al	Fe ₃ Al	Fe ₃ Al	Fe ₃ Al
	Fe ₂ Al ₅	Fe ₂ Al ₅	Fe ₂ Al ₅	Fe ₂ Al ₅

หมายเหตุ ตัวหนาหมายถึงเฟสสารประกอบหลักที่เกิดขึ้นในการทดลองตามอุณหภูมิและเวลานั้น

จากนั้นทำการการขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ 4000 เพื่อขัดผิวออกทีละ 20µm และนำไปตรวจสอบเฟสด้วยวิธี XRD เพื่อวิเคราะห์เฟสเริ่มจากบริเวณผิวของชิ้นงาน ชั้นเคลือบด้านนอก ชั้นเคลือบด้านใน จนถึงบริเวณ interlayer ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอะลูมิเนียมไนซิงแบบผงที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง



รูปที่ 4.14 แสดงตำแหน่งที่ทำการ XRD ของชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง



รูปที่ 4.15 แสดงผล XRD ที่ความลึกจากผิวที่ต่างกันของชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.14 และ 4.15 กราฟแสดงผล XRD บริเวณที่ผิว บริเวณที่ลึกจากผิว 20 ไมครอน จนถึงบริเวณที่ลึกจากผิว 40 ไมครอน พบพีคของเฟส Ni_2Al_3 Ni_3Al $NiAl_3$ Fe_3Al และ Fe_2Al_5 โดยมีเฟสหลักคือ Ni_2Al_3 และ $NiAl_3$

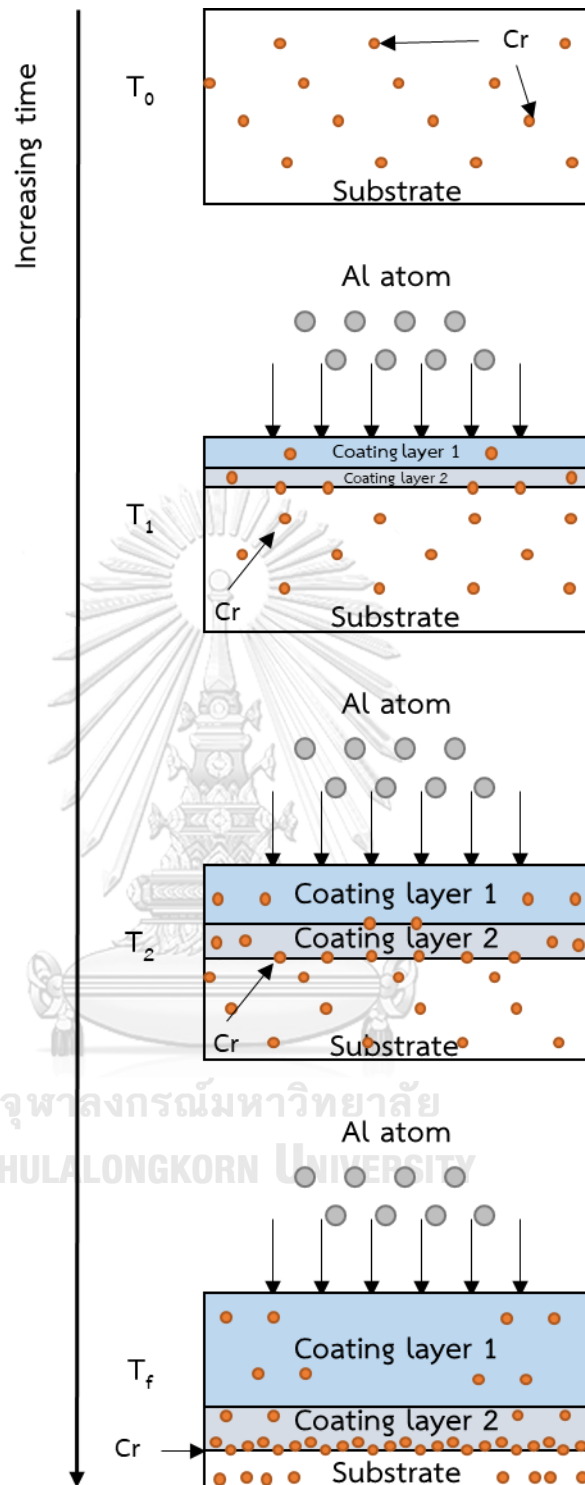
บริเวณที่สึกจากผิว 60 ไมครอน พบพิกของเฟส Ni_2Al_3 Ni_3Al NiAl_3 , Fe_3Al Fe_2Al_5 และ Cr_2Al โดยมีเฟสหลักคือ NiAl_3 และ Fe_2Al_5

บริเวณที่สึกจากผิว 80 ไมครอน พบพิกของเฟส Ni_3Al Fe_3Al Cr_2Al และ Fe_2Al_5 โดยมีเฟสหลักคือ Ni_3Al และ Cr_2Al

บริเวณที่สึกจากผิว 100 ไมครอน เกิดพิกของเฟส Ni_3Al Fe_3Al Cr_2Al NiAl และยังพบเฟสอะตอมของโครเมียม โดยมีเฟสหลักคือ Fe_3Al

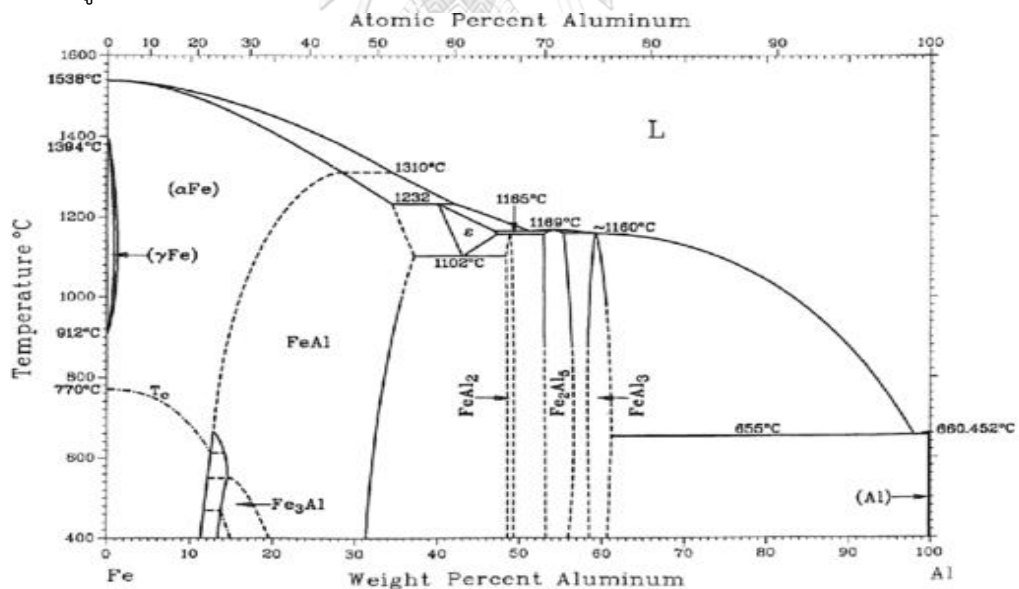
เมื่อพิจารณาภาพถ่าย SEM และผลการวิเคราะห์เฟสด้วยวิธีการ XRD จะสามารถสรุปได้ว่า ชิ้นงานโลหะผสม Incoloy 825 ที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยวิธีอะลูมิเนียมในเชิงแบบผงที่อุณหภูมิ 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 2.25 4 และ 6.25 ชั่วโมง ชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นจะสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชั้นได้อย่างชัดเจน โดยชั้นเคลือบด้านนอกจะมี Ni_2Al_3 NiAl_3 และ Fe_2Al_5 เป็นเฟสหลัก และชั้นเคลือบด้านในจะมี Ni_3Al และ Fe_3Al เป็นเฟสหลัก เมื่อพิจารณาจากข้อมูลของ XRD จึงได้ทำการจำลองกลไกการเกิดขึ้นเคลือบของกระบวนการอะลูมิเนียมในเชิงแบบผงดังรูปที่ 4.16



