

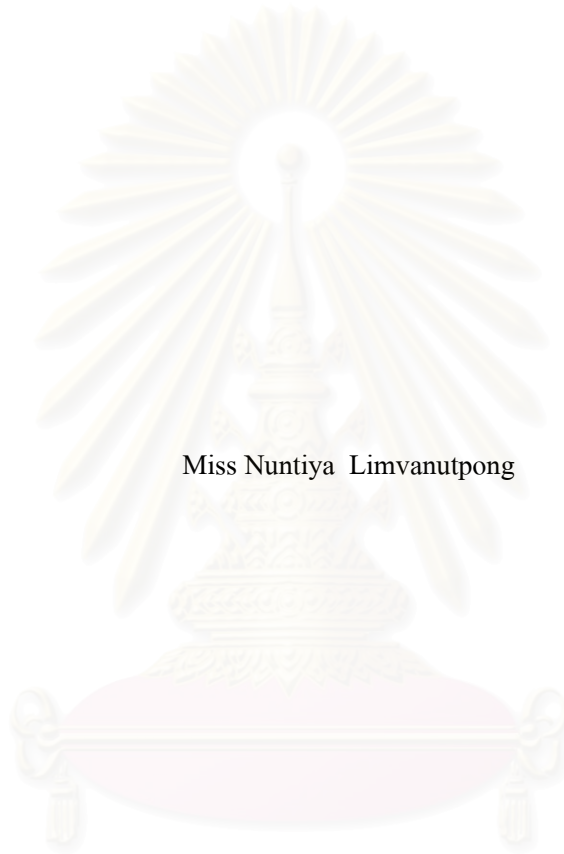
การเคลือบผิวโลหะผสมพิเศษชนิด IN 738 และ GTD 111  
ด้วยวิธีอะลูมิเนียมในเชิง แบบ powder liquid coating



นางสาว นันทิยา ลิมปิวณิชพงศ์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2550  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SURFACE MODIFICATION OF NICKEL BASE SUPERALLOY GRADE IN 738  
AND GTD 111 BY ALUMINIZING METHOD USING POWDER LIQUID COATING



Miss Nuntiya Limvanutpong

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

Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2007

Copyright of Chulalongkorn University

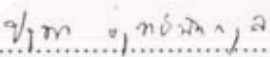
หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเคลือบผิวโลหะผสมพิเศษนิกเกิลชนิด IN 738 และ GTD 111 ด้วยวิธีอะลูมิโนซิง แบบ powder liquid coating
โดย	นางสาวนันทิยา ลิมปิวณิชพงศ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโลหการ
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร.ปฐมา วิสุทธิพิทักษ์กุล
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ ดร.ปัญญาวัชร วังยาว


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาดตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อาจารย์ ดร.ปฐมา วิสุทธิพิทักษ์กุล)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(อาจารย์ ดร.ปัญญาวัชร วังยาว)

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ ศรีเจริญชัย)

นันทิยา ลิ้มป่วนัสพงษ์ : การเคลือบผิวโลหะผสมพิเศษนิกเกิลชนิด IN 738 และ GTD 111 ด้วยวิธีอะลูมิเนียมในเชิง แบบ powder liquid coating (SURFACE MODIFICATION OF NICKEL BASE SUPERALLOY GRADE IN 738 AND GTD 111 BY ALUMINIZING METHOD USING POWDER LIQUID COATING) อ.ที่ปรึกษา : ดร.ปฐมมา วิสุทธิพิทักษ์กุล , อ.ที่ปรึกษาร่วม : ดร.ปัญญาวัชร วัชยาว , 99 หน้า.

ปัจจุบันโลหะผสมพิเศษนิกเกิล นำมาใช้เป็นใบพัดกังหันก๊าซในระบบเครื่องจักรเชื้อเพลิงจากก๊าซธรรมชาติที่ใช้งานภายใต้อุณหภูมิสูง ก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพเนื่องจากการกัดกร่อนและเกิดออกซิเดชัน จึงจำเป็นต้องปรับปรุงสมบัติของโลหะผสมพิเศษนิกเกิล วิธีการหนึ่งทำได้คือการเคลือบผิวด้วยวิธีAluminizing แบบ powder liquid coating โดยงานวิจัยครั้งนี้ศึกษาถึงผลของเวลาและอัตราส่วนผสมของอะลูมิเนียมและอะลูมินาที่ใช้ในการเคลือบผิว ต่อชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานโลหะนิกเกิล โลหะผสมพิเศษนิกเกิลชนิด IN 738 และ GTD 111 หลังผ่านการเคลือบผิวด้วยวิธี powder liquid coating

ในงานวิจัยนี้สามารถเคลือบผิวโลหะนิกเกิล โลหะผสมพิเศษนิกเกิลชนิด IN 738 และ GTD 111 ด้วยวิธีอะลูมิเนียมในเชิง แบบ powder liquid coating โดยใช้อะลูมิเนียมผสมอะลูมินา มี Ethyleneglycol เป็นตัวประสาน และควบคุมบรรยากาศเตาด้วยก๊าซอาร์กอน ที่อุณหภูมิ 1000°C ได้ โดยจะสามารถเกิดชั้นเคลือบที่สม่ำเสมอบนผิวโลหะได้ถ้าอัตราส่วนระหว่างอะลูมิเนียมต่ออะลูมินาและเวลาเคลือบเหมาะสม ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการทดลองนี้สำหรับโลหะนิกเกิล โลหะผสมพิเศษนิกเกิลชนิด IN 738 และ GTD 111 คือ อัตราส่วนอะลูมิเนียมต่ออะลูมินาเป็น 7:3 เวลาเคลือบ 4 ชม.

สารประกอบที่เกิดขึ้นจากการทำอะลูมิเนียมในเชิงบนชิ้นงานโลหะนิกเกิล ได้แก่ สารประกอบนิกเกิลอะลูมิเนียมในรูป  $Ni_3Al$ ,  $NiAl$ , และ  $Al$  สารประกอบที่เกิดขึ้นจากการทำอะลูมิเนียมในเชิงบนชิ้นงานโลหะผสมพิเศษนิกเกิลชนิด IN 738 และ GTD 111 ได้แก่ สารประกอบนิกเกิลอะลูมิเนียมในรูป  $Ni_3Al$ ,  $NiAl$ , และสารประกอบ  $AlCr_3$

## สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมโลหการ..... ลายมือชื่อนิสิต.....  
สาขาวิชา.....วิศวกรรมโลหการ..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ปีการศึกษา.....2550..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

##4770639321 :MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEYWORD : POWDER LIQUID COATING/ SUPERALLOY/ IN 738/GTD 111

NUNTIYA LIMVANUTPONG: SURFACE MODIFICATION OF NICKEL BASE SUPERALLOY GRADE IN 738 AND GTD 111 BY ALUMINIZING METHOD USING POWDER LIQUID COATING. THESIS ADVISOR : PATAMA VISUTTIPITUKUL, Ph.D., THESIS CO-ADVISOR: PANYAWAT WANGYAO, Ph.D., 99 pp

Nickel based superalloy is extensively used as blade in hot sections of power generation, under very high temperature and corrosion atmosphere. These components are degraded by oxidation and corrosion. A new method to improve the oxidation and corrosion resistance of nickel-base superalloy is aluminizing. Powder Liquid Coating is a recently developed aluminizing process. The objective of this thesis was to study effect of holding time and ratio of Al:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on the coated surface of Nickel, Nickel based superalloy grade IN 738 and GTD 111. Microstructure and phases appeared in coated layers were also characterized by GIXD, EDS, SEM and EPMA.

Surface modification of Nickel, Nickel base superalloy grade IN 738 and GTD 111 were produced by aluminizing method using powder liquid coating. Mixed powder slurries of Al with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> stirred with ethyleneglycol was pasted onto specimens, and the specimens were then heated to 1000°C under Ar atmosphere. The smooth coated layers can be controlled by changing the powder mixing ratio and coating time. Suitable Al:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ratio for all materials, which are pure Ni, IN 738 and GTD 111, in the study is 7:3 for the holding time of 4 hr.

Coated layers on pure Nickel specimens consists of Ni<sub>2</sub>Al<sub>3</sub>, NiAl<sub>3</sub>, and pure Al. Increasing aluminizing time increases thickness of Ni<sub>2</sub>Al<sub>3</sub> while amount of NiAl<sub>3</sub> and Al decrease. For IN 738 and GTD 111, Ni<sub>2</sub>Al<sub>3</sub>, NiAl<sub>3</sub> and AlCr<sub>2</sub> are found in coated layers.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

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

Academic Year: .....2007..... Co-advisor's Signature: 

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากความช่วยเหลือจากหลายๆฝ่าย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร. ปฐมา วิสุทธีพิทักษ์กุล และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.ปัญญาวัชร วัชยาว ที่ได้กรุณาให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำแนวทางที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัยนี้ ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ และรองศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ ศรีเจริญชัย ที่ให้ความรู้คำแนะนำและข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย ขอขอบพระคุณคณาจารย์ตลอดจนเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่านที่ให้การสนับสนุนผู้วิจัยในทุกด้านด้วยดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ศูนย์วิจัยเครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ บริษัทไทยปาร์คเกอร์ไรซิ่ง จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือทดสอบตลอดมาจนเสร็จสิ้นงานวิจัยด้วยดี

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา พี่ชายและน้องสาว ของข้าพเจ้า ที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้กับข้าพเจ้าตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา ขอกราบขอบพระคุณ คุณครูและอาจารย์ทุกท่านที่อบรมสั่งสอนข้าพเจ้ามาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน และขอขอบคุณพี่ เพื่อน และน้องนิสิตทุกท่าน โดยเฉพาะกลุ่มวิจัยทางด้านวิศวกรรมพื้นผิว ที่ให้คำแนะนำ ช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจให้กับผู้วิจัยด้วยดีเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง .....	ญ
สารบัญภาพ .....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ .....	1
1.1 ความสำคัญของงานวิจัย .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ .....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา .....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	2
2 ปรีทรรสน์วรรณกรรม .....	4
2.1 โลหะผสมพิเศษนิกเกิล.....	4
2.1.1 โครงสร้างจุลภาค.....	4
2.1.2 ความแข็งแรง กับ อุณหภูมิ.....	6
2.1.3 ส่วนผสมทางเคมี.....	7
2.1.4 การใช้งาน.....	9
2.2 วิธีการเคลือบผิวเพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชัน.....	11
2.2.1 Pack Cementation .....	11
2.2.2 Powder Liquid Coating .....	13
2.3 คุณสมบัติของโลหะผสมพิเศษนิกเกิลที่ได้หลังจากเคลือบผิวด้วย NiAl .....	15

บทที่	หน้า
3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการทดลอง.....	19
3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	19
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง.....	19
3.3 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน.....	19
3.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์ชิ้นเคลือบ.....	23
4 ผลการทดลอง.....	24
4.1 ผลการตรวจสอบขนาดผงและ ผลของขนาดผงอะลูมิเนียมต่อชั้นเคลือบ.....	24
4.1.1 ผงอะลูมินา.....	24
4.1.2 ผงอะลูมิเนียม.....	24
4.2 ผลการวิเคราะห์รูปร่างและลักษณะพื้นผิวของชั้นเคลือบ.....	25
4.2.1 ลักษณะผิวชั้นเคลือบบนโลหะนิกเกิล.....	25
4.2.2 ลักษณะผิวชั้นเคลือบบนโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด Inconel 738 .....	26
4.2.3 ลักษณะผิวชั้นเคลือบบนโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด GTD 111.....	29
4.3 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวางของชั้นเคลือบ.....	32
4.3.1 โครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวางของชั้นเคลือบโลหะนิกเกิล.....	32
4.3.2 โครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวางของชั้นเคลือบ โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด Inconel 738 .....	34
4.3.3 โครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวางของชั้นเคลือบ โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด GTD 111 .....	37
4.4 ผลการตรวจสอบเชิงคุณภาพของชั้นเคลือบ.....	41
4.4.1 ผลการตรวจสอบเชิงคุณภาพโดย XRD.....	41
4.4.1.1 การตรวจสอบเชิงคุณภาพโดย XRDของโลหะนิกเกิล.....	41
4.4.1.2 การตรวจสอบเชิงคุณภาพโดย XRDของ โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด Inconel 738 .....	44
4.4.1.3 การตรวจสอบเชิงคุณภาพโดย XRDของ โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด GTD 111 .....	49



บทที่	หน้า
4.4.2 ผลการตรวจสอบเชิงคุณภาพ โดย spectroscopy.....	53
4.4.2.1 การตรวจสอบเชิงคุณภาพ โดย spectroscopy ของ โลหะนิกเกิล.....	53
4.4.2.2 การตรวจสอบเชิงคุณภาพ โดย spectroscopy ของ โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นนิกเกิลเกรด Inconel 738 .....	58
4.4.2.3 การตรวจสอบเชิงคุณภาพ โดย spectroscopy ของ โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นนิกเกิลเกรด GTD 111 .....	67
5 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	71
5.1 ผลการวิเคราะห์ขนาดผงอะลูมิเนียม.....	71
5.2 ผลการวิเคราะห์เฟสในชั้นเคลือบ.....	71
5.2.1 การวิเคราะห์เฟสในชั้นเคลือบบน โลหะนิกเกิล.....	71
5.2.2 การวิเคราะห์เฟสในชั้นเคลือบบน โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นนิกเกิลเกรด Inconel 738 .....	73
5.2.3 การวิเคราะห์เฟสในชั้นเคลือบบน โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นนิกเกิลเกรด GTD 111.....	77
5.3 ผลการวิเคราะห์อิทธิพลของเวลาต่อลักษณะและความหนาชั้นเคลือบ.....	79
5.4 ผลการวิเคราะห์อิทธิพลของอัตราส่วนผสมต่อลักษณะชั้นเคลือบและความหนา.....	84
6 สรุปผลการทดลอง.....	86
รายการอ้างอิง .....	88
ภาคผนวก .....	89
ภาคผนวก ก .....	90
ภาคผนวก ข .....	93
ภาคผนวก ค .....	98
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	99

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมพิเศษนิกเกิล GTD 111 และ IN 738 .....	8
3.1 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมพิเศษนิกเกิล GTD 111 และ IN 738.....	20
3.2 เงื่อนไขในการทดลอง.....	22
5.1 ค่าเทียบแบบมาตรฐานความหนาของชั้นเคลือบส่วนที่ 1 ในชิ้นงานนิกเกิล.....	80
5.2 ค่าความหนาของชั้นเคลือบของชิ้นงานนิกเกิล.....	84
5.3 ค่าความหนาของชั้นเคลือบของชิ้นงาน IN 738.....	85
5.4 ค่าความหนาของชั้นเคลือบของชิ้นงาน GTD 111.....	85
ก.1 ผลการตรวจวิเคราะห์ขนาดอนุภาคอะลูมินา ด้วย laser particle analyzer ครั้งที่ 1.....	90
ก.2 ผลการตรวจวิเคราะห์ขนาดอนุภาคอะลูมินา ด้วย laser particle analyzer ครั้งที่ 2.....	91
ก.3 ผลการตรวจวิเคราะห์ขนาดอนุภาคอะลูมินา ด้วย laser particle analyzer ครั้งที่ 3.....	92
ข.1 ตารางที่ ข.1 Reference pattern: NiAl <sub>3</sub> .....	93
ข.2 Reference pattern: Ni <sub>2</sub> Al <sub>3</sub> .....	94
ข.3 Reference pattern: AlCr <sub>2</sub> .....	95
ข.4 Reference pattern: Al.....	96
ข.5 Reference pattern: Ni.....	97
ค.1 ค่าความหนาของชั้นเคลือบส่วนที่ 1 ในชิ้นงานนิกเกิล.....	98

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 Ternary phase diagrams ของ Ni-Ti-Al ที่อุณหภูมิ 973 และ 1573 K.....	4
2.2 โครงสร้างผลึกแบบ FCC ของเฟสแกมมา และผลึกแบบ primitive cubic ของเฟสแกมมาไพร์ม.....	5
2.3 แสดงบริเวณการเลือกวัสดุที่แตกต่างกันในเครื่องยนต์กึ่งแห้ง.....	10
2.4 แสดงความเข้มข้นของธาตุบริเวณผิวเคลือบตามความลึกผิวของโลหะพื้นแต่ละชนิด a) เหล็กกล้า Fe-30Cr, b) เหล็ก, c) นิกเกิล, d) โมลิบดีนัม ที่ผ่านการเผาที่ 1000°C / 5 ชม.....	12
2.5 แสดงกระบวนการอะลูมิเนียมในเชิง ใช้ผง Al-Ti.....	13
2.6 แสดงกระบวนการอะลูมิเนียมในเชิง ใช้ผง Al -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	14
2.7 ภาพถ่ายชิ้นงานผ่านการเคลือบผิวที่อัตราส่วน a) อะลูมิเนียมอย่างเดียว, b) Al:Ti=4:6,c) Al:Ti=6:4, d)Al:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> =4:6, e) Al:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> =6:4.....	14
2.8 ผลทดสอบ Cyclic oxidation tests ที่อุณหภูมิ a) 1066 °C และ b) 955 °C.....	16
2.9 ผลทดสอบ Short-term isothermal exposure tests ที่อุณหภูมิ a)1066 °C และ b) 1010 °C...	17
2.10 แผนภูมิเฟสไดอะแกรม ของนิกเกิล อะลูมิเนียม.....	17
2.11 ไขพัดเทอร์ไบน์ ที่ผ่านการใช้งาน 2500 ชั่วโมง (ไม่เคลือบ/เคลือบ NiAl) .....	18
3.1 แสดงขั้นตอนการทดลอง.....	21
3.2 สภาพะการทำงานของเตา Tube furnace .....	22
4.1 ภาพถ่ายชิ้นงานนิกเกิลผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิง ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 4 ชม. อัตราส่วนผสมระหว่าง Al:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> โดยน้ำหนักเป็น 5:5 ก.) ขนาดผง 42 μm ข.) ขนาดผง 3 μm.....	24
4.2 ภาพถ่ายชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบนโลหะนิกเกิล ที่ 1000°C เป็นเวลา 2.25 ชั่วโมงโดยอัตราส่วนผสม Al:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ก) 10:0, ข) 7:3 โดยน้ำหนัก.....	25
4.3 ภาพถ่ายชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบนโลหะนิกเกิล ที่ 1000°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยอัตราส่วนผสม Al:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ก) 10:0, ข) 7:3,ค) 5:5, ง) 3:7 โดยน้ำหนัก.....	25

ภาพที่	หน้า
4.4 ภาพถ่ายชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบน In 738 ที่ 1000°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยอัตราส่วนผสม Al:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ก) 10:0, ข) 7:3, ค) 5:5, ง) 3:7 โดยน้ำหนัก.....	26
4.5 ภาพถ่ายชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบน IN738 ที่ 1000°C เป็นเวลา 2.25 ชั่วโมง โดยอัตราส่วนผสม Al:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ก) 10:0, ข) 7:3, ค) 5:5, ง) 3:7 โดยน้ำหนัก.....	27
4.6 ภาพถ่ายชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบน IN 738 ที่ 1000°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยอัตราส่วนผสม Al:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ก) 10:0, ข) 7:3, ค) 5:5, ง) 3:7 โดยน้ำหนัก.....	28
4.7 ภาพถ่ายชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบน GTD 111 1000°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยอัตราส่วนผสม Al:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ก) 10:0, ข) 7:3, ค) 5:5, ง) 3:7 โดยน้ำหนัก.....	29
4.8 ภาพถ่ายชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบน GTD 111 ที่ 1000°C เป็นเวลา 2.25 ชั่วโมง โดยอัตราส่วนผสม Al:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ก) 10:0, ข) 7:3, ค) 5:5, ง) 3:7 โดยน้ำหนัก.....	30
4.9 ภาพถ่ายชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบน GTD 111 ที่ 1000°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยอัตราส่วนผสม Al:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ก) 10:0, ข) 7:3, ค) 5:5, ง) 3:7 โดยน้ำหนัก.....	31
4.10 โครงสร้างจุลภาคตัดขวางของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบนโลหะนิกเกิล ที่ 1000°C เป็นเวลา 2.25 ชั่วโมง โดยอัตราส่วนผสม Al:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ก) 10:0, ข) 7:3 โดยน้ำหนัก.....	32
4.11 โครงสร้างจุลภาคตัดขวางของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบนโลหะนิกเกิล ที่ 1000°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยอัตราส่วนผสม Al:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ก) 10:0, ข) 7:3, ค) 5:5, ง) 3:7 โดยน้ำหนัก.....	33
4.12 โครงสร้างจุลภาคตัดขวางของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบน In 738 ที่ 1000°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยอัตราส่วนผสม Al:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ก) 10:0, ข) 7:3, ค) 5:5, ง) 3:7 โดยน้ำหนัก.....	34

ภาพที่	หน้า
4.13 โครงสร้างจุลภาคตัดขวางของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิงบน In 738 ที่ 1000°C เป็นเวลา 2.25 ชั่วโมง โดยอัตราส่วนผสม Al:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ก) 10:0, ข) 7:3, ค) 5:5, ง) 3:7 โดยน้ำหนัก.....	35
4.14 โครงสร้างจุลภาคตัดขวางของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิงบน IN 738 ที่ 1000°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยอัตราส่วนผสม Al:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ก) 10:0, ข) 7:3, ค) 5:5, ง) 3:7 โดยน้ำหนัก.....	36
4.15 โครงสร้างจุลภาคตัดขวางของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิงบน GTD 111 ที่ 1000°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยอัตราส่วนผสม Al:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ก) 10:0, ข) 7:3, ค) 5:5, ง) 3:7 โดยน้ำหนัก.....	38
4.16 โครงสร้างจุลภาคตัดขวางของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิงบน GTD 111 ที่ 1000°C เป็นเวลา 2.25 ชั่วโมง โดยอัตราส่วนผสม Al:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ก) 10:0, ข) 7:3, ค) 5:5, ง) 3:7 โดยน้ำหนัก.....	39
4.17 โครงสร้างจุลภาคตัดขวางของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิงบน GTD 111 ที่ 1000°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยอัตราส่วนผสม Al:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ก) 10:0, ข) 7:3, ค) 5:5, ง) 3:7 โดยน้ำหนัก.....	40
4.18 ผลการเปรียบเทียบการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิง บนนิกเกิลที่ 1000°C เป็นเวลา 2.25 ชั่วโมง ด้วยวิธี GIXD.....	41
4.19 ผลการเปรียบเทียบการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิง บนนิกเกิลที่ 1000°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยวิธี GIXD .....	42
4.20 ผลการเปรียบเทียบการตรวจสอบชั้นเคลือบที่ความลึกต่างๆจากผิวของชิ้นงาน ผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิงบนนิกเกิล ที่ 1000°C เป็นเวลา 2.25 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนผสม Al:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> เป็น 7:3 ด้วยวิธี GIXD.....	43
4.21 ผลการเปรียบเทียบการตรวจสอบชั้นเคลือบที่ความลึกต่างๆจากผิวของชิ้นงาน ผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิงบนนิกเกิล ที่ 1000°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนผสม Al:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> เป็น 10:0 ด้วยวิธี GIXD.....	44
4.22 ผลการเปรียบเทียบการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิง บน IN 738 ที่ 1000°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ด้วยวิธี GIXD.....	45

ภาพที่	หน้า
4.23 ผลการเปรียบเทียบการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิงบน IN 738 ที่ 1000°C เป็นเวลา 2.25 ชั่วโมง ด้วยวิธี GIXD.....	46
4.24 ผลการเปรียบเทียบการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิงบน IN 738 ที่ 1000°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยวิธี GIXD .....	46
4.25 ผลการเปรียบเทียบการตรวจสอบชั้นเคลือบที่ความลึกต่างๆจากผิวของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิงบน IN 738 ที่ 1000°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนผสม Al:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> เป็น 10:0 ด้วยวิธี GIXD.....	47
4.26 ผลการเปรียบเทียบการตรวจสอบชั้นเคลือบที่ความลึกต่างๆจากผิวของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิงบน IN 738 ที่ 1000°C เป็นเวลา 2.25 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนผสม Al:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> เป็น 7:3 ด้วยวิธี GIXD.....	48
4.27 ผลการเปรียบเทียบการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิงบน GTD 111 ที่ 1000°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ด้วยวิธี GIXD.....	49
4.28 ผลการเปรียบเทียบการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิงบน GTD 111 ที่ 1000°C เป็นเวลา 2.25 ชั่วโมง ด้วยวิธี GIXD.....	50
4.29 ผลการเปรียบเทียบการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิงบน GTD 111 ที่ 1000°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยวิธี GIXD .....	51
4.30 ผลการเปรียบเทียบการตรวจสอบชั้นเคลือบที่ความลึกต่างๆจากผิวของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิงบน GTD 111 ที่ 1000°C เป็นเวลา 2.25 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนผสม Al:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> เป็น 10:0 ด้วยวิธี GIXD.....	52
4.31 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิงบน โลหะนิกเกิล ที่ 1000°C เป็นเวลา 2.25 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนผสม Al:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> เป็น 10:0 ด้วยวิธี Mapping EDS (ก.) Secondary electron, (ข.) นิกเกิล, (ค.) อะลูมิเนียม.....	53
4.32 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิงบน โลหะนิกเกิล ที่ 1000°C เป็นเวลา 2.25 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนผสม Al:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> เป็น 10:0 ด้วยวิธี Line scan EDS สีแดง แทน นิกเกิล, สีน้ำเงิน แทน อะลูมิเนียม.....	54
4.33 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบบริเวณ A ของชิ้นงาน รูปที่ 4.31 ก.) ด้วยวิธี EPMA (ก.) Secondary electron, (ข.) นิกเกิล, (ค.) อะลูมิเนียม.....	55
4.34 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิงบน โลหะนิกเกิล	

ภาพที่	หน้า
ที่ 1000°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนผสม Al:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> เป็น 7:3 ด้วยวิธี Mapping EDS ก.) Secondary electron, ข.) นิกเกิล, ค.) อะลูมิเนียม.....	56
4.35 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิงบนโลหะนิกเกิล ที่ 1000°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนผสม Al:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> เป็น 7:3 ด้วยวิธี Line scan EDS สีแดง แทน นิกเกิล, สีน้ำเงิน แทน อะลูมิเนียม.....	57
4.36 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิงบน IN 738 ที่ 1000°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนผสม Al:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> เป็น 10:0 ด้วย EDS ก.)Secondary electron, ข.) นิกเกิล, ค.) อะลูมิเนียม, ง.) โครเมียม.....	58
4.37 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิงบน IN 738 ที่ 1000°C เป็นเวลา 2.25 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนผสม Al:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> เป็น 7:3 ด้วยวิธี Mapping EDS ก.) Secondary electron, ข.) นิกเกิล, ค.) อะลูมิเนียม.....	59
4.38 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิงบน IN 738 ที่ 1000°C เป็นเวลา 2.25 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนผสม Al:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> เป็น 7:3 ด้วยวิธี Line scan EDS สีแดง แทน นิกเกิล, สีน้ำเงิน แทน อะลูมิเนียม สีเขียว แทน โครเมียม.....	60
4.39 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบบริเวณ A ของชิ้นงาน รูปที่ 4.37 ก.) ด้วย SEM.....	60
4.40 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบบริเวณ A ของชิ้นงาน รูปที่ 4.39 ด้วย SEM.....	61
4.41 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบ รูปที่ 4.40 ด้วยวิธี EPMA ก.) Secondary electron, ข.) นิกเกิล, ค.) อะลูมิเนียม, ง.) โครเมียม.....	62
4.42 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบบริเวณ B ของชิ้นงาน รูปที่ 4.39 ด้วย SEM.....	63
4.43 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบ รูปที่ 4.42 ด้วยวิธี EPMA ก.) Secondary electron, ข.) นิกเกิล, ค.) อะลูมิเนียม, ง.) โครเมียม.....	64
4.44 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิงบน IN 738 ที่ 1000°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง อัตราส่วนผสม Al:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 10:0 ด้วย SEM.....	65
4.45 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบ รูปที่ 4.44 ด้วยวิธี EPMA ก.)Secondary electron, ข.) นิกเกิล, ค.) อะลูมิเนียม, ง.) โครเมียม.....	66
4.46 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิงบน GTD 111 ที่ 1000°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนผสม Al:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> เป็น 10:0 ด้วย SEM.....	67

ภาพที่	หน้า
4.47 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิงบน GTD 111 ที่ 1000°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนผสม Al:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> เป็น 10:0 ด้วย EDS ก.)Secondary electron, ข.) นิกเกิล, ค.) อะลูมิเนียม, ง.) โครเมียม.....	68
4.48 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิงบน GTD 111 ที่ 1000°C เป็นเวลา 2.25 ชั่วโมงที่อัตราส่วนผสม Al:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> เป็น 7:3 ด้วย SEM.....	69
4.49 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิงบน GTD 111 ที่ 1000°C เป็นเวลา 2.25 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนผสม Al:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> เป็น 7:3 ด้วย EDS ก.)Secondary electron, ข.) นิกเกิล, ค.) อะลูมิเนียม, ง.) โครเมียม.....	70
5.1 ภาพถ่ายชั้นเคลือบของชิ้นงานนิกเกิลผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิง ที่ 1000°C เป็นเวลา 2.25 ชั่วโมง อัตราส่วนผสม 10:0 ด้วย SEM.....	72
5.2 แผนภูมิสมมูลระหว่างอะลูมิเนียมและนิกเกิล.....	73
5.3 ภาพถ่ายชั้นเคลือบของชิ้นงาน IN 738 ผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิง ที่ 1000°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง อัตราส่วนผสม 10:0 ด้วย SEM.....	74
5.4 Ternary phases diagram ของ Ni-Al-Cr ตัด Isothermal ที่ 1000°C.....	75
5.5 ภาพถ่ายชั้นเคลือบของชิ้นงาน IN 738 ผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิง ที่ 1000°C เป็นเวลา 2.25 ชั่วโมง อัตราส่วนผสม 10:0 ด้วย SEM.....	76
5.6 ภาพถ่ายชั้นเคลือบของชิ้นงาน GTD 111 ผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิง ที่ 1000°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง อัตราส่วนผสม 10:0 ด้วย SEM.....	77
5.7 ลักษณะชั้นเคลือบกลุ่มที่ 1 ที่เกิดบนโลหะนิกเกิล.....	79
5.8 ลักษณะชั้นเคลือบกลุ่มที่ 2 ที่เกิดบนโลหะนิกเกิล.....	79
5.9 กลไกการเกิดชั้นเคลือบบนโลหะนิกเกิล.....	81
5.10 กลไกการเกิดชั้นเคลือบบนโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นนิกเกิลเกรด IN 738 .....	82
5.11 กลไกการเกิดชั้นเคลือบบนโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นนิกเกิลเกรด IN 738 .....	83



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันระบบเครื่องจักรเชื้อเพลิงจากก๊าซธรรมชาติที่ใช้งานในการผลิตกระแสไฟฟ้า มีความสำคัญยิ่ง เนื่องด้วยมลพิษที่เกิดจากเครื่องจักรเชื้อเพลิงธรรมชาติมีปริมาณต่ำกว่า การผลิตจากเชื้อเพลิงชนิดอื่น เช่น ถ่านหิน และน้ำมัน เป็นต้น และด้วยระบบที่มีประสิทธิภาพสูง ของเครื่องจักรเชื้อเพลิงธรรมชาติ จึงจำเป็นต้องใช้ชิ้นส่วนเครื่องจักรที่มีสัณฐานและเหมาะสม กับการใช้งาน ชิ้นส่วนที่มีความสำคัญในระบบเครื่องจักรคือ ใบพัดกังหันก๊าซ ซึ่งจำเป็นต้อง ดำเนินงานที่อุณหภูมิสูงอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน โลหะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งาน นี้ได้แก่ โลหะผสมพิเศษ นิกเกิล (Nickel base Superalloys) และ โลหะผสมพิเศษ โคบอลต์ (Cobalt base Superalloys) สำหรับ การทำงานของชุดใบพัดกังหันที่จำเป็นต้องได้รับการปรับปรุงเร่งด่วน เพื่อลดภาระการบำรุงรักษา และมูลค่าอะไหล่ทดแทนในระบบหมุนคือ ใบพัดกังหันก๊าซ โลหะผสมพิเศษนิกเกิลเนื่องจากสภาพ การใช้งานที่รุนแรงภายใต้อุณหภูมิสูงทำให้เกิดปัญหาขึ้นกับการใช้งาน โลหะผสมพิเศษนิกเกิล คือ การเสื่อมสภาพเนื่องจากการเกิดออกซิเดชัน และการกัดกร่อนเนื่องจากการใช้งานที่อุณหภูมิสูงเป็น เวลานาน การเสื่อมสภาพดังกล่าวมีผลโดยตรงต่อสมบัติทางกล และความเสี่ยงต่อการเกิดความเสียหายที่สูงขึ้นขณะใช้งาน

ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้นจึงทำให้อายุการใช้งานของใบพัดกังหันก๊าซมีอยู่อย่างจำกัด เนื่องจากในอดีตที่ผ่านมาแนวทางการซ่อมบำรุงชิ้นส่วนเหล่านี้ใช้การเปลี่ยนชิ้นส่วนใหม่เป็นหลัก เพื่อความมั่นใจในการใช้งาน เมื่อผู้ประเมินพิจารณาว่าใบพัดกังหันดังกล่าวมีความไม่เหมาะสม ที่จะ ใช้งานต่อไป การแก้ปัญหาจึงมีเพียงการเปลี่ยนใบพัดกังหันใบใหม่ หรือการเปลี่ยนทั้งชุด เท่านั้น ซึ่งโลหะผสมพิเศษนิกเกิลมีราคาที่สูงและมีช่วงอายุการใช้งานประมาณ 50,000-100,000 ชั่วโมง นับได้ว่าเป็นการสิ้นเปลืองมากในการต้องนำเข้าไปใบพัดกังหันที่ทำจากโลหะผสมพิเศษ นิกเกิล ต่อปี เพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า

ในปัจจุบันวิศวกรและนักวิจัยในประเทศได้ให้ความสนใจในการทำวิจัยเกี่ยวกับโลหะที่ ใช้งานที่อุณหภูมิสูงมากขึ้น จึงได้มีเริ่มมีการศึกษาแนวคิดการเพิ่มอายุการใช้งานของใบพัดกังหัน ก๊าซที่ทำจากโลหะผสมพิเศษนิกเกิล เพื่อเพิ่มสมบัติการต้านทานการเกิดออกซิเดชันและ hot corrosion วิธีการหนึ่งทำได้คือการเคลือบผิวโลหะผสมพิเศษนิกเกิลด้วยวิธี อะลูมิเนียมในซิง เนื่องด้วย อะลูมิเนียม (Aluminium) ถือได้ว่าเป็นโลหะที่มีความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชัน และ hot corrosion สูง และสารประกอบระหว่าง อะลูมิเนียม และ นิกเกิล ซึ่งมีจุดหลอมเหลวที่สูง จะช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนในโลหะผสมพิเศษนิกเกิลได้

ในปัจจุบันการทำ powder liquid coating ถือได้ว่าเป็นทางเลือกใหม่ในการทำ อะลูมิเนียมในเชิง เพื่อปรับปรุงคุณภาพของโลหะเพื่อให้สามารถใช้งานได้ระยะเวลาที่ยาวนานขึ้น โดยได้มีผู้นำวิธีการเคลือบผิวแบบ powder liquid coating มาใช้งานกับชิ้นงานที่ใช้เหล็กเป็นวัสดุพื้น งานวิจัยในครั้งนี้จึงศึกษาถึงความเป็นไปได้และผลของตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นกับการขึ้นงานซึ่งเป็นโลหะผสมพิเศษชนิด IN 738 และ GTD 111 ผ่านการใช้งานจาก เครื่องยนต์ กังหันก๊าซในการผลิตกระแสไฟฟ้า จากการผลิตไฟฟ้าฝ่ายผลิต แห่งประเทศไทย หลังผ่านการเคลือบผิวด้วยวิธี powder liquid coating เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงสมบัติ เพิ่มอายุการใช้งานลดต้นทุนการเปลี่ยนชิ้นส่วนใหม่ ตลอดจนเป็นส่วนสำคัญในการวางแผนการ ซ่อมบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (preventive maintenance) ให้สอดคล้องกับ การดำเนินการบำรุงรักษา เครื่องจักร ได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาความเป็นไปได้ในการทำ อะลูมิเนียมในเชิง โดยวิธี powder liquid coating บน Nickel Base Superalloys รวมทั้งชนิดของสารประกอบหรือเฟสต่างๆที่เกิดขึ้นที่ผิวชิ้นงาน

1.2.2 ศึกษาผลของเวลา และ อัตราส่วนของผงอะลูมิเนียม ต่อผงของอะลูมินาในการเคลือบผิวต่อความหนาชั้นเคลือบ ชนิดของเฟสและสารประกอบที่เกิดขึ้นจากการเคลือบผิว โดยวิธี powder liquid coating

## 1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 ทำ อะลูมิเนียมในเชิงโดยวิธี Powder liquid coating บน IN 738 และGTD 111 โดยใช้ อัตราส่วนผสม  $Al:Al_2O_3=10:0, 7:3, 5:5$  และ  $3:7$  ที่อุณหภูมิ  $1000^{\circ}C$  โดยใช้เวลา 1, 2.25 และ 4 ชม.

1.3.2 ศึกษาโครงสร้างจุลภาค และเฟส ของสารประกอบหลังการทำ อะลูมิเนียมในเชิง

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงผลและปัญหาที่เกิดขึ้นในการเคลือบผิวชิ้นงาน Nickel Base Superalloys ด้วยอะลูมิเนียมในกระบวนการเคลือบผิวแบบ powder liquid coating

1.4.2 ทราบถึงผลของเวลา ต่อชนิดของสารประกอบที่เกิดขึ้นหลังการทำ อะลูมิเนียมในเชิง

1.4.4 ทราบถึงผลของอัตราส่วนระหว่างผงอะลูมิเนียม ต่อผงอะลูมินาที่ส่งผลต่อ การเคลือบ และผิวเคลือบ รวมถึงชั้นของสารประกอบ

1.4.5 สามารถนำข้อมูลที่ได้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการพิจารณาถึงการปรับปรุงสมบัติของ Nickel Base Superalloys ด้วยวิธีการแบบ powder liquid coating



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

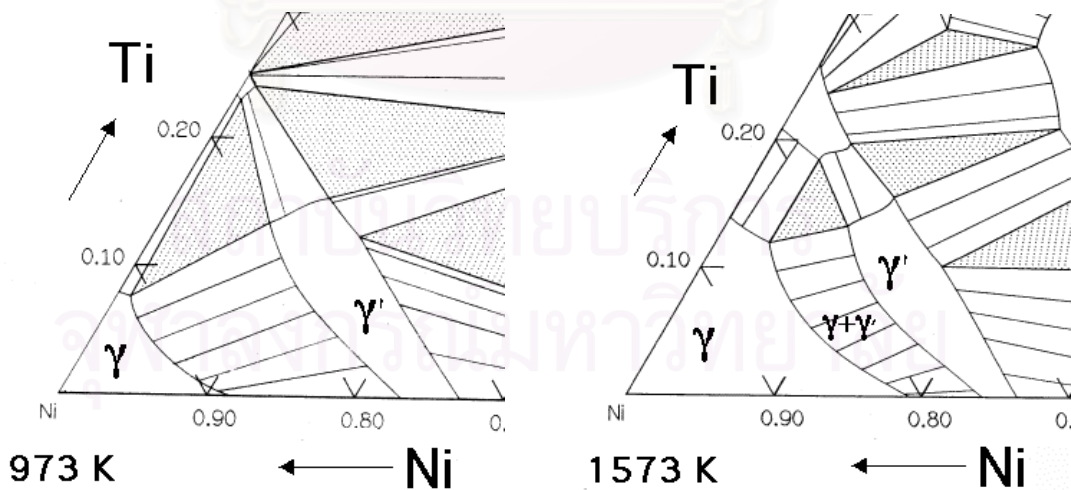
## บทที่ 2 ปริทรรศน์วรรณกรรม

### 2.1 โลหะผสมพิเศษนิกเกิล

#### 2.1.1 โครงสร้างจุลภาค [1-3]

โลหะผสมพิเศษ (superalloys) ถือเป็นโลหะผสมที่มีลักษณะเด่นคือ สามารถนำไปใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ถึงประมาณ 0.7 ของอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของโลหะผสม มีความสามารถในการทนต่อการคืบ ทนต่อการเกิดออกซิเดชันได้อย่างดีเยี่ยม โลหะผสมพิเศษมีทั้งที่มีเนื้อพื้นเป็น เหล็ก โคบอลต์ หรือ นิกเกิล ซึ่งโลหะผสมพิเศษที่มีเนื้อพื้นเป็นนิกเกิลนั้นถือได้ว่าเป็นทางเลือกที่ดีที่สุดในการนำมาใช้งานในระบบเครื่องยนต์กังหันก๊าซ[1] เช่นพวก turbine blades

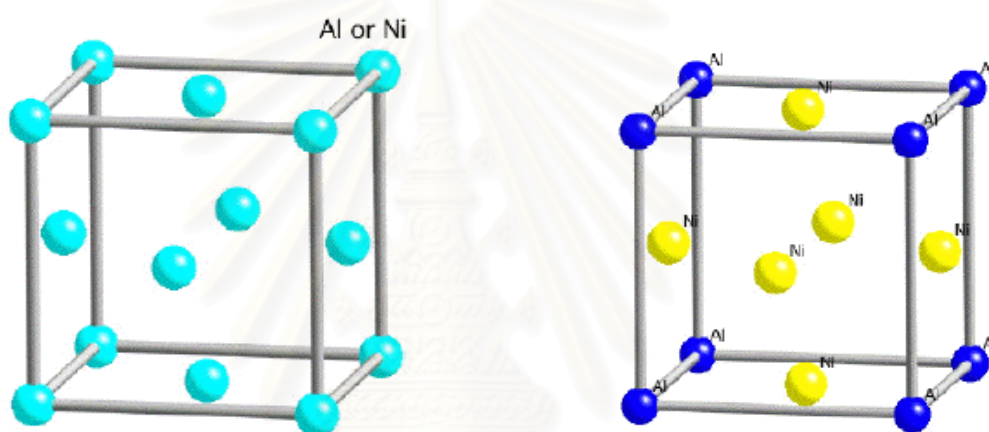
โดยทั่วไปโลหะผสมพิเศษนิกเกิล มีโลหะผสมตัวหลักอื่นที่จำเป็นได้แก่ อะลูมิเนียม และ ไทเทเนียม อยู่ในปริมาณรวมกันไม่น้อยกว่า 10 อะตอมเปอร์เซ็นต์ เพื่อที่จะเป็นตัวทำให้เกิดโครงสร้างแบบ two-phase equilibrium ซึ่งประกอบไปด้วย แกมมา ( $\gamma$ ) และ แกมมาไพรม์ ( $\gamma'$ ) ซึ่งเฟสแกมมาไพรม์นี้ที่เป็นตัวทำให้โลหะผสมพิเศษนี้มีความแข็งแรงที่ดีในขณะที่ใช้งานที่อุณหภูมิสูง อีกทั้งยังเป็นส่วนช่วยให้โลหะสามารถต้านทานการคืบได้เพิ่มขึ้นด้วย โดยที่จำนวนของแกมมาไพรม์ นั้นจะขึ้นอยู่กั บส่วนประกอบทางเคมี และอุณหภูมิ ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 Ternary phase diagrams ของ Ni-Ti-Al ที่อุณหภูมิ 973 และ 1573 K [1]

Ternary phase diagrams ของ Ni-Ti-Al ด้านบนแสดงบริเวณของแกมม่าและแกมม่าไพร์มที่แตกต่างกันตามส่วนประกอบทางเคมี และอุณหภูมิ โดยที่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิพบว่าบริเวณของแกมม่าไพร์มจะมีพื้นที่ลดลงขึ้น แสดงให้เห็นว่าถ้าอุณหภูมิสูงเพียงพอเฟสแกมม่าไพร์มละลายได้จากลักษณะดังกล่าวนี้เอง ได้แสดงให้เห็นว่าวัสดุชนิดนี้สามารถบ่มแข็ง (aging) ได้ซึ่งที่อุณหภูมิที่ต่ำ จะทำให้เฟสแกมม่าไพร์มมีขนาดเล็กและกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ

เฟสแกมม่าเป็นเฟสสารละลายของแข็งที่มีแลตทิซแบบ face centered cubic (FCC) โดยอะตอมที่จัดเรียงตัวในแลตทิซนี้เป็นได้ทั้งอะตอมของอะลูมิเนียมหรืออะตอมของนิกเกิล



รูปที่ 2.2 โครงสร้างผลึกแบบ FCC ของเฟสแกมม่า และผลึกแบบ primitive cubic ของเฟสแกมม่าไพร์ม[1]

ส่วนแกมม่าไพร์มนั้นจะเป็นเฟสสารละลายของแข็งที่มีแลตทิซแบบ primitive cubic โดยมีอะตอมของนิกเกิลอยู่ตามหน้าของลูกบาศก์ (face-center) และมีอะตอมของอะลูมิเนียม หรือไทเทเนียม อยู่ตามมุมของลูกบาศก์ (cube corner) ซึ่งคล้ายกับโครงสร้างของเนื้อโลหะพื้นมาก โดยความคล้ายนี้มีผลทำให้มีพลังงานที่ผิวหน้าต่ำและมีเสถียรภาพที่ยาวนาน[2] โดยที่อะตอมจะมีการจัดเรียงตัวตามสูตรเคมี  $Ni_3(Al,Ti)$  อย่างไรก็ตามในโลหะผสมพิเศษนี้อาจพบบริเวณที่เป็นขอบของรอยต่อระหว่างเฟสแกมม่า+แกมม่าไพร์ม กับ เฟสแกมม่าไพร์ม ซึ่งบริเวณนี้จะไม่ stoichiometric ที่แน่นอนและพบ ช่องว่าง (Vacancy) ที่เกินมาบริเวณแลตทิซย่อย (sub lattices)

โครงสร้างจุลภาคอีกแบบที่พบได้ในโลหะผสมพิเศษนิกเกิลคือคาร์ไบด์ (Carbide) โดยมีส่วนผสมทางเคมีเป็น  $MC$ ,  $M_{23}C_6$  หรือ  $M_6C$  คาร์ไบด์เป็นเฟสที่มีความแข็งและเปราะ การกระจาย

ตัวของคาร์ไบด์ตามขอบเกรนจึงส่งผลต่อความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง ของโลหะผสมพิเศษนิกเกิลเป็นอย่างมาก โลหะกลุ่มนี้มีปริมาณคาร์บอนอยู่ที่ประมาณ 0.2-0.02% นั้นเองจึงส่งผล ให้เกิดคาร์ไบด์ทั้งในเกรนและตามขอบเกรน

ปริมาณคาร์ไบด์ตามขอบเกรนที่น้อยจะส่งผลต่อความแข็งแรงคือจะเกิดการรวมตัวกันของช่องว่าง (Voids) เมื่อนำไปใช้งานที่อุณหภูมิสูง จะเกิดการเลื่อนของขอบเกรนทำให้ความแข็งแรงลดลงได้ แต่หากว่าปริมาณคาร์ไบด์ที่ต่อเนื่องตามขอบเกรนจะส่งผลต่อการแตกหัก ซึ่งเกิดจากการเลื่อนตัวของขอบเกรนถูกขัดขวางจนเกิดความเค้นที่สูงเกินนำไปสู่การแตกหักก่อนเวลาอันควรได้ ทางที่ดีคือควรให้คาร์ไบด์เชื่อมต่อกันอย่างไม่ต่อเนื่องเพื่อเป็นการขัดขวางการแตกที่ขอบเกรน ซึ่งชนิดของคาร์ไบด์ที่พบได้ในโลหะผสมพิเศษนิกเกิลมีดังนี้ [3]

MC	ซึ่ง M ได้แก่ ไทเทเนียม แทนทาลัม โคบอลต์ ทังสแตน พบว่าคาร์ไบด์เหล่านี้มีเสถียรภาพและเกิดขึ้นในช่วงแรกของการแข็งตัว MC ที่ไม่ต้องการจะมีลักษณะเป็น large blocky carbide
$M_{23}C_6$	ซึ่ง M ได้แก่ โครเมียม อาจแทนที่ด้วยเหล็ก ทังสแตน โมลิบดีนัมปริมาณเล็กน้อย $M_{23}C_6$ มักเกิดระหว่างการทำการอบชุบทางความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ หรือระหว่างการใช้งานที่อุณหภูมิ 760-980 องศาเซลเซียส บางกรณีอาจเกิดจากการสลายตัวของ MC และมักเกิดตามขอบเกรน
$M_6C$	คล้ายกับ $M_{23}C_6$ แต่มักเกิดที่อุณหภูมิที่สูงกว่าคือช่วงอุณหภูมิ 815-980 องศาเซลเซียส และเกิดได้เมื่อปริมาณของ โมลิบดีนัมและทังสแตนมาก แต่หากมีปริมาณที่มากกว่า 6-8% จะเกิดคาร์ไบด์ $M_6C$ รวมตัวกับ $M_{23}C_6$ ที่ขอบเกรน