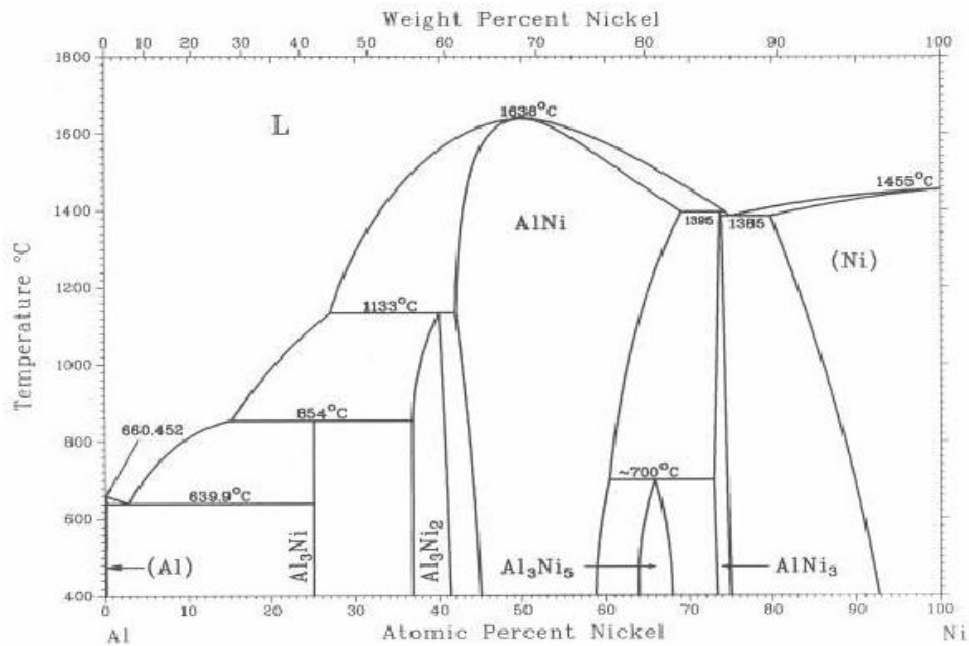


รูปที่ 4.16 แบบจำลองกลไกการเกิดขึ้นเคลือบของกระบวนการอะลูมิเนียมเชิงแบบผง

จากรูปที่ 4.16 ในช่วงแรกของกระบวนการ (T_1) กระบวนการอะลูมิเนียมไนซิง แบบผงจะทำให้ อะลูมิเนียมแพร่เข้าสู่ผิวของวัสดุพื้น จากการศึกษางานวิจัยพบว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อการแพร่ของ อะลูมิเนียมคือ อุณหภูมิและเวลา จากข้อมูล EDS แบบ line scan พบว่าบริเวณผิวของเนื้อวัสดุจะมี ปริมาณอะลูมิเนียมสูงที่สุด ชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นจากการบวกรวมการอะลูมิเนียมไนซิงแบบผงแบ่งออกเป็น 2 ชั้น คือชั้นเคลือบด้านนอก (coating layer 1) และชั้นเคลือบด้านใน (coating layer 2) โดยชั้นเคลือบ แต่ละชั้นจะมีเฟสของสารประกอบแตกต่างกันตามปริมาณของอะลูมิเนียม โดยชั้นเคลือบด้านนอกจะ มีปริมาณของอะลูมิเนียมสูงกว่าชั้นเคลือบด้านใน และชั้นเคลือบด้านนอกยังมีความหนาหนามากกว่าอย่าง เห็นได้ชัด เมื่อใช้เวลาในการเคลือบเพิ่มขึ้น จะพบว่าชั้นเคลือบทั้งสองชั้นจะมีความหนาเพิ่มขึ้น เฟส ของสารประกอบอะลูมิเนียมไนต์ที่เกิดจากการบวกรวมการอะลูมิเนียมไนซิงแบบผงคือ นิกเกิลอะลูมิเนียมไนต์และเหล็ก อะลูมิเนียมไนต์ ในทดลองที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส จะพบเฟสของ Ni_3Al และ Fe_3Al เป็นเฟสหลัก เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการทดลองเป็น 800 และ 900 องศาเซลเซียส จะพบเฟสของ Ni_2Al_3 , $NiAl_3$ และ Fe_2Al_5 เป็นเฟสหลัก พิจารณาจากแผนภูมิสมดุลของเหล็กและอะลูมิเนียมตามรูปที่ 4.17 และ แผนภูมิสมดุลของนิกเกิลและอะลูมิเนียมตามรูปที่ 4.18 สามารถอธิบายได้ว่าการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ อะลูมิเนียมสามารถแพร่เข้าสู่ชิ้นงานได้มากขึ้น ทำให้เกิดเฟสของสารประกอบที่มีปริมาณของ อะลูมิเนียมสูง

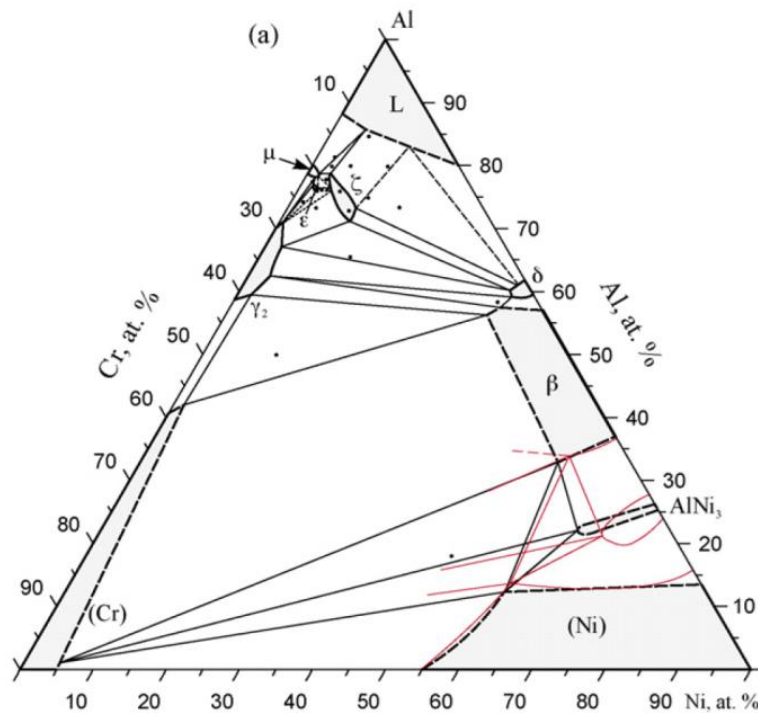


รูปที่ 4.17 แผนภูมิสมดุลของเหล็กและอะลูมิเนียม [6]

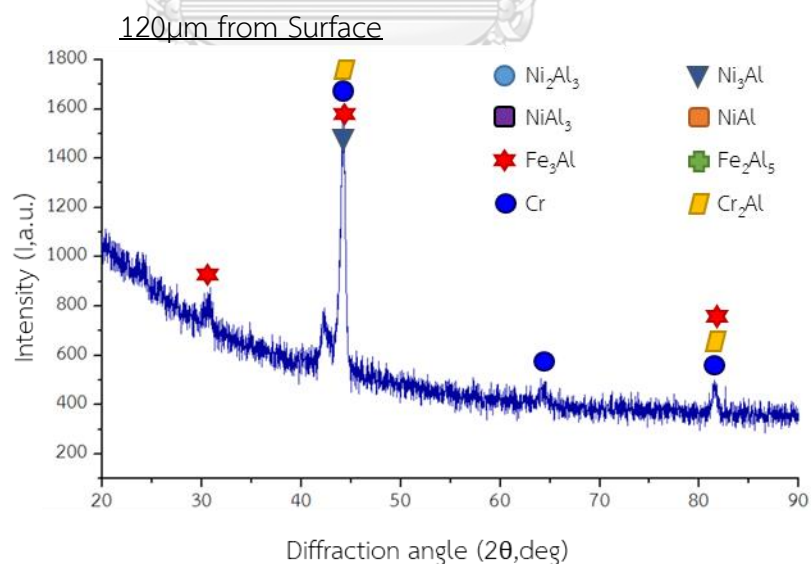


รูปที่ 4.18 แผนภูมิสมดุลของนิกเกิลและอะลูมิเนียม [6]

เมื่อพิจารณาข้อมูล EDS จะเห็นถึงการกระจายตัวของโครเมียมบริเวณ Interlayer ระหว่างชั้นเคลือบด้านใน (coating layer 2) กับวัสดุพื้น จากรูปที่ 4.16 ในช่วงก่อนการทดลอง (T_0) โลหะผสม Incoloy 825 มีส่วนผสมของโครเมียมอยู่ 19.5-23.5 wt.% กระจายตัวอยู่ทั่วเนื้อชิ้นงาน เมื่อเริ่มทำการทดลอง (T_1) กระบวนการอะลูมิเนียมไนซิงแบบผง อะลูมิเนียมจะเริ่มแพร่เข้าสู่ผิวชิ้นงานและสร้างชั้นเคลือบที่มีสารประกอบอะลูมิเนียมไนด์บริเวณผิวชิ้นงาน สารประกอบนิกเกิลอะลูมิเนียมไนด์ที่เกิดขึ้นคือ Ni_2Al_3 , Ni_3Al และ $NiAl_3$ จากแผนภูมิสมดุลระหว่างนิกเกิล โครเมียมและอะลูมิเนียม ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส [8] ตามรูปที่ 4.19 พบว่าเฟสของสารประกอบนิกเกิลอะลูมิเนียมไนด์จะมีปริมาณของโครเมียมละลายอยู่ได้น้อยมาก โครเมียมที่ไม่ถูกละลายจะถูกผลักออกและปรากฏบริเวณ interlayer เมื่อเวลาในการเคลือบเพิ่มขึ้น (T_2) ปริมาณของสารประกอบนิกเกิลอะลูมิเนียมไนด์จะเพิ่มขึ้นจากความหนาของชั้นเคลือบที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้โครเมียมส่วนที่ไม่ละลายในสารประกอบนิกเกิลอะลูมิเนียมไนด์ถูกผลักออกมาอยู่บริเวณ interlayer มากขึ้น และเมื่อสิ้นสุดการทดลอง (T_f) จะพบการกระจายตัวของโครเมียมบริเวณ interlayer สอดคล้องกับข้อมูลจาก EDS



รูปที่ 4.19 แผนภูมิสมดุลระหว่างนิกเกิล โครเมียมและอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส[8] จากนั้นทำการวิเคราะห์เฟสของ interlayer ด้วย XRD พบว่ามีเฟสของ Fe_3Al Cr_2Al และอะตอมของโครเมียม (Cr) เป็นเฟสหลัก จึงสามารถสรุปได้ว่าโครเมียมที่กระจายตัวอยู่บริเวณ interlayer จะอยู่ในลักษณะของ Cr_2Al และอะตอมของโครเมียม (Cr) ตามรูปที่ 4.20

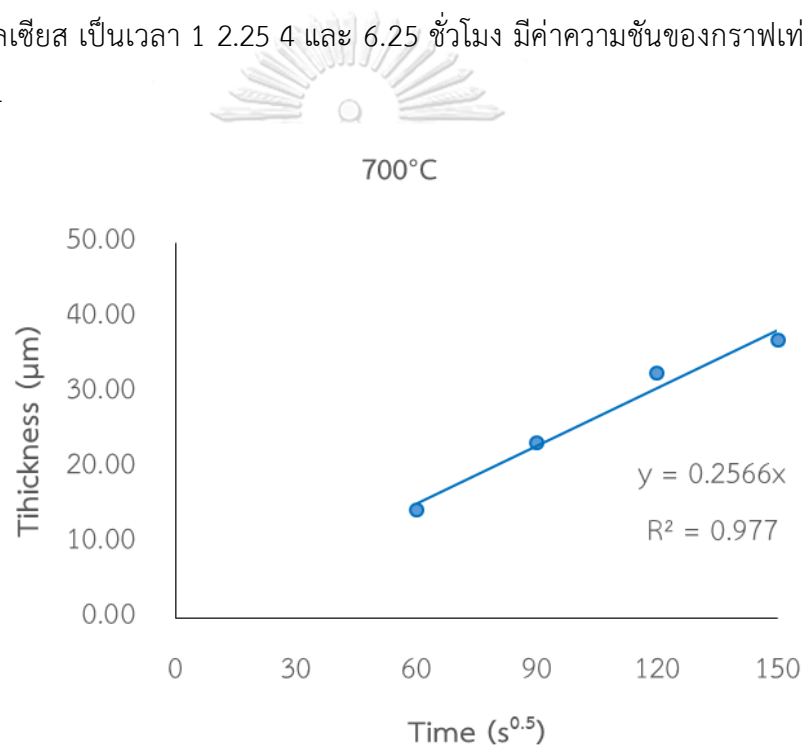


รูปที่ 4.20 ผล XRD ของบริเวณลึกจากผิว 120 ไมครอน ของชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

4.5 ผลการตรวจสอบอัตราการโตของชั้นเคลือบ (Growth rate)

จากการวัดความหนาของชั้นเคลือบที่เกิดบนชิ้นงานโลหะผสม Incoloy 825 ที่ผ่านกระบวนการอะลูมิเนียมในเชิงแบบผงที่อุณหภูมิและเวลาต่างกัน จะได้ความหนาเฉลี่ยของชั้นเคลือบสำหรับชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส ตามตารางที่ 4.1 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ จะพบว่าความหนาเฉลี่ยของชั้นเคลือบจะเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น เมื่อนำข้อมูลมาเขียนกราฟระหว่าง ความหนาเฉลี่ยของชั้นเคลือบต่อรากที่สองของเวลา พบว่า กราฟที่ได้จะมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง

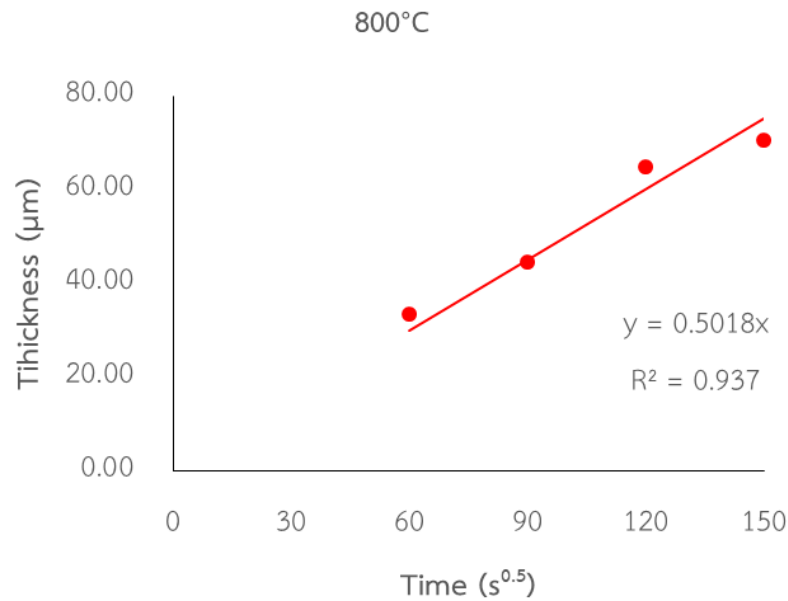
กราฟของชิ้นงานโลหะผสม Incoloy 825 ที่ผ่านกระบวนการอะลูมิเนียมในเชิงแบบผงที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 2.25 4 และ 6.25 ชั่วโมง มีค่าความชันของกราฟเท่ากับ 0.2566 ตามรูปที่ 4.21



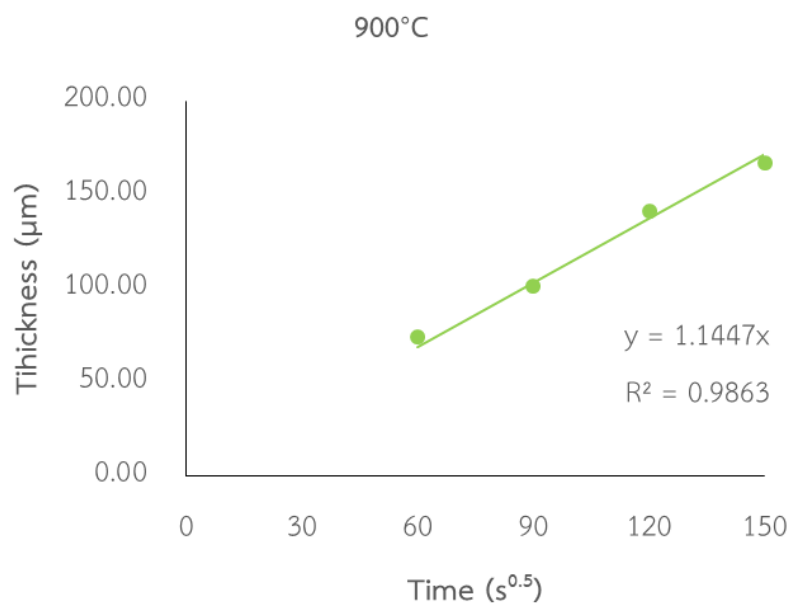
รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความหนาเฉลี่ยของชั้นเคลือบต่อรากที่สองของเวลาของโลหะผสม

Incoloy 825 ที่ผ่านกระบวนการอะลูมิเนียมในเชิงแบบผง ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

กราฟของชิ้นงานโลหะผสม Incoloy 825 ที่ผ่านกระบวนการอะลูมิเนียมในเชิงแบบผงที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 2.25 4 และ 6.25 ชั่วโมง มีค่าความชันของกราฟเท่ากับ 0.5018 ตามรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความหนาเฉลี่ยของชั้นเคลือบต่อรากที่สองของเวลาของโลหะผสม Incoloy 825 ที่ผ่านกระบวนการอะลูมิเนียมไนซิงแบบผง ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส กราฟของชิ้นงานโลหะผสม Incoloy 825 ที่ผ่านกระบวนการอะลูมิเนียมไนซิงแบบผงที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 2.25 4 และ 6.25 ชั่วโมง มีค่าความชันของกราฟเท่ากับ 0.9863 ตามรูปที่ 4.23