สำหรับโลหะผสมพิเศษนิกเกิล IN 738 และ GTD 111 นั้นมีเฟสแกมมาแลดทิตซ์เป็น FCC เป็นเนื้อพื้น และมีเฟสสารละลายของแข็งแกมมาไพร์มเป็นเฟสที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงเช่นกัน และยังสามารถพบคาร์ไบด์และเฟสเปราะอื่นๆตกตะกอนอยู่ตามเนื้อพื้นได้เช่นเดียวกับโลหะเนื้อพื้นนิกเกิลทั่วไปแต่ไม่บ่อยนัก

### 2.1.2 ความแข็งแรง กับ อุณหภูมิ [1]

ความแข็งแรงของโลหะต่างๆไปนั้นจะลดลงเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิที่สูงขึ้น อันเป็นผลเนื่องมาจาก อุณหภูมิที่สูงขึ้นเป็นตัวกระตุ้นให้ดิสโลเคชันสามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น เช่นเดียวกัน

กับโลหะพิเศษเนื้อพื้นนิเกิลทั่วไป IN 738 และ GTD 111 มีความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงเนื่องด้วยมีแกมมาไพร์มอยู่คอยขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน ดังนั้นการลดลงของความแข็งแรงของโลหะผสมพิเศษนิเกิลจึงไม่ไวต่อการกระตุ้นจากอุณหภูมิมากนัก

โดยทั่วไปโลหะผสมพิเศษนิเกิลมักใช้งานที่ช่วงอุณหภูมิ 1033-1253 K โดยที่โลหะผสมพิเศษนิเกิลที่ผ่านการหล่อจะมีความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง ดีกว่าโลหะผสมพิเศษนิเกิลที่ผ่านการรีด แต่หากต้องการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำกว่าโลหะผสมพิเศษนิเกิลผ่านการรีด สามารถจะให้ความแข็งแรงที่สูงได้เช่นกัน โดยใช้เฟสแกมมาดับเบิลไพร์ม ( $\gamma''$ ) ซึ่งเฟสนี้จะเกิดขึ้นในโลหะผสมพิเศษนิเกิลที่ผสมไนโอเบียม หรือ วาเนเดียม โดยที่สูตรทางเคมีของ แกมมาดับเบิลไพร์มจะเป็น  $Ni_3Nb$  หรือ  $Ni_3V$  และอยู่ในรูปของแผ่นโครงสร้างของแกมมาดับเบิลไพร์มจะเป็นการจัดเรียงตัวของอะตอมนิเกิล กับอะตอมไนโอเบียมแบบ body centered tetragonal (BCT) โดยที่ค่าแลตทิซพารามิเตอร์จะมีค่าประมาณ  $a=0.362$  และ  $c=0.741$  นาโนเมตร

### 2.1.3 ส่วนผสมทางเคมี

โลหะผสมเนื้อพื้นนิเกิลทั่วไปจะไม่ได้มีเพียงแค่นิเกิล อะลูมิเนียม ไทเทเนียม เท่านั้นยังมีโครเมียม ที่เป็นตัวช่วยในเรื่องด้านทานการออกซิเดชัน(รวมทั้งอะลูมิเนียมด้วย), อิทเทียม ในปริมาณเล็กน้อยเพื่อช่วยให้ออกไซด์สเกลยึดเกาะกับเนื้อพื้นได้ดียิ่งขึ้น โบรอน และเซอร์โคเรียม เป็นธาตุผสมที่ตกตะกอนตามขอบเกรน ช่วยในเรื่องของความแข็งแรงของขอบเกรน ช่วยเพิ่มความต้านทานการคืบและเพิ่มความเหนียวแน่น (ductility) โดยการลดอัตราการแพร่ (diffusion) ที่ขอบเกรน

อีกทั้งธาตุต่างๆที่เติมลงไปยังช่วยในเรื่องของการฟอร์มตัวของคาร์ไบด์ (C, Cr, Mo, W, Nb, Ta, Ti และ Hf) ซึ่งคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นจะเป็นตัวลดการเคลื่อนที่ของเกรนได้ดี ธาตุผสมอันได้แก่ โคบอลต์ เหล็ก โครเมียม ไนโอเบียม เทนทาลัม โมลิบดีนัม ทังสแตน วาเนเดียม ไทเทเนียม และอะลูมิเนียม จะเป็นตัวช่วยในการเพิ่มกลไกความแข็งแรงแบบสารละลายของแข็ง (solid solution strengthener) ทั้งในแกมมา และ แกมมาไพร์ม

ทั้งนี้แม้ว่าธาตุที่ช่วยเติมลงไปจะช่วยเสริมความแข็งแรงของโลหะผสมพิเศษเหล่านี้ แต่ยังมีข้อจำกัดในเรื่องของความเข้มข้นของปริมาณที่จะเติมลงไปด้วย เนื่องจากว่าธาตุที่เติมลงไปปริมาณมากไปอาจก่อให้เกิดเฟสที่ไม่ต้องการส่งผลให้เกิดความเปราะขึ้นได้ โดยธาตุเหล่านี้จะ

ก่อให้เกิดเฟสที่เรียกว่า embrittle เฟสได้แก่ laves เฟส และ Sigma เฟส เนื่องจากเฟสเหล่านี้มักเกิดที่ขอบเกรนเป็นลักษณะ แผ่นปลายแหลมเป็นต้นเหตุให้เกิดรอยร้าว

ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมพิเศษนิกเกิล GTD 111 และ IN 738 [4]

% wt. ธาตุ	Ni	Cr	Co	Ti	Al	W	Mo	Ta	C	Fe	B
GTD 111	Bal.	13.5	9.5	4.75	3.3	3.8	1.53	2.7	0.09	0.23	0.01
IN 738	Bal.	16.0	8.5	3.4	3.4	2.6	1.75	2.65	0.11	-	-

สำหรับส่วนผสมทางเคมีของ IN 738 และ GTD 111 ทั้งสองชนิดมีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก ดังตารางที่ 2.1 ซึ่งเมื่อพิจารณาแล้วจะพบว่าสำหรับ GTD 111 มีปริมาณของ ทังสแตน ไทเทเนียม และ แแทนทาลัม มากกว่า แต่มีปริมาณ โครเมียม และ ไนโอเบียม ต่ำกว่า IN 738 ธาตุผสมต่างๆมีผลดังต่อไปนี้ [3]

- นิกเกิล เป็นส่วนของโครงสร้างพื้นฐานแบบออสเทนไนต์ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ทนความร้อน ช่วยให้เกิดการละลายของธาตุผสมแต่งโดยไม่ให้เกิดเฟสที่เป็นอันตราย (Detrimental Phase)
- โครเมียม ช่วยเพิ่มความต้านทานการเกิดออกซิเดชันและการกร่อนที่อุณหภูมิสูง โดยที่โครเมียมจะทำให้เกิดฟิล์มป้องกัน  $Cr_2O_3$  ขึ้น นอกจากนี้โครเมียมยังเป็นธาตุที่ก่อให้เกิด Solid Solution Strengthening ซึ่งทำให้โลหะผสมพิเศษนิกเกิลมีความแข็งแรงมากขึ้น และยังรวมตัวกับคาร์บอนเกิดเป็นคาร์ไบด์ที่ขอบเกรนทำให้เกิดความแข็งแรงที่ขอบเกรน แต่หากมีปริมาณที่มากเกินไปส่งผลให้  $\gamma'$  Solvus Temperature ต่ำ และอุณหภูมิที่ทนต่อแรงดึงสูงสุดลดลง
- คาร์บอน เป็นส่วนประกอบของคาร์ไบด์ โดยการก่อตัวของ Cr, Mo, W, V, Nb, Ta และ Ti เป็น MC,  $M_{23}C_6$ ,  $M_6C$



- โคบอลต์ ก่อให้เกิด Solid Solution Strengthening ปรับปรุงความสามารถในการใช้งาน ที่อุณหภูมิสูง และช่วยเพิ่ม  $\gamma'$  Solvus Temperature
- อะลูมิเนียม เพิ่มความต้านทานการเกิดออกซิเดชันเนื่องจากอะลูมิเนียมจะก่อเป็นฟิล์มป้องกัน  $Al_2O_3$  ทำให้เกิดการตกตะกอนของ  $\gamma'$  สูตรทางเคมีเป็น  $Ni_3(Al,Ti)$  ทำให้ rupture strength สูงขึ้น หากมีอยู่มากเกินไปทำให้เกิด Oxide Film และ Segregation ในเนื้อโลหะบริเวณขอบเกรนทำให้การขึ้นรูปทำได้ยาก
- ไทเทเนียม เพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูง และก่อให้เกิด MC คาร์ไบด์เป็น TiC ทำให้เกิดการตกตะกอนของ  $\gamma'$  และมีแนวโน้มนับจับตัวกับไนโตรเจนเป็น TiN หากมีมากเกินไปทำให้การขึ้นรูป ทำได้ยากขึ้นเช่นเดียวกับอะลูมิเนียม
- โมลิบดีนัมและทังสเตน ทำให้เกิด Solid Solution Strengthening ที่อุณหภูมิสูง และก่อให้เกิด คาร์ไบด์ชนิด  $M_6C$  ที่ขอบเกรนให้เพิ่มความแข็งแรงของโลหะเพิ่มมากขึ้น และยังช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูง หากมีอยู่มากเกินไป ทำให้เกิด Carbide Precipitation มากเกินไปส่งผลให้ความสามารถในการขึ้นรูป ลดลง
- แทนทาลัม ทำให้เกิด Solid Solution Strengthening เกิด MC คาร์ไบด์ และตกตะกอนของ  $\gamma'$
- เหล็ก ช่วยเพิ่มโครงสร้างพื้นเป็น FCC ออสเทนไนต์ และช่วยเพิ่มความหนาแน่น
- โบรอน มีแนวโน้มนับที่จะก่อให้เกิดการรวมตัวของธาตุที่ขอบเกรน และก่อตัวเป็น โบไรด์ สามารถปรับปรุง Rupture Life ได้แม้ความเหนียวเพิ่มขึ้น

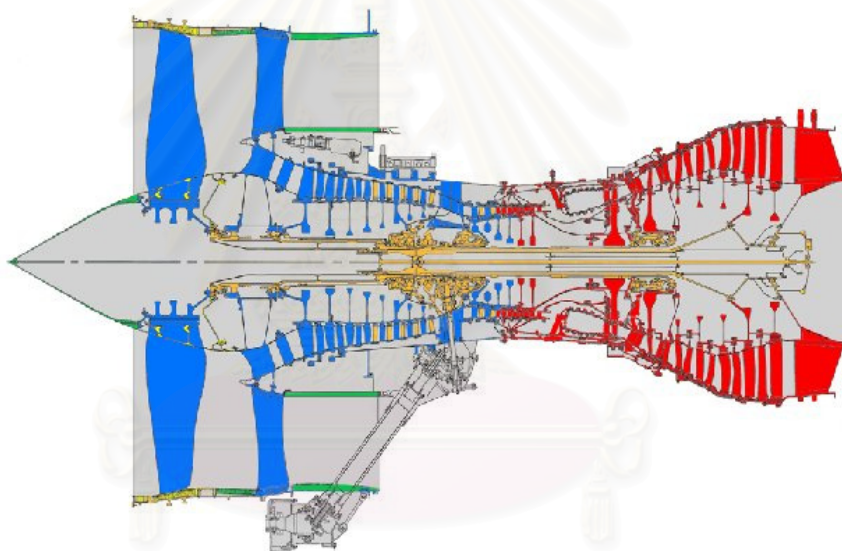
#### 2.1.4 การใช้งาน

ประโยชน์การใช้งานหลักของโลหะผสมพิเศษนิกเกิล คือใช้เป็นใบพัดกังหันก๊าซเทอร์ไบน์ (Turbine blades) ในการทำงานของเครื่องยนต์อากาศยาน และเครื่องยนต์กังหันก๊าซ ซึ่งต้องทำงาน ที่อุณหภูมิสูงกว่า 600 องศาเซลเซียส

ส่วน turbine discs นั้นสมบัติที่ต้องการของ discs เหล่านี้คือ ต้องทนต่อการแตกหัก เนื่องจากความล้าได้ดี ชิ้นส่วนเหล่านี้จึงมักขึ้นรูปโดยการหล่อแล้วจึงชุบขึ้นรูป Turbochargers เป็น ชิ้นส่วนซึ่งต้องสัมผัสกับทั้งอากาศและเชื้อเพลิงเป็นตัวช่วยส่งกำลังไปให้เครื่องยนต์ ลักษณะพิเศษ ที่จำเป็นต่อชิ้นส่วนนี้คือ ต้องแข็งแรงพอที่จะสามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงและทนต่อ การเกิด ออกซิเดชันได้ดีอีกด้วย

เนื่องด้วยเครื่องยนต์กังหันก๊าซ มีโครงสร้างการใช้งานที่แตกต่างกันอย่างมาก ทั้งในด้าน อุณหภูมิ และความดัน วัสดุที่ประกอบกันเป็นเครื่องยนต์จึงต้องแตกต่างกันตามแต่ละส่วนเช่นกัน โดยแสดงดังรูปที่ 2.3 โดยที่บริเวณสีน้ำเงินในรูปจะใช้วัสดุจำพวกไทเทเนียมเนื่องจากต้องการข้อดี ในเรื่อง ความแข็งแรง และน้ำหนัก แต่อุณหภูมิไม่สูงมากนัก โดยที่บริเวณสีแดง คือบริเวณที่ต้องใช้ งานที่อุณหภูมิสูงจึงเลือกใช้ โลหะผสมพิเศษนิกเกิล ส่วนบริเวณสีส้มจะเลือกวัสดุจำพวกเหล็กกล้า ไร้สนิม เนื่องจากเป็นชิ้นส่วนที่ไม่ต้องการน้ำหนักเบา และไม่ต้องการการทนความร้อนที่สูงนัก [2]

โลหะผสมพิเศษนิกเกิล IN 738 นั้นได้มีการนำมาใช้เป็นวัสดุพื้นฐานในการผลิตเป็นใบพัด ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ ตั้งแต่ช่วงต้นของศตวรรษที่ 1970 โดยได้มีการนำมาใช้กันอย่าง แพร่หลายเนื่องด้วยสมบัติที่สามารถต้านทานการคืบ (creep) และต้านทานการออกซิเดชันได้ดี นั้นเอง สำหรับ GTD 111 ได้มีการพัฒนาและนำมาใช้ใน ช่วงปี ค.ศ. 1984 [4]



รูปที่ 2.3 แสดงบริเวณการเลือกวัสดุที่แตกต่างกันในเครื่องยนต์กังหันก๊าซ [2]

เมื่อมีการนำโลหะผสมพิเศษนิกเกิลมาใช้ที่อุณหภูมิสูงเช่นนี้ แม้ว่าโลหะชนิดนี้จะมี ความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงอยู่มากแต่ปัญหาที่พบได้เมื่อใช้งานไปเป็นระยะเวลา นานคือความเสื่อมสภาพ ที่เกิดขึ้นได้ ทำให้ต้องมีการเคลือบผิวโลหะซึ่งการเคลือบผิวทำได้สองลักษณะ หนึ่งคือการเคลือบ กันความร้อน (Thermal barrier Coating) เช่นการเคลือบผิวโดย Thermal Spray ซึ่งเป็นการทำให้ วัสดุเคลือบเกาะติดกับวัสดุพื้น โดยวิธีการทางกล และสองเป็นการเคลือบกันออกซิเดชัน เช่นการทำ Pack Cementation และ Powder Liquid Coating

## 2.2 วิธีการเคลือบผิวเพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชัน

เป็นวิธีการที่ทำเพื่อช่วยปรับปรุงคุณภาพพื้นผิวของวัสดุ โดยการนำวัสดุอื่นเข้าไปเกาะยึดกับพื้นผิวเดิม วิธีการเคลือบผิววัสดุมีอยู่ด้วยกันหลายวิธีด้วยกัน วิธีที่ใช้แบบหนึ่งคือ อะลูมิเนียมซิง เป็น Thermal Chemical Treatment โดยเป็นการเพิ่มปริมาณอะลูมิเนียมที่ผิวโดยอาศัยการแพร่ของอะลูมิเนียม

### 2.2.1 Pack Cementation

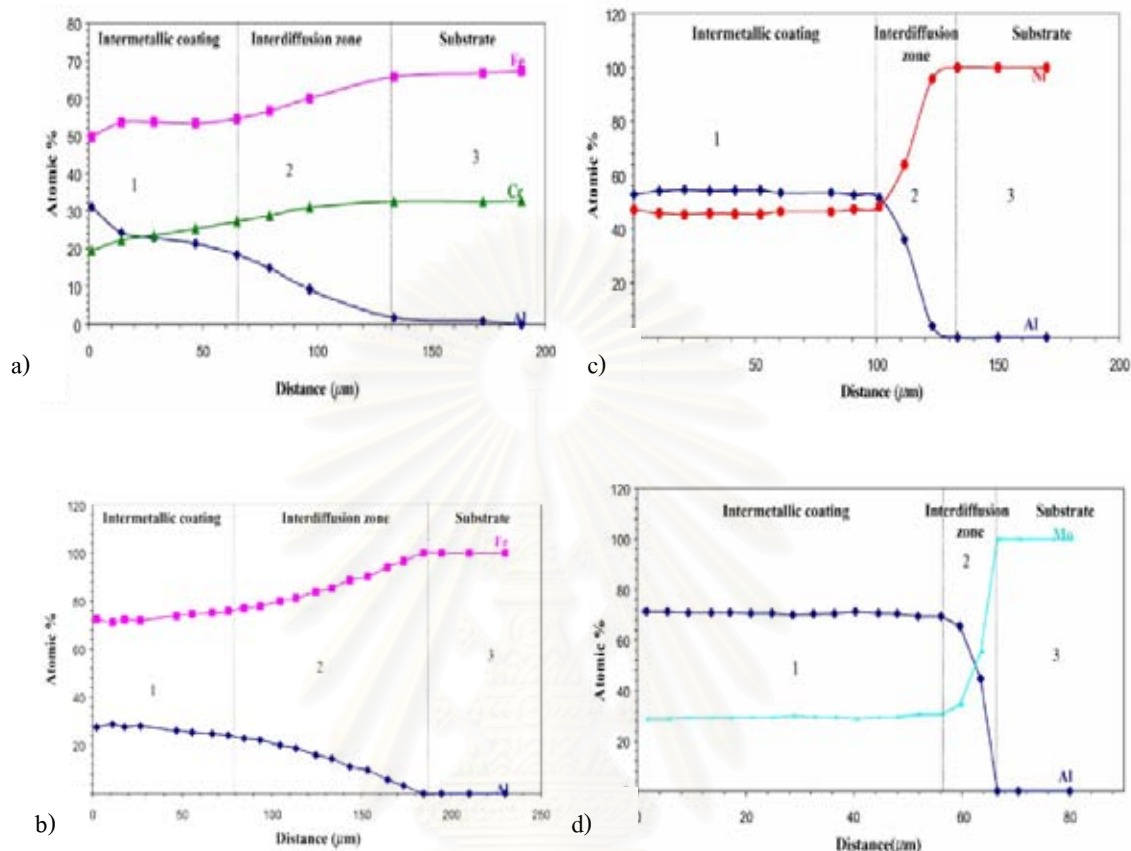
การเคลือบผิวแบบนี้ทำได้โดยการนำชิ้นงานที่ต้องการเคลือบฝังลงในผงของโลหะที่ต้องการ เคลือบบนผิวชิ้นงานที่รวมอยู่กับตัวกระตุ้น เมื่อนำไปให้ความร้อนแล้ว ผงโลหะจะทำปฏิกิริยากับ ตัวกระตุ้นทำให้โลหะที่ต้องการเคลือบกลายเป็นไอแพร่เข้าสู่ชิ้นงานได้ ซึ่งวิธีการนี้สามารถใช้ได้กับ โลหะที่มีเนื้อพื้นเป็นเหล็ก หรือเนื้อพื้นเป็นโลหะผสมพิเศษอื่นๆ ดังการทดลองของ L. Levin และคณะ[6] โดยใช้ส่วนผสมของแพคเป็น ผงอะลูมินา  $\text{NH}_4\text{Cl}$  และผงอะลูมิเนียมเคลือบบนผิวชิ้นงาน โดยต้องการให้เกิดสารประกอบเชิงโลหะในรูป เหล็กอะลูมิเนียม (Al-Fe) ที่มีความต้านทานในการกัดกร่อนเป็นอย่างดีที่อุณหภูมิสูง ซึ่งสารประกอบที่เกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะ คือ สารประกอบที่มีอะลูมิเนียมสูงอยู่ในรูป  $\text{FeAl}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  ซึ่งมีชั้นผิวที่เปราะ อีกทั้งลดความต้านทานในการกัดกร่อนซึ่งไม่เป็นที่ต้องการ และสารประกอบที่ต้องการคือสารประกอบที่มีเหล็กสูง มีสมบัติต้านทานการกัดกร่อนที่ดีและสมบัติทางกลดีด้วย ผลที่ได้จากการเคลือบผิวของเหล็กคือ โครงสร้างที่เกิดขึ้น  $\text{FeAl}$  ซึ่งเป็นผิวด้านนอกซึ่งเป็นเฟสที่มีความต้านทานในการกัดกร่อนที่ดี และมีสมบัติทางกลที่ดีด้วย

ส่วน C. Houngrinou และคณะ[7] ได้ทำการทดลองเคลือบอะลูมิเนียม ลงบนโลหะพื้นอันได้แก่ เหล็ก นิกเกิล และ โมลิบดีนัม ใช้ผงอะลูมินา  $\text{NH}_4\text{Cl}$  และผงอะลูมิเนียม เป็นส่วนผสมใน คูซิเบิ้ลที่ทำจากอะลูมินา ทำการทดลองในรีแอกเตอร์ที่เป็นควอร์ต ควบคุมบรรยากาศโดยก๊าซอาร์กอน ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 900 และ 1000 องศาเซลเซียส ผลการทดลองปรากฏว่าสามารถทำการเคลือบอะลูมิเนียม โดยวิธี pack cementation ลงบนโลหะพื้นทุกชนิดได้ในขั้นตอนเดียว ซึ่งจะเกิดชั้นเคลือบของเนื้อพื้นทุกชนิดเป็น 3 ชั้น ดังรูปที่ 2.4(a-d)

โดยที่ชั้นเคลือบนอกสุดของเหล็กกล้า และเหล็ก จะมีโครงสร้างจุลภาคเป็น  $\text{FeAl}$  และ  $\text{Fe}_3\text{Al}$  และเป็น  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  และ  $\text{NiAl}$  สำหรับนิกเกิล ส่วน โมลิบดีนัม โครงสร้างจุลภาคที่ปรากฏคือ  $\text{Mo}_3\text{Al}_8$  ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในกระบวนการได้เกิดการแพร่เข้าของอะลูมิเนียม และแพร่ออกมาของธาตุผสม ในโลหะพื้น

ในกรณีนิกเกิลนั้นจำเป็นต้องมีการ Annealing เพื่อปรับโครงสร้างจุลภาคของผิวเคลือบให้เป็น  $\text{NiAl}$  เพียงอย่างเดียวซึ่งในการทดลองนี้พบว่าในการเคลือบแบบขบวนการที่ทดลองจะพบว่า

เกิดปริมาณ อะลูมิเนียมที่มากเกินไปจนก่อให้เกิด  $Ni_2Al_3$  นั้นแสดงว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของนิกเกิลและ อะลูมิเนียมไม่ดีเพียงพอต่อการเกิดเฟสที่สมดุลนั่นเอง



รูปที่ 2.4 แสดงความเข้มข้นของธาตุบริเวณผิวเคลือบตามความลึกผิวของโลหะพื้นแต่ละชนิด

a) เหล็กกล้า Fe-30Cr, b) เหล็ก, c) นิกเกิล, d) โมลิบดีนัม ที่ผ่านการเผาที่ 1000°C / 5 ชม.[7]

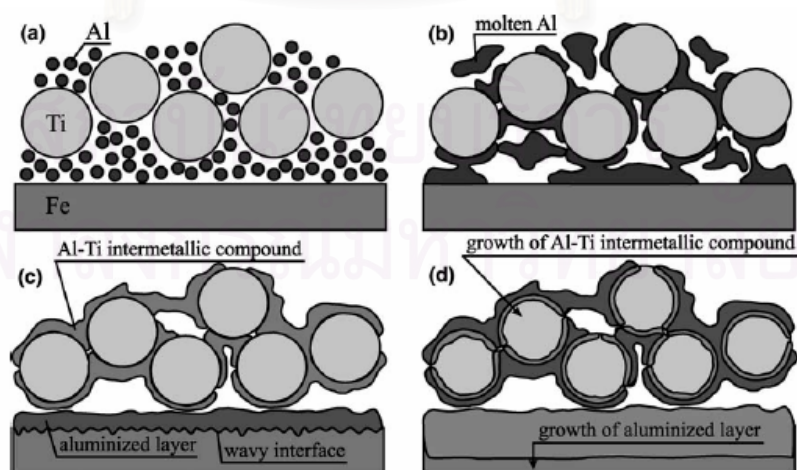
โดยที่ส่วนผสมของแพคที่กล่าวไปนั้นยังได้มีการนำมาใช้ในการสังเคราะห์ Nickel-aluminide foams จากโฟมโลหะที่มีความพรุนเป็น 80 และ 20 ppi (pores per linear inch) ได้อีกด้วย โดยต้องทำการ บรรจุรอบๆแพคด้วยผงอะลูมินาจนเต็มเบ้า ใช้อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0.5 ถึง 4 ชม. หลังจากนั้นจึงทำ treatment ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสอีกครั้งเป็นเวลา 8 ถึง 4 ชม. ด้วยการเติม  $Ni_2Al_3$  ลงในแคลปซูลระหว่างกระบวนการเพื่อป้องกันการสูญเสียอะลูมิเนียมไป [8] พบว่าสามารถใช้วิธี pack cementation เพื่อเคลือบอะลูมิเนียมในดัดบนพื้นผิวนิกเกิลโฟมได้สำเร็จ โดยโฟมที่ได้มีความพรุนอยู่ที่ 96-98 % และพบว่าผิวเคลือบจะเกิดเป็นวงชั้นของเฟสอะลูมิเนียมในดัดขึ้น เมื่อทำการ treatment จะพบเพียงเฟสเดียวคือ NiAl ในนิกเกิลโฟมที่มีความพรุนเป็น 80 ppi ส่วนนิกเกิลโฟมที่มีความพรุนเป็น 20 ppi จะไม่สามารถทำให้เกิดเฟส  $Ni_3Al$  เฟสเดียวขึ้นได้ ทั้งนี้อาจ

เนื่องมาจากความแคบของชั้นสารละลาย ในเฟสที่น้อยมาก และความกว้างของชั้นผนังของโพนิกเกิลที่เป็นโลหะตั้งต้น

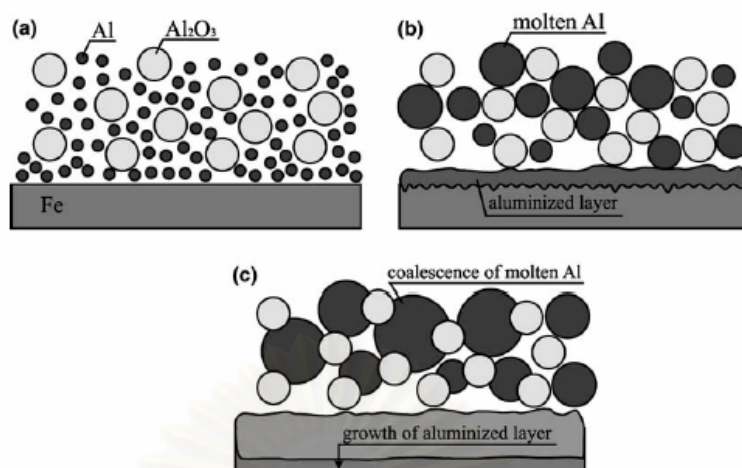
### 2.2.2 Powder Liquid Coating

วิธีนี้เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการเคลือบผิวโดยอาศัยหลักการแพร่ เป็นการนำผงโลหะที่ต้องการ เคลือบผิว ซึ่งอาจเป็นผงของโลหะเพียงตัวเดียวหรือเป็นผงที่ผสมกันระหว่างโลหะตัวอื่นที่มีการแปรผัน อัตราส่วนไปเรื่อยๆแล้วผสมกับตัวทำละลายจนเป็นลักษณะ slurry ไปวางไว้บนชิ้นงานที่ต้องการเคลือบ แล้วจึงนำชิ้นงานไปให้ความร้อนเพื่อให้ผงโลหะที่หลอมค่อยๆแพร่เข้าสู่เนื้อชิ้นงานเพื่อก่อเป็นสาร ประกอบเชิงโลหะ (intermetallic compound) เคลือบติดอยู่บนผิวชิ้นงานต่อไป ซึ่งวิธีการเคลือบผิวชิ้นงาน แบบนี้ มีข้อดีคือชั้นผิวเคลือบมีความต้านทานต่อ thermal shock และมี drawback ที่สูงกว่าวิธีการเคลือบผิว แบบ pack cementation [9]

ดังเช่นการทดลองของ Koji Murakami และคณะ[10] ที่ได้ทำการศึกษาการเคลือบ อะลูมิเนียมบนผิว ของโลหะเหล็กบริสุทธิ์ โดยใช้ผงอะลูมิเนียมกับไทเทเนียม และอะลูมิเนียมกับอะลูมินา โดยเปลี่ยนแปลง อัตราส่วนไปเรื่อยๆ ใช้ ethyleneglycol เป็นส่วนผสมร่วม นำชิ้นงานไปทำการให้ความร้อนที่ 1000 องศาเซลเซียส ให้อะลูมิเนียมเหลวจะค่อยๆแพร่เข้าสู่เนื้อเหล็กเพื่อก่อเป็นสารประกอบเชิงโลหะของ Al-Fe ส่วนอะลูมิเนียมเหลวที่เหลือจะทำปฏิกิริยากับไทเทเนียมที่อยู่ใกล้กันก่อเป็น สารประกอบระหว่าง Al-Ti ดังรูปที่ 2.5 ส่วนใน ระบบ  $Al+Al_2O_3$  (รูปที่ 2.6) อะลูมิเนียมเหลวจะค่อยๆไหลผ่านช่องระหว่างอะลูมินา โดยที่ความยากง่ายจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างผง ความหนาของชั้นอะลูมิเนียมที่ทำการเคลือบจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของการผสมผง และเงื่อนไขในการให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน

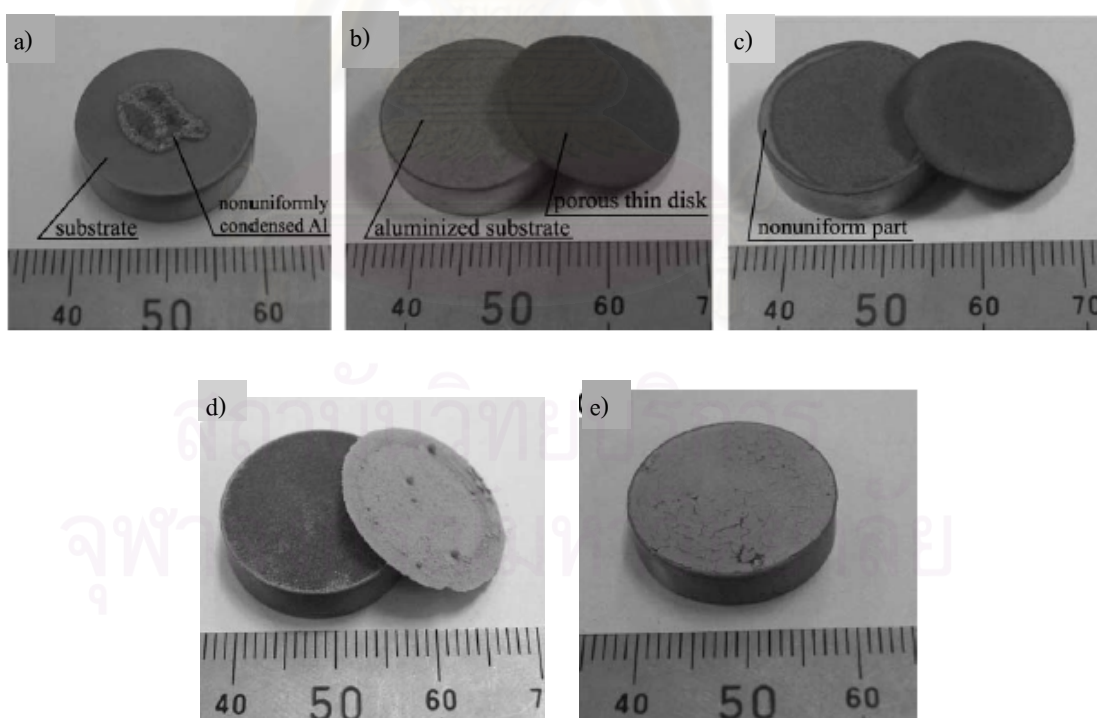


รูปที่ 2.5 แสดงกระบวนการอะลูมิเนียมในเชิง ใช้ผง Al-Ti [10]