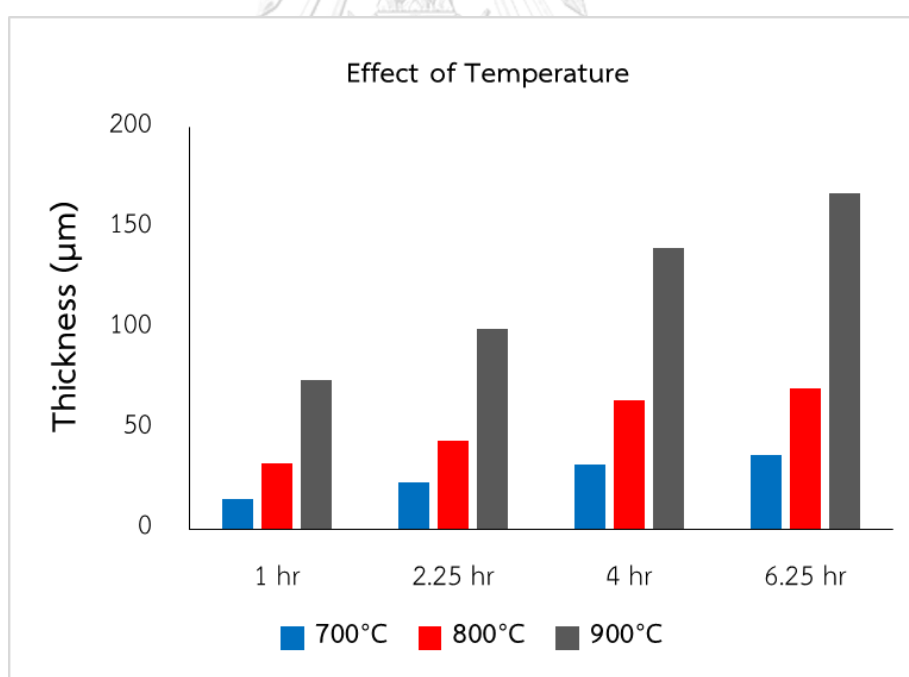


รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความหนาเฉลี่ยของชั้นเคลือบต่อรากที่สองของเวลาของโลหะผสม Incoloy 825 ที่ผ่านกระบวนการอะลูมิเนียมไนซิงแบบผง ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

จากการตรวจสอบกราฟระหว่างความหนาเฉลี่ยของชั้นเคลือบต่อรากที่สองของเวลาของโลหะผสม Incoloy 825 ที่ผ่านกระบวนการอะลูมิเนียมในเชิงแบบผงที่อุณหภูมิ โดยพิจารณาที่อุณหภูมิคงที่ พบว่าความหนาของชั้นเคลือบ (E) จะแปรผันตามอุณหภูมิ (T) และเวลา (t) ที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นกลไกการเกิดชั้นเคลือบจากกระบวนการอะลูมิเนียมในเชิงแบบผง ถูกควบคุมด้วยกลไกการแพร่ ที่อุณหภูมิคงที่ ความหนาของชั้นเคลือบจะแปรผันตามเวลาตามสมการที่ 4.1

$$E = kt^{0.5} \quad (4.1)$$

โดยค่า k คือค่าคงที่ของอัตราการโตของชั้นเคลือบ (growth rate) และเมื่อเปรียบเทียบกับสมการที่ 4.1 กับสมการเส้นตรงที่ได้จากกราฟระหว่างความหนาเฉลี่ยของชั้นเคลือบต่อรากที่สองของเวลา จะได้ค่า k เท่ากับความชันของกราฟ ดังนั้นค่า k ของโลหะผสม Incoloy 825 ที่ผ่านกระบวนการอะลูมิเนียมในเชิงแบบผงที่อุณหภูมิ 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส จะเท่ากับ 0.2566 0.5018 และ 1.1447 ตามลำดับ แต่กลไกการเกิดชั้นเคลือบแบบ diffusion control ยังเป็นกลไกที่ขึ้นกับอุณหภูมิด้วย เมื่อเปรียบเทียบความหนาของชั้นเคลือบในเวลาการเคลือบผิวที่เท่ากัน จะพบว่าเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบเพิ่มขึ้น ความหนาของชั้นเคลือบจะมีค่าเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงผลของอุณหภูมิต่อความหนาของชั้นเคลือบในเวลาการเคลือบผิวที่เท่ากันบนโลหะผสม Incoloy 825 ที่ผ่านกระบวนการอะลูมิเนียมในเชิงแบบผง

จะสามารถเขียนสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยา (rate constant of reaction) ได้สมการที่

4.2

$$k = A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (4.2)$$

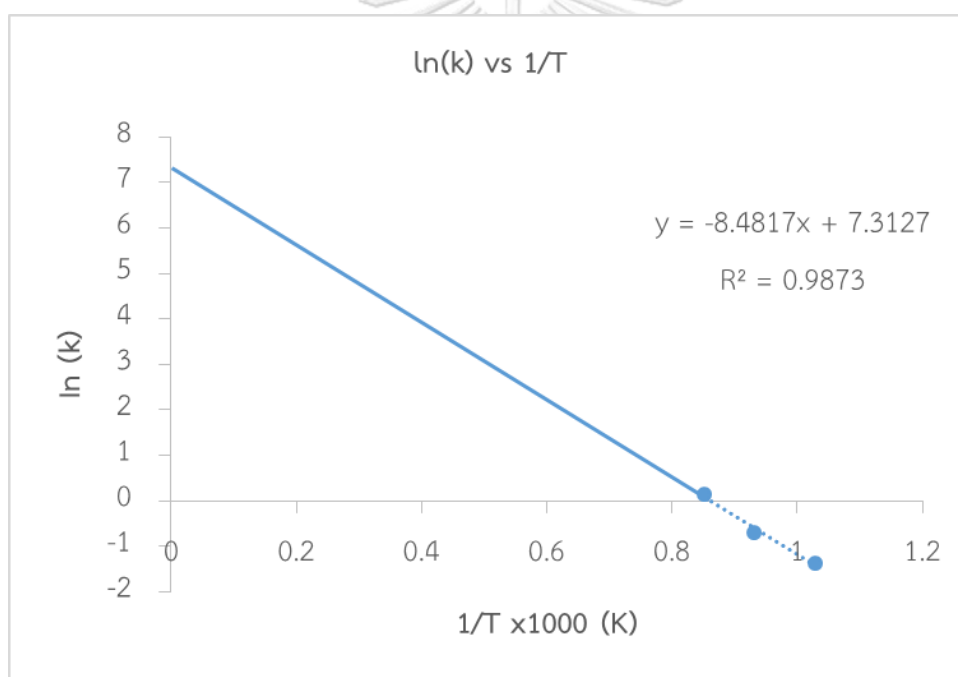
จัดรูปสมการโดยการใส่ลอการิทึมธรรมชาติทั้งสองข้างของสมการจะได้สมการที่ 4.3

$$\ln(k) = \ln(A) + \left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (4.3)$$

จัดรูปสมการโดยกำหนดให้ $B = -Q/R$ จะได้สมการที่ 4.4

$$\ln(k) = \ln(A) + B \left(\frac{1}{T}\right) \quad (4.4)$$

นำสมการที่ 4.4 มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมธรรมชาติของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (ln(k)) กับส่วนกลับของอุณหภูมิในหน่วยเคลวิน เพื่อคำนวณหาค่า activation energy (Q)