รูปที่ 2.6 แสดงกระบวนการอะลูมิเนียมในเชิง ใช้ผง Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [10]

จากการทดลองพบว่าการเคลือบด้วย Al+Ti จะสามารถควบคุมผลการเคลือบได้ดีกว่า Al+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> และอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทดลองเพื่อให้ได้การเคลือบผิวที่สม่ำเสมอมากที่สุดคือ Al:Ti เป็น 4:6



รูปที่ 2.7 ภาพถ่ายชิ้นงานผ่านการเคลือบผิวที่อัตราส่วน a) อะลูมิเนียมอย่างเดี่ยว, b) Al:Ti=4:6, c) Al:Ti=6:4, d) Al:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=4:6, e) Al:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=6:4 [10]

อธิบายได้ดังรูปที่ 2.7a) ในการเคลือบด้วยผงอะลูมิเนียมเพียงอย่างเดียวจะพบอะลูมิเนียมเหลวเกาะยึดตัวบนผิวชิ้นงาน อย่างไม่สม่ำเสมอ (nonuniformly part) ส่วนการเคลือบผิวที่ใช้ Al-Ti ที่อัตรา ส่วน Al:Ti เป็น 2:8 และ 4:6 หลังการเคลือบจะพบแผ่นที่มีรูพรุนบางสามารถทำให้ หลุดออกจากผิว ทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงไปของผิวชิ้นงาน ได้ชัดเจนดังรูปที่ 2.7b) เช่นเดียวกับที่ อัตราส่วน Al:Ti เป็น 4:6 และ 8:2 แต่บริเวณขอบของชิ้นงานจะพบว่าไม่มีบริเวณที่ อะลูมิเนียมเหลว จะเกาะยึดตัวบนผิวชิ้นงานอย่าง ไม่สม่ำเสมอดังรูปที่ 2.7c) สำหรับการเคลือบผิวที่ใช้ Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ที่ อัตราส่วน Al:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เป็น 2:8 และ 4:6 หลัง การเคลือบจะพบแผ่นที่มีรูพรุนบางสามารถทำให้ หลุดออกจากผิวหน้าชิ้นงานได้ง่ายดังรูปที่ 2.7d) แต่ที่ อัตราส่วน Al:Ti เป็น 4:6 และ 8:2 จะไม่พบว่ามี แผ่น รูพรุนบางเกิดขึ้นแต่อย่างใด ดังรูปที่ 2.7e)

ในส่วนของ Y.TSUCHIDA และคณะ[9] ได้นำเหล็กบริสุทธิ์ และเหล็กกล้าคาร์บอน (JIS-S45C) มาเคลือบ โดยใช้ผง FeAl<sub>3</sub> และผสมกับ solvent ที่เตรียมโดย (KPO<sub>3</sub>)<sub>n</sub> 5 กรัม ผสม (NaPO<sub>3</sub>)<sub>6</sub> 2.0 กรัม ในน้ำ 1000 มิลลิลิตร เคลือบด้วยวิธี powder liquid coating แล้วเผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส ภายใต้การ ควบคุมบรรยากาศด้วยก๊าซอาร์กอนแล้วนำไป quenched ในน้ำและ tempered ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชม. ซึ่งผู้ทดลองได้ทำการเปรียบเทียบผลระหว่างเทคนิค ใหม่ กับการเคลือบผิวแบบเดิมคือ aluminum pack cementation ผลที่ได้คือสามารถเคลือบ FeAl<sub>3</sub> ด้วยวิธีนี้ได้ โดยที่ชั้นเคลือบที่ได้ นั้น มีส่วนผสมทางเคมี และ โครงสร้างจุลภาครวมถึงค่าความแข็ง ที่แตกต่างไปจากเดิม ชั้นเคลือบนอกสุดจะประกอบไปด้วยโครงสร้าง FeAl และ FeAl/FeAl<sub>2</sub> eutectoid ซึ่งส่งผลให้มีความแข็งแรงและความแกร่งสูงรวมทั้งยังทนต่อ peeling-off ได้ดีอีกด้วย

### 2.3. คุณสมบัติของโลหะผสมพิเศษที่ผลิตได้หลังจากเคลือบผิวด้วย NiAl

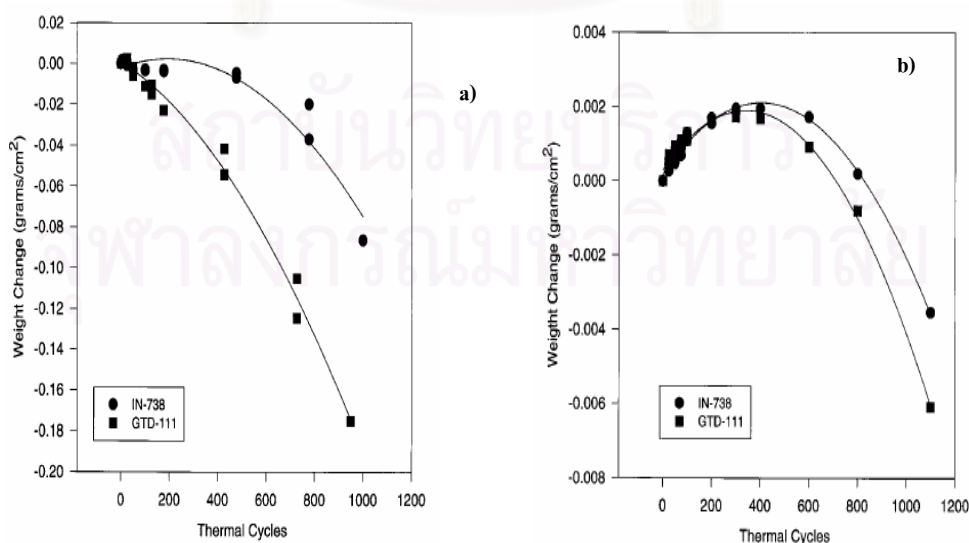
ด้วยการทำงานที่อุณหภูมิและความดันสูงดังที่ได้กล่าวไปแล้วนั้นทำให้ชิ้นส่วนของใบพัด ในเครื่องยนต์กังหันก๊าซ เกิดความเสียหายได้ทั้งจากออกซิเดชัน และ hot corrosion ซึ่งออกซิเดชัน เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่าง โลหะและตัว oxidant ที่มีอยู่ในก๊าซร้อน (hot gas) ส่วน hot corrosion ซึ่งบางครั้งเรียกซัลไฟเดชัน (Sulfidation) พบครั้งแรกเมื่อประมาณปี 1950 เกิดขึ้นกับโลหะที่ใช้งาน ที่ช่วงอุณหภูมิ 760-1000 องศาเซลเซียส เกิดขึ้นบริเวณผิวโลหะซึ่งสัมผัสกับไอเกลือ (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) จาก กระบวนการที่เกาะอยู่ตามผิว สาเหตุการเกิด Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> อาจเนื่องมาจากการใช้งานสัมผัสโดยตรงกับ น้ำทะเล หรือในสิ่งแวดล้อมที่มีเกลือ รวมถึงเกิดจากการเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีโซเดียม และกำมะถัน หรืออาจเกิดได้จากการเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีกำมะถัน กับฝุ่นโซเดียม ที่เจือปนอยู่ในอากาศ

การปรับปรุงความต้านทาน hot corrosion โดยทั่วไปสามารถทำได้โดยการเติมธาตุต่างๆ เข้าไป เช่นการเติมโครเมียมอย่างน้อย 15% เนื่องจากโครเมียมจะทำให้เกิดโครเมียมออกไซด์

(Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ควบคุมผิวชิ้นงานไว้ แต่เนื่องจากการเติมโครเมียมที่มากเกินไปจะส่งผลให้เกิด ซิกมาเฟส ( $\sigma$ ) ส่งผลให้โลหะเปราะ จึงเติมได้อย่างมากไม่เกิน 18-19 % จึงได้มีการคิดค้นกรรมวิธีอื่นเพื่อป้องกันความเสียหายเหล่านี้

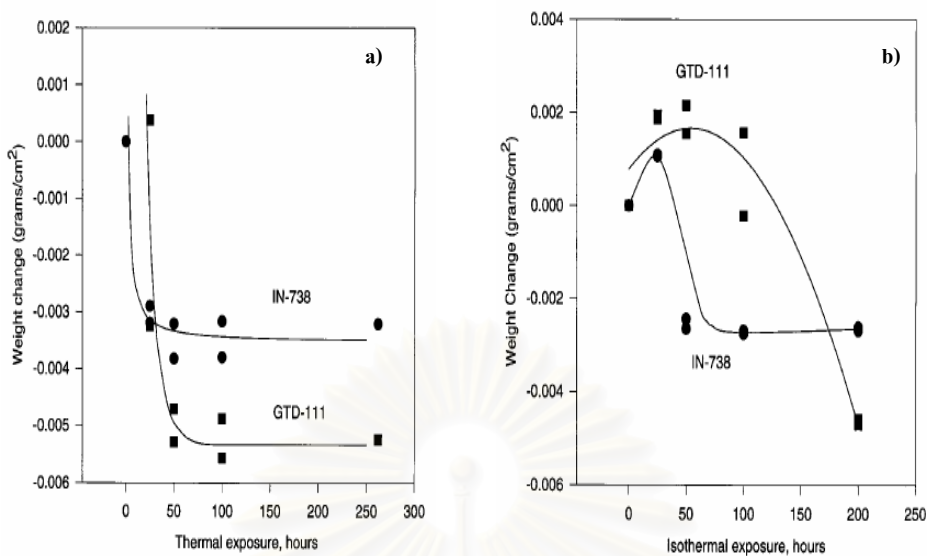
โดยที่ N. S. Cheruvu และคณะ[5] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบในเรื่องของออกซิเดชัน และพฤติกรรมของการโตขึ้นของ  $\gamma'$  ของ superalloy GTD 111 กับ IN 738 โดยแบ่งการทดลอง เป็นสามแบบคือ Cyclic oxidation tests คือนำชิ้นงานใส่ในเตาที่อุณหภูมิไว้ที่ 1066 และ 955 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 55 นาที แล้วนำออกจากเตาให้ชิ้นงานเย็นตัวในอากาศเป็นเวลา 5 นาที ใส่กลับเข้าไปในเตาใหม่เป็นเวลา 55 นาที เป็นเช่นนี้ต่อไปเรื่อยๆ Short-term isothermal exposure คือนำชิ้นงานใส่ในเตาที่อุณหภูมิ 1066 และ 1010 องศาเซลเซียส โดยที่จะนำชิ้นงานออกมาตรวจวัดน้ำหนัก และ spalled oxide เป็นระยะ และ Long-term isothermal exposure คือนำชิ้นงานใส่ในเตาที่อุณหภูมิ 899, 955, 1010 และ 1066 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10,000 ชม.

ผลจากการทดสอบ แสดงในรูปที่ 2.9 และ รูปที่ 2.10 ทั้ง isothermal และ cyclic oxidation นั้นโลหะ GTD 111 มีความต้านทานออกซิเดชัน น้อยกว่า IN 738 โดยที่น้ำหนักที่หายไประหว่างโลหะผสมสองชนิดจะยิ่งห่างมากขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น และพบว่า oxide scale จาก GTD 111 จะพบส่วนประกอบของไทเทเนียมมากกว่า oxide scale จาก IN 738 ไทเทเนียมนี้เองอาจเป็นสาเหตุของการเกิดการหลุดร่อน เฟสของ scale จาก GTD 111 ประกอบไปด้วย TiO<sub>2</sub>, Ni<sub>3</sub>TiO<sub>5</sub> และ NiCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> ขณะที่เฟสของ scale จาก IN 738 ประกอบไปด้วย NiO, Ni<sub>3</sub>TiO<sub>5</sub>, Cr(Nb or Ta)O<sub>4</sub> and NiCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> เหตุผลอีกประการหนึ่งคือ GTD 111 ที่ผ่าน Isothermal exposure ที่ 1010°C จะไม่มีการสร้าง protective scale ของ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ทำให้เกิดการเสียหายได้มากกว่า IN 738



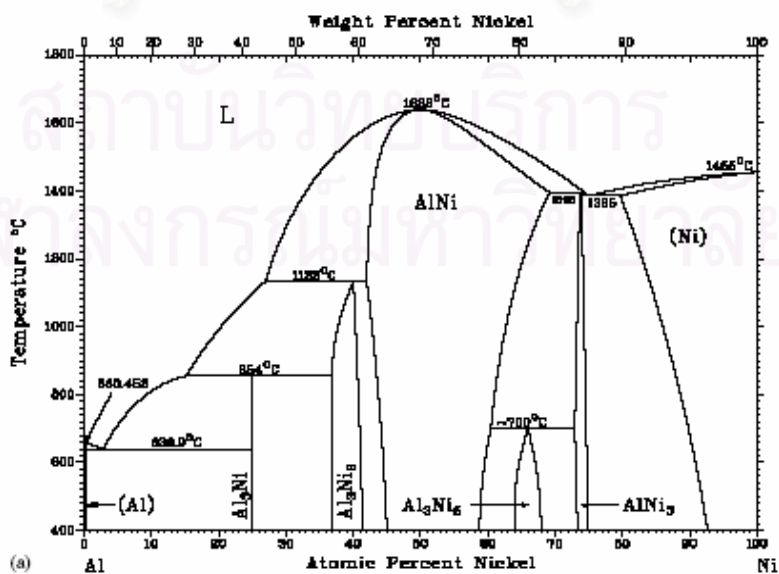
รูปที่ 2.8 ผลทดสอบ Cyclic oxidation tests ที่อุณหภูมิ a) 1066 °C และ b) 955 °C [5]





รูปที่ 2.9 ผลทดสอบ Short-term isothermal exposure tests ที่อุณหภูมิ  
a) 1066°C และ b) 1010°C [5]

จากรูปที่ 2.8 พบว่าในนิกเกิลบริสุทธิ์นั้นสามารถมีอะลูมิเนียมละลายอยู่ได้สูงถึง 11% และเมื่ออะลูมิเนียมละลายอยู่ถึง 13-15% จะเกิดเป็นสารประกอบ Ni<sub>3</sub>Al และเมื่อปริมาณอะลูมิเนียมเพิ่มสูงขึ้นเป็น 18-21% เกิดเป็นสารประกอบ Ni<sub>2</sub>Al<sub>3</sub> ส่วนสารประกอบ NiAl จะเกิดขึ้นเมื่อปริมาณอะลูมิเนียมสูงถึง 17-39% เช่นเดียวกับ สารประกอบ Ni<sub>2</sub>Al<sub>3</sub> จะปรากฏเมื่อมีปริมาณอะลูมิเนียม 39.3-44.1% และหากปริมาณของนิกเกิลมากถึง 58% จะเกิดเฟสสารประกอบ NiAl<sub>3</sub> ส่วนปริมาณของนิกเกิล ที่ละลายอยู่ได้ในอะลูมิเนียมคือ 0-0.24%



รูปที่ 2.10 แผนภูมิเฟสไดอะแกรม ของนิกเกิล อะลูมิเนียม [7]

ในสารประกอบ  $Ni_xAl_y$  ซึ่งเมื่อสังเกตจากอัตราส่วนของ X:Y พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของ อะลูมิเนียมขึ้น อัตราส่วน X:Y จะมีค่าที่ลดลง ซึ่งอัตราส่วนที่แตกต่างกันของสารประกอบเหล่านี้ มีผลต่อ สมบัติของสารประกอบให้แตกต่างกันไปด้วย และที่สำคัญส่งผลต่อสมบัติทางการต้านทาน ออกซิเดชัน และ hot corrosion ด้วยเช่นกัน