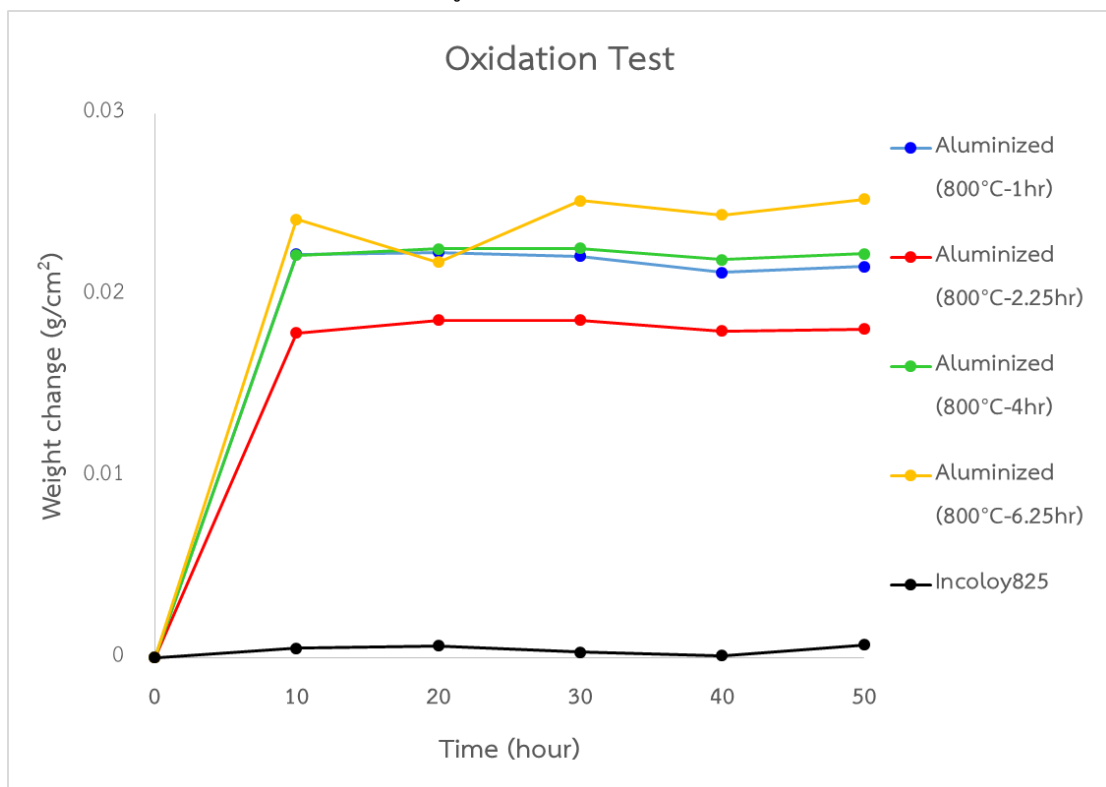


รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างลอการิทึมธรรมชาติของอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเคลือบ
กับส่วนกลับของอุณหภูมิ

จากรูปที่ 4.25 ค่าความชันของกราฟจะเท่ากับ -8.4817 เมื่อเทียบกับสมการที่ 4.6 จะได้ว่า $B = -8.4817 \times 1000$ หรือ $-Q/R = -8.4817 \times 1000$ จะได้ว่าค่า activation energy (Q) ของการเกิดปฏิกิริยาในการทำอะลูมิเนียมไนซิงแบบผงบนโลหะผสม Incoloy 825 เท่ากับ 70.517 kJ/mol

4.6 ผลการตรวจสอบความต้านทานการเกิดออกซิเดชัน (Oxidation test)

พบว่าโลหะผสม Incoloy 825 ที่ผ่านกระบวนการอะลูมิเนียมไนซิงที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง จะมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นหลังจากอบในบรรยากาศที่มีออกซิเจน เนื่องจากชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอะลูมิเนียมไนซิงจะเกิดเฟสสารประกอบของนิกเกิลอะลูมิเนียมไนด์และเหล็กอะลูมิเนียมไนด์ ซึ่งเมื่อทำการทดสอบที่อุณหภูมิสูงและบรรยากาศที่มีออกซิเจน จะทำให้เกิดปฏิกิริยากับ ชั้นเคลือบ ทำให้เกิดสารประกอบของอะลูมิเนียมออกไซด์

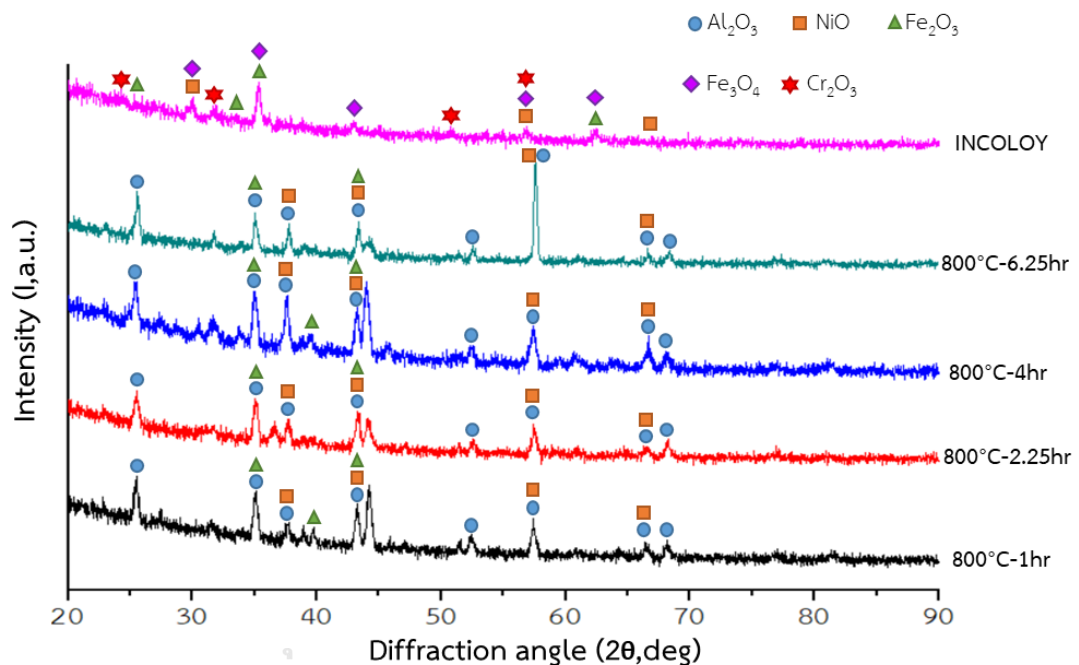


รูปที่ 4.26 แสดงผลการทดสอบออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส บนโลหะผสม

Incoloy 825 ที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการอะลูมิเนียมไนซิงแบบผง

จากรูปที่ 4.26 จะพบว่า ชิ้นงานที่ไม่ผ่านกระบวนการอะลูมิเนียมไนซิงเมื่อทำการทดสอบออกซิเดชัน 50 ชั่วโมง จะมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น 0.0007 กรัม ในขณะที่ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอะลูมิเนียมไนซิงแบบผงที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 2.25 4 และ 6.25 ชั่วโมงกลับมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น 0.0215 0.0181 0.0222 และ 0.0252 กรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งจากข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักของชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบความต้านทานการเกิดออกซิเดชัน พบว่าการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย จึงยังสรุปไม่ได้ว่าการเคลือบผิวชิ้นงาน Incoloy 825 ด้วยวิธีอะลูมิเนียมไนซิงแบบผงจะทำให้มีความต้านทานการเกิดออกซิเดชันได้ดีกว่าชิ้นงานที่ไม่ผ่านการเคลือบผิวแบบมีนัยสำคัญเนื่องจากโลหะผสม Incoloy 825 จัดเป็น Fe-base superalloys ที่มีความ

ต้านทานการเกิดออกซิเดชันสูง เนื่องจากส่วนผสมทางเคมีที่มีโครเมียมผสมอยู่ โครเมียมจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนสร้างสารฟิล์มของประกอบโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) ปกคลุมผิวของชิ้นงาน ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มความต้านทานการเกิดออกซิเดชันได้ดี ในส่วนของการกระบวนการอะลูมิเนียมในเชิงแบบผงจะเป็นการเพิ่มปริมาณของอะลูมิเนียมบนผิวของชิ้นงาน ในลักษณะของสารประกอบนิกเกิลอะลูมิเนียมไนต์ และเหล็กอะลูมิเนียมไนต์ เช่นเฟสของ Ni_2Al_3 , Ni_3Al , NiAl_3 , FeAl_3 และ Fe_2Al_5 ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นแหล่งของอะลูมิเนียม (aluminum source) เมื่ออะลูมิเนียมที่ผิวของชิ้นงานสัมผัสกับบรรยากาศที่มีออกซิเจน จะทำให้เกิดสารประกอบของอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ตามรูปที่ 4.27 ซึ่งเป็นฟิล์มที่มีความหนาแน่นสูงช่วยป้องกันผิวของชิ้นงานไม่ให้สัมผัสกับบรรยากาศโดยตรง



รูปที่ 4.27 กราฟแสดงผล XRD ของออกไซด์ที่เกิดขึ้นการทดสอบออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส บนโลหะผสม Incoloy 825 ที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการอะลูมิเนียมในเชิงแบบผง

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

การปรับปรุงผิว Incoloy 825 ด้วยวิธีอะลูมิเนียมในเชิงแบบผง สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้ สามารถสร้างชั้นเคลือบบนผิวของโลหะผสม Incoloy 825 ด้วยวิธีอะลูมิเนียมในเชิงแบบผงที่อุณหภูมิ 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการเคลือบ 1 2.25 4 และ 6.25 ชั่วโมง เมื่อนำข้อมูลความหนาเฉลี่ยของชั้นเคลือบและอัตราการโตของชั้นเคลือบมาคำนวณค่าพลังงานก่อกัมมันต์ (activation energy) ของกระบวนการอะลูมิเนียมในเชิง แบบผงบนโลหะผสม Incoloy 825 มีค่าเท่ากับ 70.64 kJ/mol โดยการเกิดชั้นเคลือบเป็นแบบ high-activity aluminization ในทุกอุณหภูมิ

จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชั้นงานที่ผ่านกระบวนการอะลูมิเนียมในเชิงแบบผง จะพบว่าชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นแบ่งเป็น 2 ชั้น โดยชั้นเคลือบด้านนอกจะพบเฟสของ Ni_2Al_3 $NiAl_3$ และ Fe_2Al_5 ส่วนชั้นเคลือบด้านในจะเป็นเฟสของ Ni_3Al และ Fe_3Al และยังพบการกระจายตัวของโครเมียมที่อยู่ในรูปธาตุโครเมียมบริเวณ interlayer ระหว่างชั้นเคลือบด้านในกับเนื้อวัสดุพื้น

ความหนาของชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นแปรผันตามอุณหภูมิและเวลาในการเคลือบ จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นเคลือบกับรากที่สองของเวลาที่ใช้ในการเคลือบจะมีลักษณะเป็นกราฟเส้นตรง จึงสามารถระบุได้ว่าการโตของชั้นเคลือบนี้ถูกควบคุมโดยกลไกการแพร่ (diffusion control) ในลักษณะ inward diffusion เนื่องจากไม่พบ Kirkendall's void ในชั้นเคลือบ

การทดสอบความต้านทานการเกิดออกซิเดชันพบว่าชั้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยวิธีอะลูมิเนียมในเชิงแบบผง จะมีการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากการฟิล์มของอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และน้ำหนักคงที่หลังจากการตรวจสอบที่ 10 ชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบกับชั้นงานที่ไม่ผ่านการเคลือบพบว่าน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปไม่ได้มีค่าแตกต่างกันมาก

การเคลือบด้วยวิธีอะลูมิเนียมในเชิงแบบผงจะทำให้ที่ผิวของชั้นงานมีเฟสของสารประกอบนิกเกิลอะลูมิเนียมและเหล็กอะลูมิเนียม ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นแหล่งของอะลูมิเนียม (aluminum source) เมื่ออะลูมิเนียมบริเวณผิวสัมผัสกับบรรยากาศที่มีออกซิเจน จะทำให้เกิดฟิล์มของอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ซึ่งฟิล์มของอะลูมิเนียมออกไซด์จะช่วยป้องกันไม่ให้ชั้นงานสัมผัสกับบรรยากาศโดยตรงสังเกตได้จากน้ำหนักที่เริ่มคงที่หลังจาก 10 ชั่วโมงแรกของการทดสอบความต้านทานการเกิดออกซิเดชันน้ำหนักจะคงที่ ต่างจากชั้นงานที่ไม่ผ่านการเคลือบผิว ซึ่งมีสารประกอบของ Cr_2O_3 NiO Fe_2O_3 และ Fe_3O_4 ที่ผิวชั้นงาน

รายการอ้างอิง

- 1 ปัญญวัชร วังยาว.: 'เอกสารประกอบการสอนวิชา HIGH TEMPERATURE MATERIALS. ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548
- 2 Green, S., and Stott, F.: 'Aluminizing of iron-nickel-base alloys for resistance to high-temperature gaseous environments', Corrosion science, 1992, 33, (3), pp. 345-359
- 3 Bozza, F., Bolelli, G., Giolli, C., Giorgetti, A., Lusvarghi, L., Sassatelli, P., Scrivani, A., Candeli, A., and Thoma, M.: 'Diffusion mechanisms and microstructure development in pack aluminizing of Ni-based alloys', Surface and Coatings Technology, 2014, 239, pp. 147-159
- 4 Dutta, R., Singh, K., Vishwanadh, B., and Dey, G.: 'Aluminide formation on Alloy 800 by plasma spraying and heat treatment', Materials and Manufacturing Processes, 2017, 32, (16), pp. 1845-1850
- 5 Tong, L., Dengzun, Y., and Chungen, Z.: 'Low-temperature formation of aluminide coatings on Ni-base superalloys by pack cementation process', Chinese Journal of Aeronautics, 2010, 23, (3), pp. 381-385
- 6 สิริินญา จันท์ศักดิ์สูง.: 'ผลของอุณหภูมิและเวลาต่อความหนาและโครงสร้างชั้นเคลือบในกระบวนการ Pack-Aluminizing ของโลหะผสมพิเศษนิกเกิลชนิด IN 738 และ GTD 111', จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- 7 Zhan, Z., He, Y., Li, L., Liu, H., and Dai, Y.: 'Low-temperature formation and oxidation resistance of ultrafine aluminide coatings on Ni-base superalloy', Surface and Coatings Technology, 2009, 203, (16), pp. 2337-2342
- 8 Visuttipitukul, P., Limvanutpong, N., and Wangyao, P.: 'Aluminizing of nickel-based superalloys grade in 738 by powder liquid coating', Materials transactions, 2010, 51, (5), pp. 982-987

ภาคผนวก

ตารางที่ ก-1 แสดงความหนาชั้นเคลือบของโลหะผสม Incoloy 825 ที่ผ่านกระบวนการ

อะลูมิเนียมเชิงแบบผง

อุณหภูมิที่ใช้ ในการเคลือบ (องศา เซลเซียส)	เวลาที่ใช้ใน การเคลือบ (ชั่วโมง)	ชั้นเคลือบด้าน นอก (μm)	ชั้นเคลือบ ด้านใน (μm)	ความหนารวม ของชั้นเคลือบ (μm)	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน
700	1	11.96	2.52	14.48	1.02
	2.25	20.79	2.68	23.47	4.00
	4	29.63	3.15	32.78	2.54
	6.25	33.49	3.56	37.05	6.07
800	1	28.83	4.61	33.44	1.53
	2.25	38.04	6.63	44.67	3.26
	4	56.82	8.10	64.92	1.67
	6.25	61.95	8.51	70.46	1.82
900	1	63.64	10.71	74.35	2.63
	2.25	77.89	23.56	101.45	3.50
	4	117.69	23.62	141.31	2.77
	6.25	142.85	24.38	167.23	2.13

ตารางที่ ก-2 แสดงข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณค่า Activation energy (Q)

Temperature (K)	k	1/Temp (x1000)	ln(k)
973	0.2566	1.02774923	-1.36023683
1073	0.5018	0.93196645	-0.68955365
1173	0.9863	0.85251492	-0.01379471

ตารางที่ ก-3 อัตราส่วนน้ำหนักต่อพื้นที่ผิวเมื่อทดสอบออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสของโลหะผสม Incoloy 825 และชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอะลูมิเนียมในเชิงแบบผง ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ถึง 6.25 ชั่วโมง

ชิ้นงาน	0 ชั่วโมง	10 ชั่วโมง	20 ชั่วโมง	30 ชั่วโมง	40 ชั่วโมง	50 ชั่วโมง
Aluminized (800°C-1hr)	0	0.022251	0.022349	0.022121	0.021238	0.021565
Aluminized (800°C-2.25hr)	0	0.017892	0.0186	0.0186	0.018001	0.01811
Aluminized (800°C-4hr)	0	0.022172	0.022539	0.022567	0.021946	0.022257
Aluminized (800°C-6.25hr)	0	0.024158	0.021818	0.025202	0.024411	0.025265
Incoloy825	0	0.000529	0.000668	0.000306	0.000111	0.000724

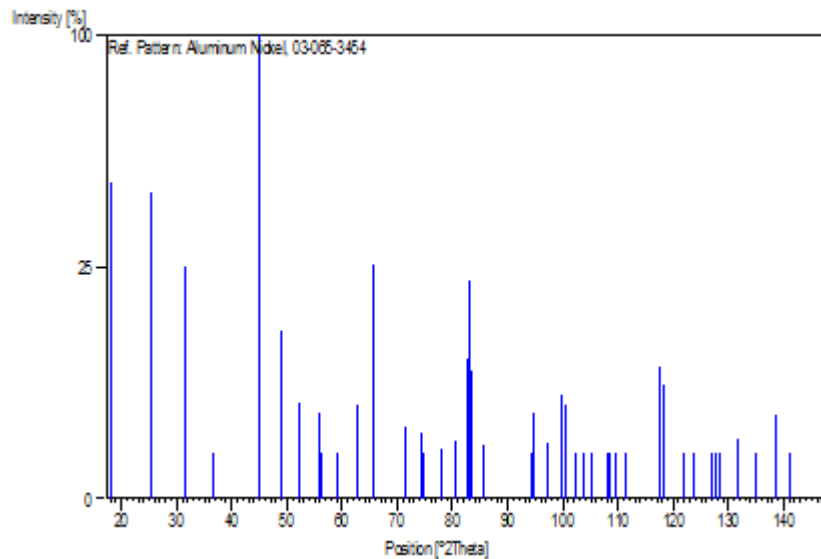
ข้อมูลอ้างอิงสำหรับเฟส Ni_2Al_3

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	[%]
1	0	0	1	4.90040	18.088	46.5
2	1	0	0	3.49554	25.461	43.3
3	0	1	1	2.84574	31.410	25.0
4	0	0	2	2.45020	36.647	0.7
5	1	1	0	2.01815	44.876	89.6
6	0	1	2	2.00639	45.154	100.0
7	1	1	1	1.86609	48.760	13.0
8	2	0	0	1.74777	52.301	4.2
9	2	0	1	1.64620	55.800	3.4
10	0	0	3	1.63347	56.273	0.2
11	1	1	2	1.55777	59.272	0.7
12	0	1	3	1.47986	62.735	4.2
13	2	0	2	1.42287	65.554	25.4
14	2	1	0	1.32119	71.329	2.4
15	1	2	1	1.27564	74.293	2.0
16	1	1	3	1.26969	74.700	0.2

17	0	0	4	1.22510	77.918	1.2
18	2	0	3	1.19340	80.401	1.5
19	3	0	0	1.16518	82.768	9.1
20	1	2	2	1.16290	82.966	22.3
21	1	0	4	1.15615	83.559	7.5
22	0	3	1	1.13358	85.614	1.4
23	3	0	2	1.05226	94.116	0.1
24	1	1	4	1.04725	94.707	3.4
25	1	2	3	1.02724	97.159	1.5
26	2	2	0	1.00908	99.524	5.0
27	0	2	4	1.00319	100.323	4.2
28	2	2	1	0.98834	102.409	0.7
29	0	0	5	0.98008	103.618	0.1
30	3	1	0	0.96949	105.224	0.6
31	3	1	1	0.95105	108.181	0.5
32	3	0	3	0.94858	108.595	0.3
33	1	0	5	0.94369	109.425	0.5
34	2	2	2	0.93305	111.294	0.1
35	3	1	2	0.90148	117.405	8.0
36	2	1	4	0.89833	118.070	5.9
37	1	1	5	0.88162	121.791	0.2
38	4	0	0	0.87388	123.639	0.2
39	0	4	1	0.86031	127.113	0.2
40	2	2	3	0.85848	127.607	0.1
41	0	2	5	0.85485	128.605	0.3
42	3	0	4	0.84430	131.667	1.7
43	3	1	3	0.83371	135.020	0.8
44	0	4	2	0.82310	138.733	3.3
45	0	0	6	0.81673	141.174	0.6
46	3	2	0	0.80193	147.708	0.4

Stick Pattern



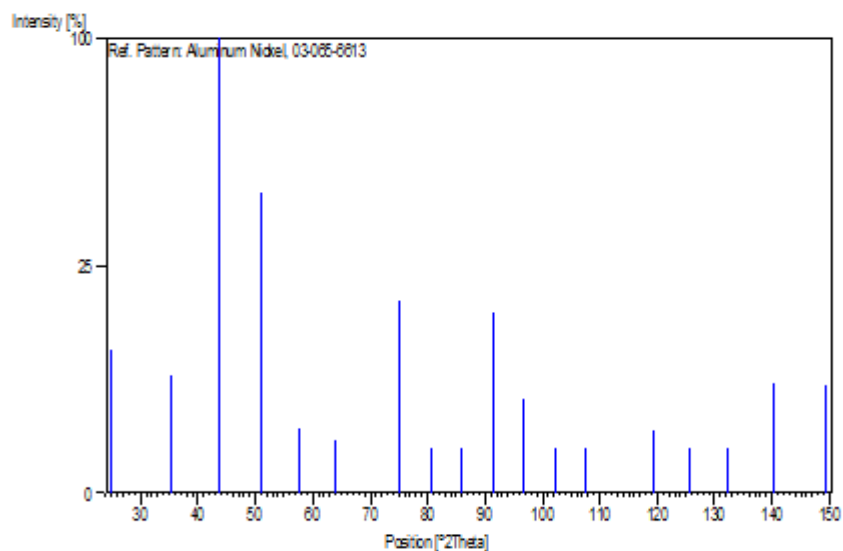
ข้อมูลอ้างอิงสำหรับเฟส Ni_3Al

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	0	0	3.57180	24.909	9.8
2	1	1	0	2.52564	35.515	6.7
3	1	1	1	2.06218	43.868	100.0
4	2	0	0	1.78590	51.103	43.8
5	2	1	0	1.59736	57.663	2.1
6	2	1	1	1.45818	63.776	1.3
7	2	2	0	1.26282	75.177	17.7
8	3	0	0	1.19060	80.629	0.5
9	3	1	0	1.12950	85.998	0.3
10	3	1	1	1.07694	91.330	15.7
11	2	2	2	1.03109	96.675	4.4
12	3	2	0	0.99064	102.079	0.1
13	3	2	1	0.95460	107.594	0.2
14	4	0	0	0.89295	119.230	1.9
15	4	1	0	0.86629	125.545	0.2

16	4	1	1	0.84188	132.404	0.1
17	3	3	1	0.81943	140.119	5.9
18	4	2	0	0.79868	149.361	5.6

Stick Pattern



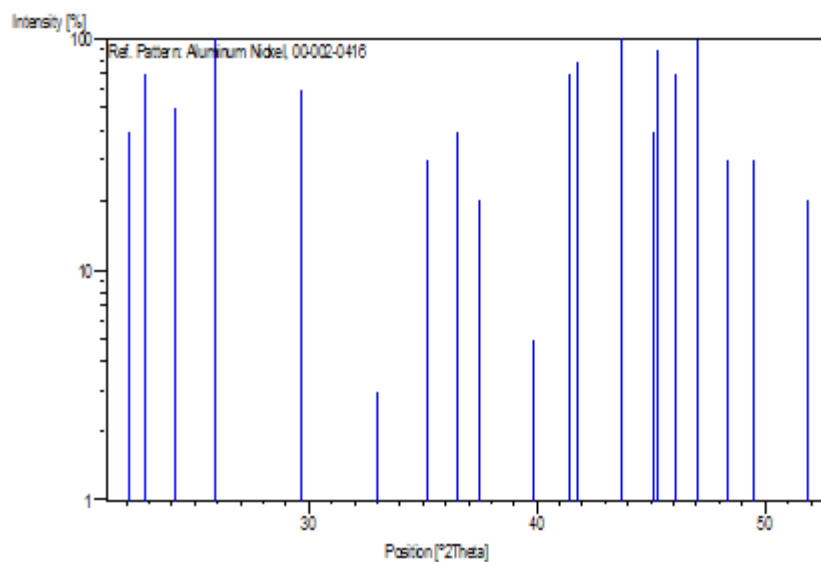
ข้อมูลอ้างอิงสำหรับเฟส NiAl_3

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	0	1	1	4.02000	22.094	40.0
2	1	0	1	3.89000	22.842	70.0
3	0	2	0	3.68000	24.165	50.0
4	1	1	1	3.44000	25.879	100.0
5	2	1	0	3.01000	29.655	60.0
6	2	0	1	2.71000	33.027	3.0
7	2	1	1	2.55000	35.165	30.0
8	2	2	0	2.46000	36.496	40.0
9	0	0	2	2.40000	37.442	20.0
10	1	0	2	2.26000	39.856	5.0
11	0	3	1	2.18000	41.385	70.0
12	1	1	2	2.16000	41.786	80.0
13	1	3	1	2.07000	43.694	100.0

14	0	2	2	2.01000	45.068	40.0
15	3	0	1	2.00000	45.306	90.0
16	2	3	0	1.97000	46.035	70.0
17	3	1	1	1.93000	47.046	100.0
18	2	1	2	1.88000	48.376	30.0
19	0	4	0	1.84000	49.498	30.0
20	3	2	1	1.76000	51.911	20.0

Stick Pattern



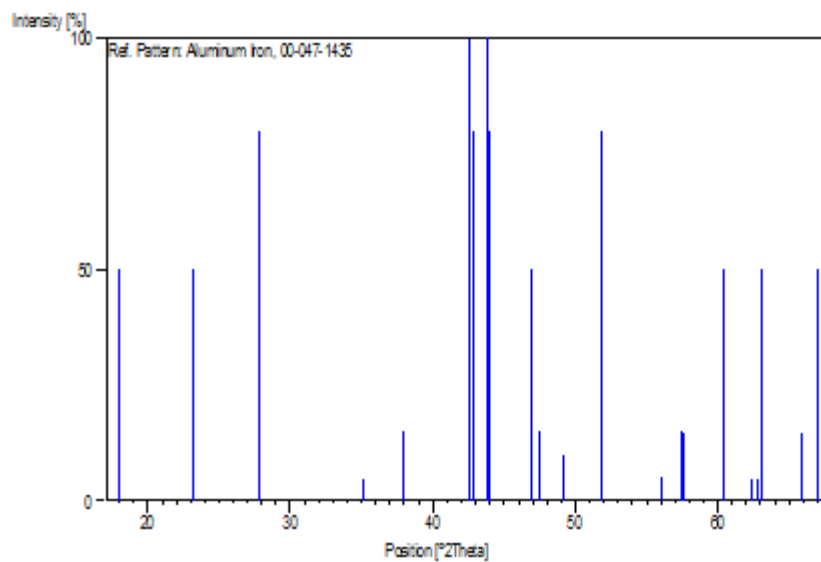
ข้อมูลอ้างอิงสำหรับเฟส Fe_2Al_5

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	1	0	4.91500	18.034	50.0
2	2	0	0	3.82500	23.236	50.0
3	0	2	0	3.20100	27.849	80.0
4	0	2	1	2.55300	35.122	5.0
5	3	1	0	2.36910	37.949	15.0
6	2	2	1	2.12280	42.553	100.0
7	0	0	2	2.10810	42.864	80.0
8	3	1	1	2.06530	43.798	100.0