เนื่องด้วย NiAl มีความหนาแน่นที่ต่ำอยู่ประมาณ 5.86 กรัม/ซม.<sup>3</sup> แต่มีจุดหลอมเหลวที่สูง ประมาณ 1683 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่านิกเกิลที่บริสุทธิ์อยู่ถึง 230 องศา ทำให้มีความสามารถ ด้านต้านทานออกซิเดชัน และ hot corrosion รวมถึงการคืบที่อุณหภูมิสูง แต่ทั้งนี้เนื่องด้วยความเปราะ ของ NiAl ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 870 องศาเซลเซียส จึงทำให้ NiAl ไม่ได้รับความสนใจที่จะนำมาเป็น วัสดุหลักในการใช้งาน แต่มักจะนำ มาเป็นตัวเคลือบไปบนวัสดุพื้นที่มีความยืดหยุ่นสูงมากกว่าด้วย การปรับปรุงผิวแบบต่างๆ

การเคลือบด้วย NiAl จึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการต้านทานออกซิเดชัน และ hot corrosion อายุของผิวเคลือบนั้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณของ Al ที่จะหายไปจากตัววัสดุพื้นเมื่อผ่านการใช้งานไปเรื่อยๆ ดัง รูปที่ 2.11 จะเห็นได้ว่า รูปทางซ้ายนั้นไม่ได้ทำการเคลือบ NiAl ไว้ ทำให้เกิดการผุกร่อน ที่เห็น ได้ชัดเจน ตรงกันข้ามกับรูปทางขวามือที่ได้เคลือบ NiAl ไว้โลหะจึงยังคงสภาพเดิมไว้ได้



รูปที่ 2.11 ใบพัดเทอร์ไบน์ ที่ผ่านการใช้งาน 2500 ชั่วโมง (ไม่เคลือบ/เคลือบ NiAl) [2]

## บทที่ 3

### ขั้นตอนและวิธีดำเนินการทดลอง

#### 3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 3.1.1 โลหะนิกเกิล บริสุทธิ์
- 3.1.2 โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นนิกเกิลเกรด IN 738 และ GTD 111
- 3.1.3 ผงอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ ขนาด 42 และ 3  $\mu\text{m}$
- 3.1.4 ผงอะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ขนาด 175  $\mu\text{m}$
- 3.1.5 Ethyleneglycol ( $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$ )
- 3.1.6 Ultrasonic bath เพื่อช่วยในการล้างทำความสะอาดผิวชิ้นงานก่อนการทดลอง
- 3.1.7 Acetone ช่วยขจัดคราบอินทรีย์ที่ติดที่ชิ้นงานก่อนการทดลอง
- 3.1.8 กระดาษทราย
- 3.1.9 ฟอยล์อะลูมิเนียม
- 3.1.10 ซ้อนตักสาร

#### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

- 3.2.1 เตา Tube furnace
- 3.2.2 Boat ใช้บรรจุชิ้นงานเข้าเตา
- 3.2.3 เครื่องชั่งดิจิตอล
- 3.2.4 เครื่องขัด ผงเพชรขนาด 1  $\mu\text{m}$  และผ้าสักหลาดสำหรับขัดละเอียด
- 3.2.5 กล้องจุลทรรศน์แสง (optical microscope OM)
- 3.2.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (scanning electron microscope SEM)
- 3.2.7 X-ray diffractometer (XRD)

#### 3.3 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน

- 3.3.1 ตัดชิ้นงานโลหะนิกเกิลบริสุทธิ์ และโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นนิกเกิล GTD 111 และ Inconel 738 ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 3.1[6]
- 3.3.2 ขัดผิวชิ้นงานด้านขอบสันด้วยกระดาษทรายเบอร์ 80 และหน้ากว้างของชิ้นงานด้วยกระดาษทรายจนถึงเบอร์ 4000 เพื่อขจัดสิ่งสกปรกที่ผิวชิ้นงาน และปรับความเรียบผิว
- 3.3.3 ล้างชิ้นงานด้วยน้ำสะอาดเพื่อขจัดคราบสกปรกและเศษผงจากการขัด

3.3.4 ล้างชิ้นงานด้วยแอลกอฮอล์เพื่อขจัดน้ำออก

3.3.5 เป่าชิ้นงานให้แอลกอฮอล์แห้งแล้วนำไปเก็บในภาชนะที่มีสารดูดความชื้นและปิดมิดชิด (Dessecator)

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของ โลหะผสมพิเศษเนื้อพ่นนิกเกิล GTD 111 และ Inconel 738[4]

% wt. ธาตุ	Ni	Cr	Co	Ti	Al	W	Mo	Ta	C	Fe	B
GTD 111	Bal.	13.5	9.5	4.75	3.3	3.8	1.53	2.7	0.09	0.23	0.01
IN 738	Bal.	16.0	8.5	3.4	3.4	2.6	1.75	2.65	0.11	-	-

### 3.4 ขั้นตอนการเคลือบผิว

แผนภูมิขั้นตอนการทดลองแสดงในรูปที่ 3.1

3.4.1 ผสมผงอะลูมิเนียม และผงอะลูมินา ตามอัตราส่วนที่กำหนด ดังตารางที่ 3.2 โดยใช้ Ethyleneglycol เป็นตัวประสาน กวนให้เข้ากันโดยให้เป็น Slurry

3.4.2 นำชิ้นงานที่ได้เตรียมไว้จากข้อ 3.3.5 ล้างด้วย Actone ใน อ่าง Ultrasonic bath เป็นเวลา 5 นาที เพื่อขจัดคราบที่ติดอยู่ตามผิวชิ้นงานที่อาจส่งผลต่อการเคลือบได้

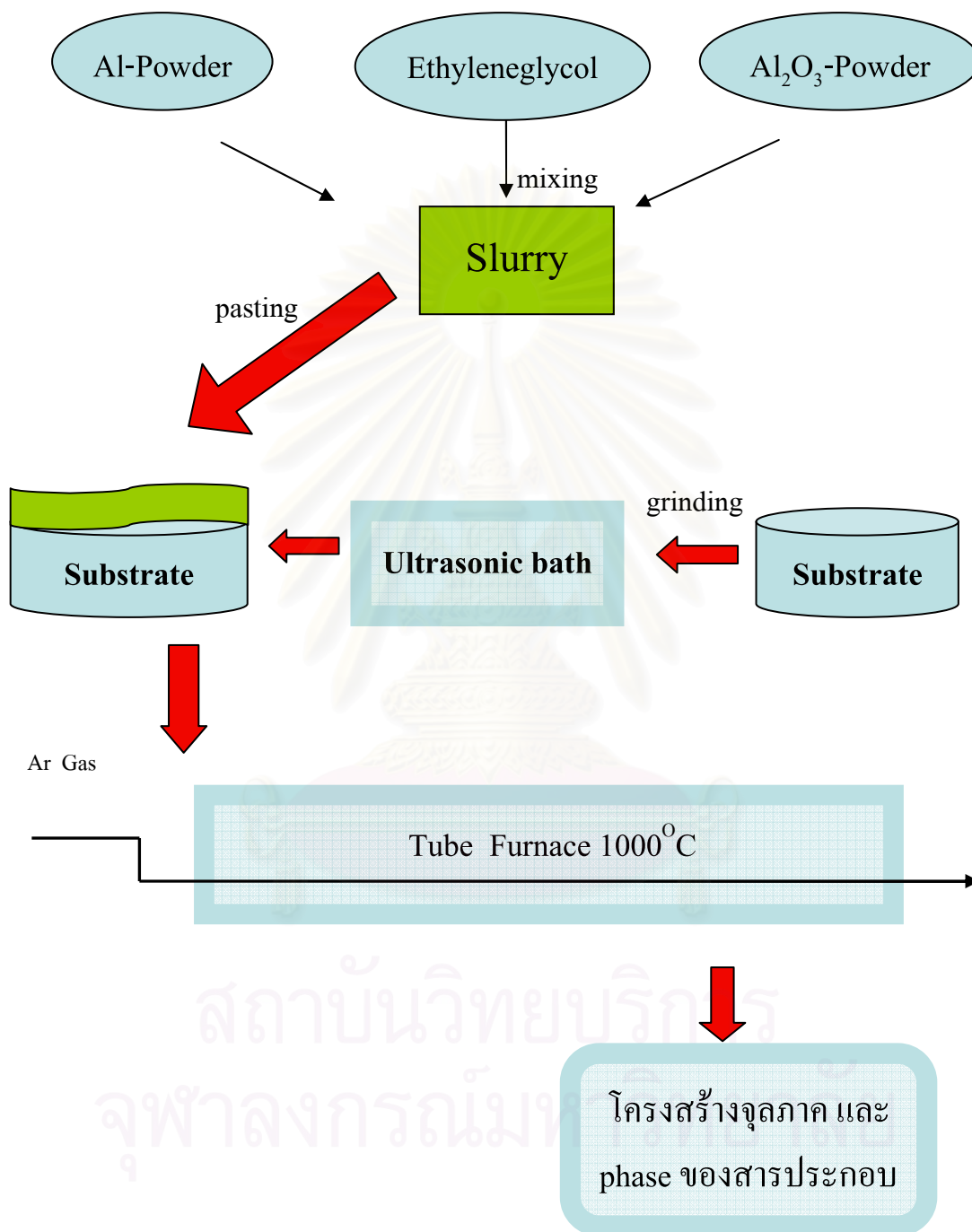
3.4.3 เคลือบผิวชิ้นงานด้วย Slurry ที่ผสมแล้วจากข้อ 3.4.1 โดยควบคุมให้ปริมาณ Slurry เป็น  $0.1 \text{ g/mm}^2$

3.4.4 นำชิ้นงานวางเรียงไว้ใน Boat

3.4.5 นำ Boat ที่บรรจุชิ้นงานเข้าวางไว้กลางเตา Tube furnace ที่ได้ตั้งสถานะการทำงานตามที่กำหนดไว้ในรูปที่ 3.2

3.4.6 ควบคุมบรรยากาศเตาด้วยก๊าซอาร์กอนปริมาณ

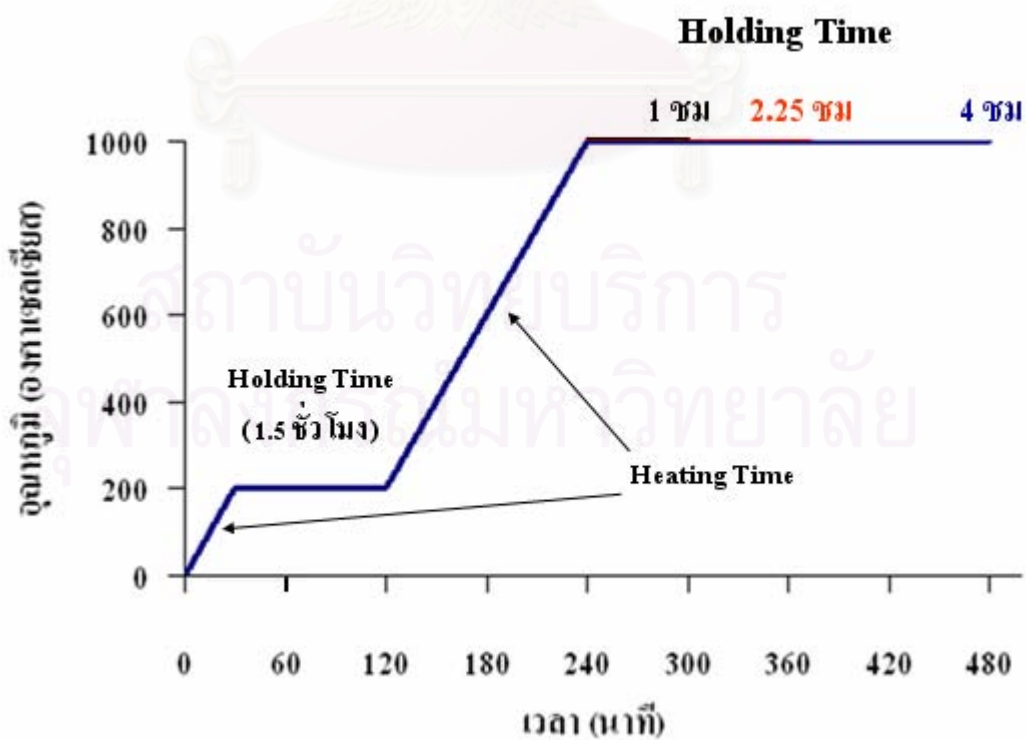
3.4.7 ทิ้งชิ้นงานให้เย็นภายในเตา



รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการทดลอง

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขในการทดลอง

Substate	เวลา (hr.)	Al:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	เวลา (hr.)	Al:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	เวลา (hr.)	Al:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Ni	-	-	2.25	10:0	4	10:0
		-		7:3		7:3
		-		-		5:5
		-		-		3:7
IN 738	1	10:0	2.25	10:0	4	10:0
		7:3		7:3		7:3
		5:5		5:5		5:5
		3:7		3:7		3:7
GTD 111	1	10:0	2.25	10:0	4	10:0
		7:3		7:3		7:3
		5:5		5:5		5:5
		3:7		3:7		3:7



รูปที่ 3.2 สภาวะการทำงานของเตา Tube furnace

### 3.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์ชั้นเคลือบ

3.5.1 นำชิ้นงานที่ผ่านการทำ อะลูมิเนียมในซิง มาตรวจสอบชนิดของสารประกอบที่เกิดขึ้นที่ผิวหน้าตัวอย่างด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) ด้วยหลอด Cu  $k\alpha$  แบบ GIXD ที่มุมตกกระทบ  $5^\circ$

3.5.2 นำชิ้นงานแต่ละชิ้นมาตัดแบ่งออกเป็น 2 ส่วน

3.5.3 นำชิ้นงานที่ตัดแบ่งแล้ว ตรวจสอบวิเคราะห์ผิวหน้าตัดโดยนำชิ้นงานมาทำ Hot mount จากนั้นทำการขึ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ 80, 220, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200, 2500, 4000 และขัดเงาด้วยผงเพชร

3.5.2 นำชิ้นงานตัวอย่างตรวจสอบชั้นเคลือบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope) และ scanning electron microscope (SEM) เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคและสัญญาณของชั้นเคลือบ

3.5.3 ถ่ายรูปและวัดความหนาชั้นเคลือบด้วยโปรแกรม AxioVision 3.0

3.5.4 วิเคราะห์ผิวชั้นเคลือบด้วยเครื่องมือ Energy dispersive spectroscopy (EDS) และ Electron Probe Micro Analysis (EPMA)

3.5.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 ผลการตรวจสอบขนาดผงและผลของขนาดผงอะลูมิเนียมต่อชั้นเคลือบ

##### 4.1.1 ผงอะลูมินา

- ผงอะลูมินา ขนาด 175  $\mu\text{m}$

##### 4.1.2 ผงอะลูมิเนียม

มีสองขนาดคือ

- ผงอะลูมิเนียม ขนาด 42  $\mu\text{m}$  ความบริสุทธิ์ 97.9%

- ผงอะลูมิเนียม ขนาด 3  $\mu\text{m}$  ความบริสุทธิ์ 99.9%

จากรูปที่ 4.1 เปรียบเทียบการเลือกใช้ขนาดผงอะลูมิเนียม ขนาด 42 และ 3  $\mu\text{m}$  ของชิ้นงาน นิกเกิลผ่านการทำอะลูมิเนียมไนซิง ที่อุณหภูมิ 1000 $^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 4 ชม. อัตราส่วนผสมระหว่าง Al:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> โดยน้ำหนักเป็น 5:5 โดยที่ ขนาดผง 42  $\mu\text{m}$  (4.1 ก.) จะไม่พบชั้นเคลือบ แต่จะเกิดชั้นเคลือบ เมื่อเลือกใช้ผงอะลูมิเนียมขนาด 3  $\mu\text{m}$  (4.1 ข.) ในการทดลองครั้งนี้ จึงเลือกใช้ผงอะลูมิเนียมขนาดเล็ก (3  $\mu\text{m}$ )

ก.)



ข.)