9	1	3	0	2.05880	43.944	80.0
10	1	1	2	1.93750	46.853	50.0
11	4	0	0	1.91210	47.514	15.0
12	1	3	1	1.84960	49.224	10.0
13	0	2	2	1.76090	51.882	80.0
14	3	3	0	1.63820	56.096	5.0
15	0	4	0	1.60280	57.449	15.0
16	2	2	2	1.59960	57.574	15.0
17	4	2	1	1.53040	60.441	50.0
18	5	1	0	1.48770	62.367	5.0
19	2	4	0	1.47820	62.813	5.0
20	1	3	2	1.47340	63.041	50.0
21	4	0	2	1.41670	65.876	15.0
22	2	4	1	1.39600	66.980	50.0

Stick Pattern

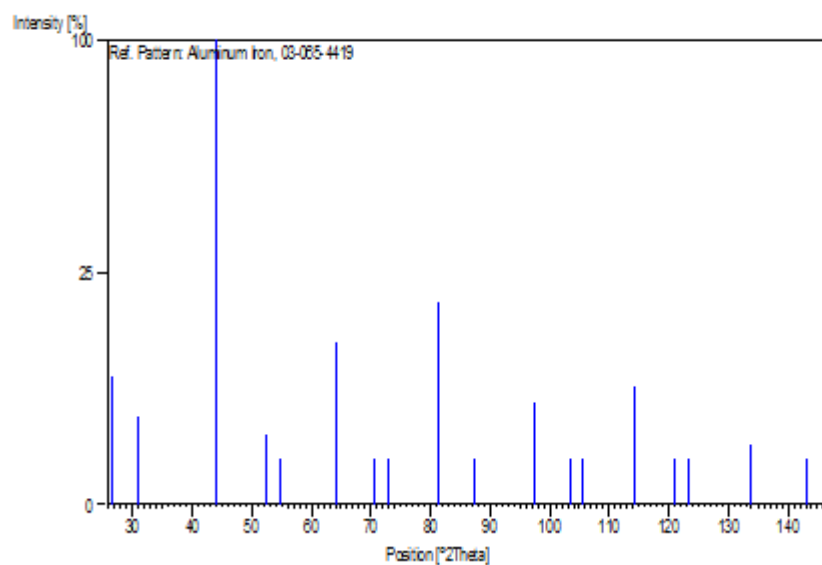


ข้อมูลอ้างอิงสำหรับเฟส Fe₃Al

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	1	1	3.34863	26.598	7.6
2	2	0	0	2.90000	30.808	3.5
3	2	2	0	2.05061	44.128	100.0
4	3	1	1	1.74877	52.269	2.3
5	2	2	2	1.67432	54.783	0.6
6	4	0	0	1.45000	64.179	12.4
7	3	3	1	1.33061	70.747	0.6
8	4	2	0	1.29692	72.875	0.6
9	4	2	2	1.18392	81.179	19.0
10	5	1	1	1.11621	87.277	0.4
11	4	4	0	1.02530	97.405	4.9
12	5	3	1	0.98038	103.574	0.3
13	6	0	0	0.96667	105.663	0.2
14	6	2	0	0.91706	114.273	6.6
15	5	3	3	0.88449	121.126	0.1
16	6	2	2	0.87438	123.518	0.1
17	4	4	4	0.83716	133.892	1.7
18	7	1	1	0.81216	143.047	0.2
19	6	4	0	0.80431	146.555	0.1

Stick Pattern

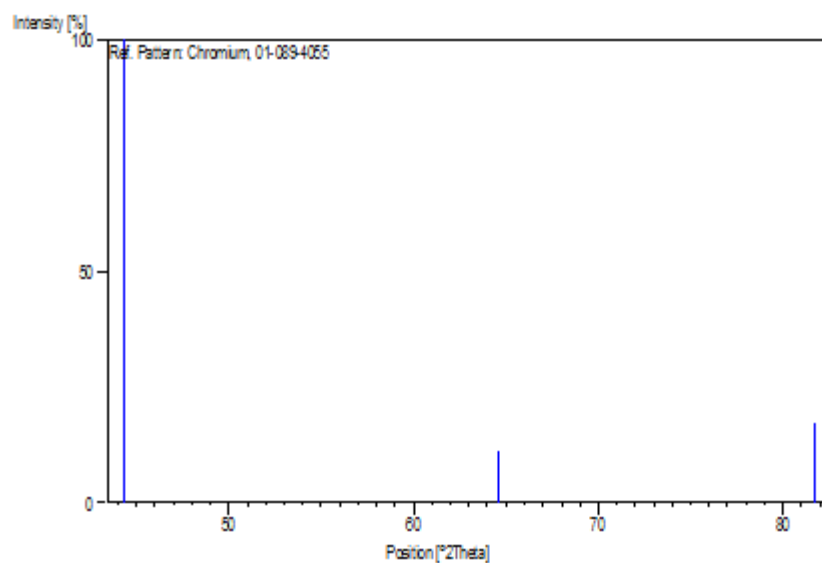


ข้อมูลอ้างอิงสำหรับเฟส Cr

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	1	0	2.03996	44.371	100.0
2	2	0	0	1.44247	64.554	11.2
3	2	1	1	1.17777	81.693	17.2

Stick Pattern

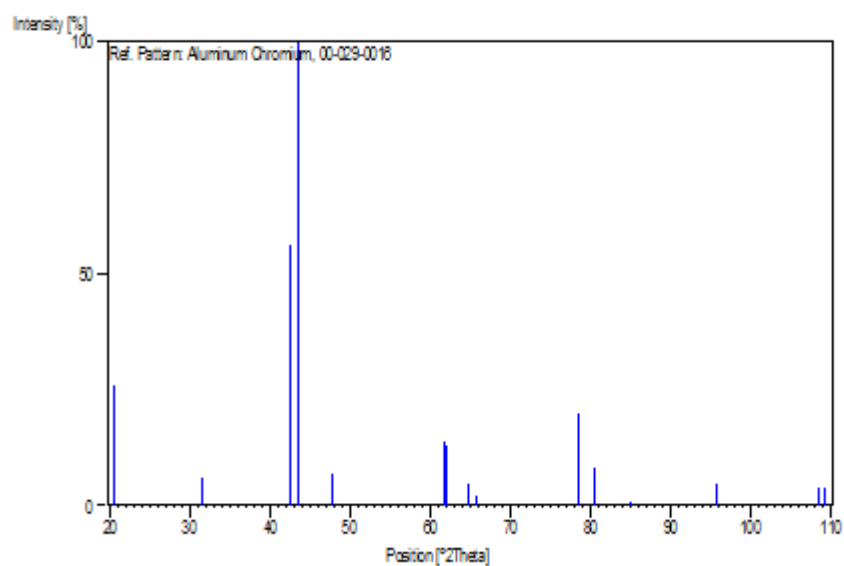


ข้อมูลอ้างอิงสำหรับเฟส Cr_2Al

Peak list

No.	h	k	l	d [Å]	2Theta[deg]	I [%]
1	0	0	2	4.31800	20.552	26.0
2	1	0	1	2.83500	31.532	6.0
3	1	1	0	2.12200	42.570	56.0
4	1	0	3	2.07800	43.517	100.0
5	1	1	2	1.90450	47.715	7.0
6	2	0	0	1.50050	61.776	14.0
7	1	0	5	1.49710	61.932	13.0
8	0	0	6	1.43950	64.704	5.0
9	2	0	2	1.41740	65.839	2.0
10	2	1	3	1.21640	78.582	20.0
11	1	1	6	1.19130	80.572	8.0
12	1	0	7	1.14120	84.907	1.0
13	2	0	6	1.03880	95.724	5.0
14	3	1	0	0.94900	108.524	4.0
15	3	0	3	0.94490	109.218	4.0

Stick Pattern



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายวิมุตติ ตงศิริ เกิดเมื่อวันที่ 13 มีนาคม พ.ศ. 2533 ที่จังหวัดขอนแก่น ได้เข้ารับการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น เมื่อปี พ.ศ. 2552 หลังจบการศึกษาระดับปริญญาตรี ได้ทำงานในตำแหน่งวิศวกร ในบริษัท เอ็น เอส เค แบริ่งส์ (ประเทศไทย) จำกัด ก่อนเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2558