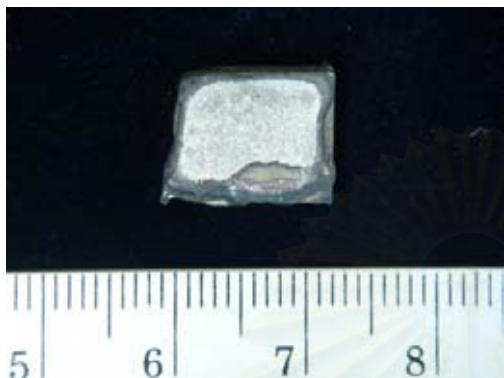
รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายชิ้นงานนิกเกิลผ่านการทำอะลูมิเนียมไนซิง ที่อุณหภูมิ 1000 $^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 4 ชม. อัตราส่วนผสมระหว่าง Al:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> โดยน้ำหนักเป็น 5:5 ก.) ขนาดผง 42  $\mu\text{m}$  ข.) ขนาดผง 3  $\mu\text{m}$



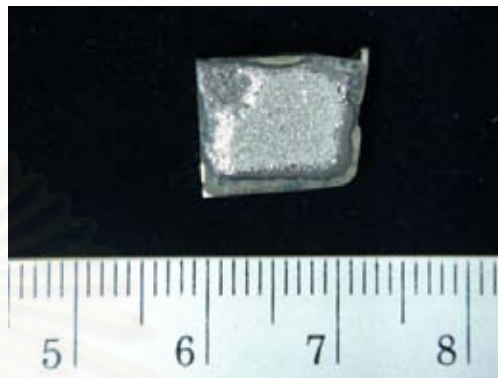
## 4.2 ผลการวิเคราะห์รูปร่างและลักษณะพื้นผิวของชั้นเคลือบ

### 4.2.1 ลักษณะผิวชั้นเคลือบบนโลหะนิกเกิล

ก.)



ข.)

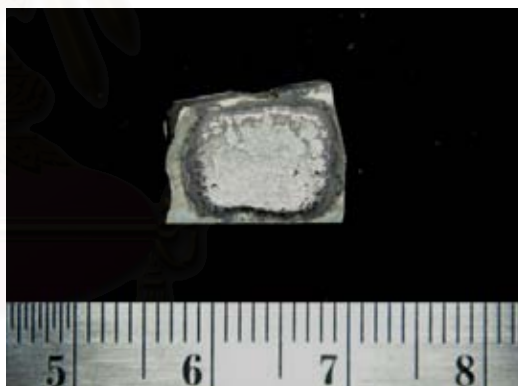


รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมไนซิงบนโลหะนิกเกิล ที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2.25 ชั่วโมง โดยอัตราส่วนผสม Al:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ก) 10:0, ข) 7:3 โดยน้ำหนัก

ก.)



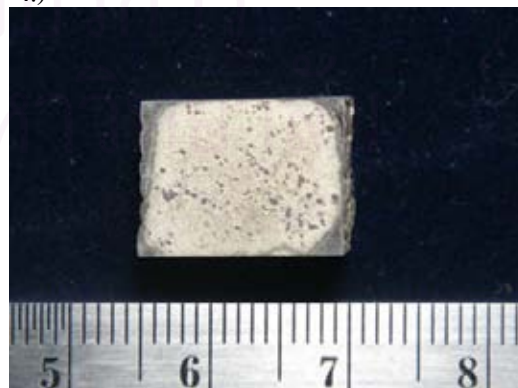
ข.)



ค.)



ง.)



รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมไนซิงบนโลหะนิกเกิล ที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยอัตราส่วนผสม Al:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ก) 10:0, ข) 7:3, ค) 5:5, ง) 3:7 โดยน้ำหนัก

รูปที่ 4.2 ชิ้นงานนิกเกิลผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงที่อุณหภูมิ  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2.25 ชม. โดยเปลี่ยนอัตราส่วนผสมระหว่าง  $\text{Al}:\text{Al}_2\text{O}_3$  เป็น 10:0 และ 7:3 (รูปที่ 4.2 ก. และ ข.) พบชั้นเคลือบที่มีความต่อเนื่อง และพบผงอะลูมิเนียมและผงอะลูมินาผสมผงอะลูมินาที่เหลือจะเกาะตัวกันเป็นแผ่นพรุนบางหลุดออกจากผิวหน้าชิ้นงานได้

จากรูปที่ 4.3 ชิ้นงานนิกเกิลผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงที่อุณหภูมิ  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 4 ชม. โดยเปลี่ยนอัตราส่วนผสมระหว่าง  $\text{Al}:\text{Al}_2\text{O}_3$  โดย รูปที่ 4.3 ก.) อัตราส่วนผสม 10:0 พบชั้นเคลือบที่ไม่ต่อเนื่องทั่วชิ้นงาน รูปที่ 4.3 ข) อัตราส่วนผสมเป็น 7:3 พบชั้นเคลือบต่อเนื่องทั่วชิ้นงาน รูปที่ 4.3 ค) อัตราส่วนผสมเป็น 5:5 พบชั้นเคลือบไม่ต่อเนื่องอยู่ตามจุดต่างๆของชิ้นงาน รูปที่ 4.3 ง.) อัตราส่วนผสมเป็น 3:7 ไม่พบชั้นเคลือบที่มองเห็นด้วยตาเปล่า โดยทุกชิ้นจะพบผงอะลูมิเนียมและผงอะลูมินาผสมผงอะลูมิเนียม ที่เหลือจะเกาะตัวกันเป็นแผ่นพรุนบาง หลุดออกจากผิวหน้าชิ้นงานได้

#### 4.2.2 ลักษณะผิวชั้นเคลือบบนโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด Inconel 738

ก.)



ข.)



ค.)



ง.)



รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบน In 738 ที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยอัตราส่วนผสม  $\text{Al}:\text{Al}_2\text{O}_3$  ก) 10:0, ข) 7:3, ค) 5:5, ง) 3:7 โดยน้ำหนัก

รูปที่ 4.4 โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลเกรด IN 738 ผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิง ที่อุณหภูมิ  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชม. โดยเปลี่ยนอัตราส่วนผสมระหว่าง  $\text{Al}:\text{Al}_2\text{O}_3$  รูปที่ 4.4 ก.) อัตราส่วนผสม เป็น 10:0 พบผงอะลูมิเนียมที่เหลือจะเกาะตัวกันเป็นแผ่นพรุนบาง ติดบนผิวหน้าชิ้นงาน ชั้นเคลือบ มีความหนาแตกต่างกันทั้งชิ้นงาน รูปที่ 4.4 ข.) อัตราส่วนผสมเป็น 7:3 พบชั้นเคลือบหนาแต่ไม่ ต่อเนื่องทั้งชิ้นงาน รูป 4.4 ค.) มีอัตราส่วนผสมเป็น 5:5 มีชั้นเคลือบบางต่อเนื่องทั้งชิ้นงาน ส่วนรูปที่ 4.4 ง.) อัตราส่วนผสม 3:7 ไม่พบชั้นเคลือบติดอยู่บริเวณผิวชิ้นงาน โดยทุกชิ้นยกเว้นที่อัตราส่วน 10:0 จะพบผงอะลูมิเนียมผสมผงอะลูมิเนียมที่เหลือ จะเกาะตัวกันเป็นแผ่นพรุนบางหลุดออกจาก ผิวหน้าชิ้นงานได้

ก.)



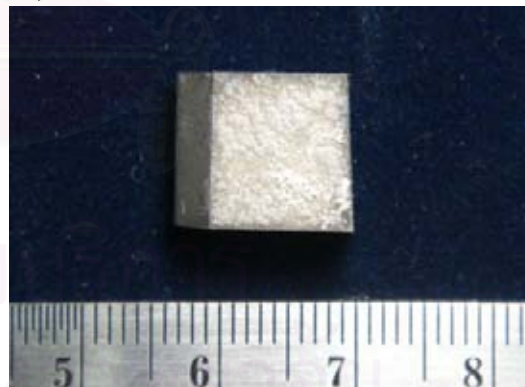
ข.)



ค.)



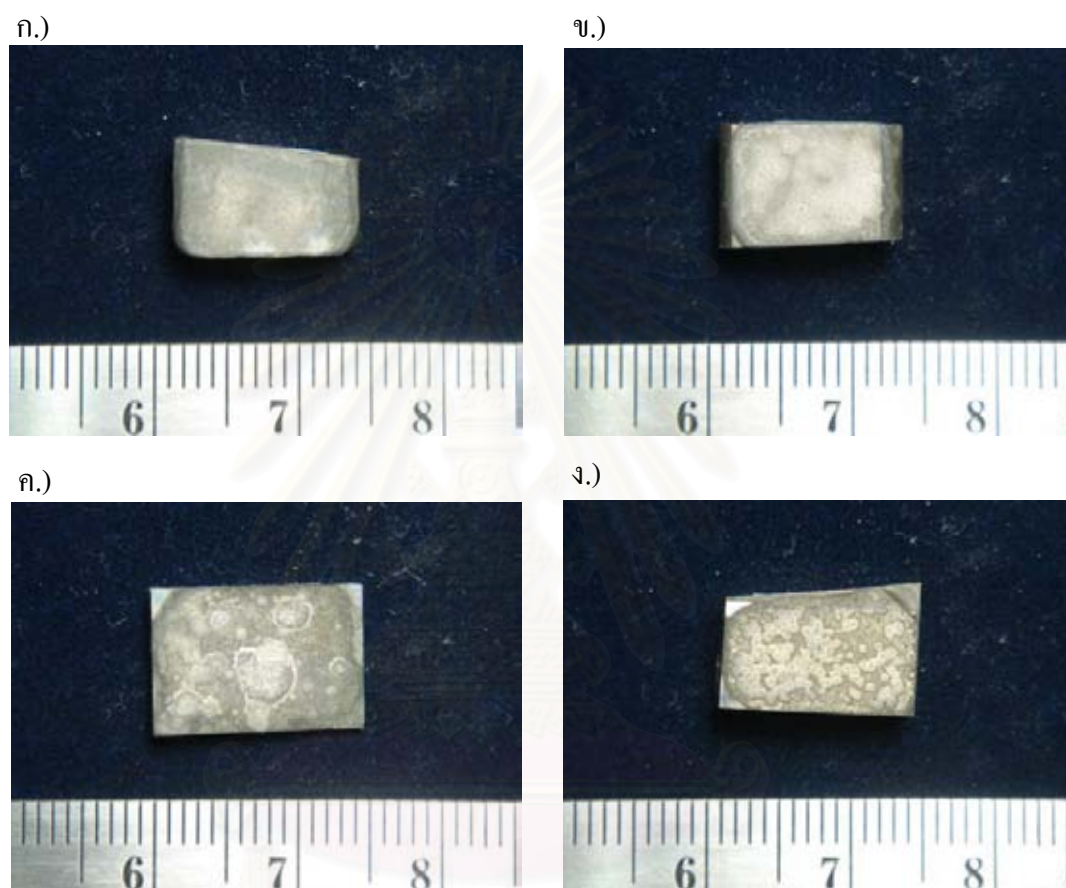
ง.)



รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิงบน IN738 ที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2.25 ชั่วโมง โดย อัตราส่วนผสม  $\text{Al}:\text{Al}_2\text{O}_3$  ก) 10:0, ข) 7:3, ค) 5:5, ง) 3:7 โดยน้ำหนัก

รูปที่ 4.5 โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลเกรด IN 738 ผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิง ที่อุณหภูมิ  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2.25 ชม. โดยเปลี่ยนอัตราส่วนผสมระหว่าง  $\text{Al}:\text{Al}_2\text{O}_3$  โดย รูปที่ 4.5 ก.) อัตรา ส่วนผสม เป็น 10:0 ชั้นเคลือบมีความหนาต่อเนื่องทั้งชิ้นงาน พบผงอะลูมิเนียมที่เหลือจะเกาะติดบน

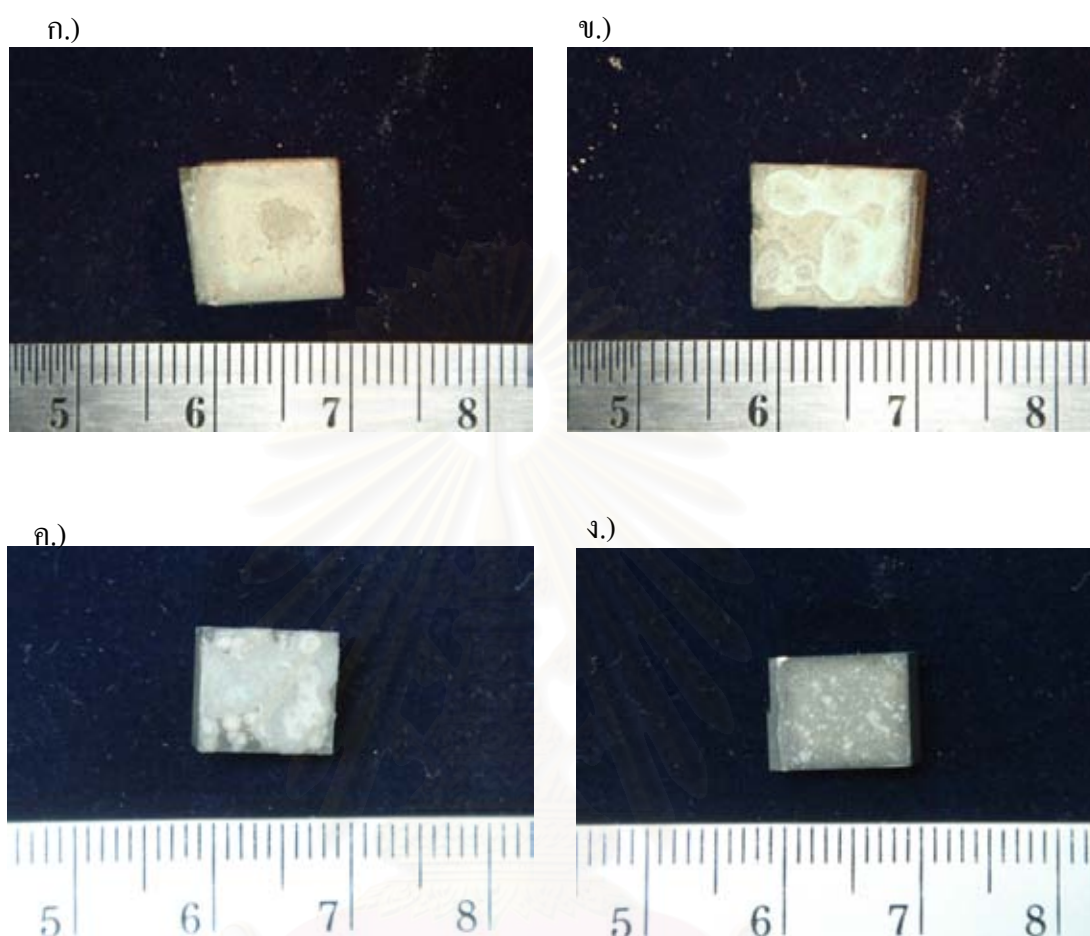
ผิวชิ้นงาน รูปที่ 4.5 ข.) อัตราส่วนผสมเป็น 7:3 พบชั้นเคลือบหนาต่อเนื่องอยู่ที่ผิวชิ้นงาน รูป 4.5 ค.) อัตราส่วนผสมเป็น 5:5 มีชั้นเคลือบบางต่อเนื่องทั่วทั้งชิ้นงาน ส่วนรูปที่ 4.5 ง.) อัตราส่วนผสม 3:7 มีชั้นเคลือบติดอยู่บริเวณผิวชิ้นงานเป็นจุดๆกระจายตัวอยู่ทั่วไป โดยทุกชิ้นยกเว้นอัตราส่วน 10:0 พบผงอะลูมินาผสมผงอะลูมิเนียมที่เหลือเกาะตัวกันเป็นแผ่นพรุณบาง หลุดออกจากผิวหน้าชิ้นงาน



รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในซีงบน IN 738 ที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยอัตราส่วนผสม  $\text{Al}:\text{Al}_2\text{O}_3$  ก) 10:0, ข) 7:3, ค) 5:5, ง) 3:7 โดยน้ำหนัก

รูปที่ 4.6 โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด IN 738 ผ่านการทำอะลูมิเนียมในซีงที่อุณหภูมิ  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 4 ชม. โดยเปลี่ยนอัตราส่วนผสมระหว่าง  $\text{Al}:\text{Al}_2\text{O}_3$  โดย รูปที่ 4.6 ก.) และ ข.) อัตราส่วนผสม 10:0 และ 7:3 พบชั้นเคลือบที่มีความหนา ต่อเนื่องทั่วชิ้นงาน รูปที่ 4.6 ค.) และ ง.) อัตราส่วนผสม 5:5 และ 3:7 พบชั้นเคลือบหนาไม่ต่อเนื่องทั้งชิ้นงาน โดยพบผงอะลูมิเนียมและผงอะลูมินาผสมผงอะลูมิเนียมที่เหลือจะเกาะตัวกันเป็นแผ่นพรุณบาง หลุดออกจากผิวหน้าชิ้นงานได้

### 4.2.3 ลักษณะผิวชั้นเคลือบบนโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้ นิกเกิลเกรด GTD 111

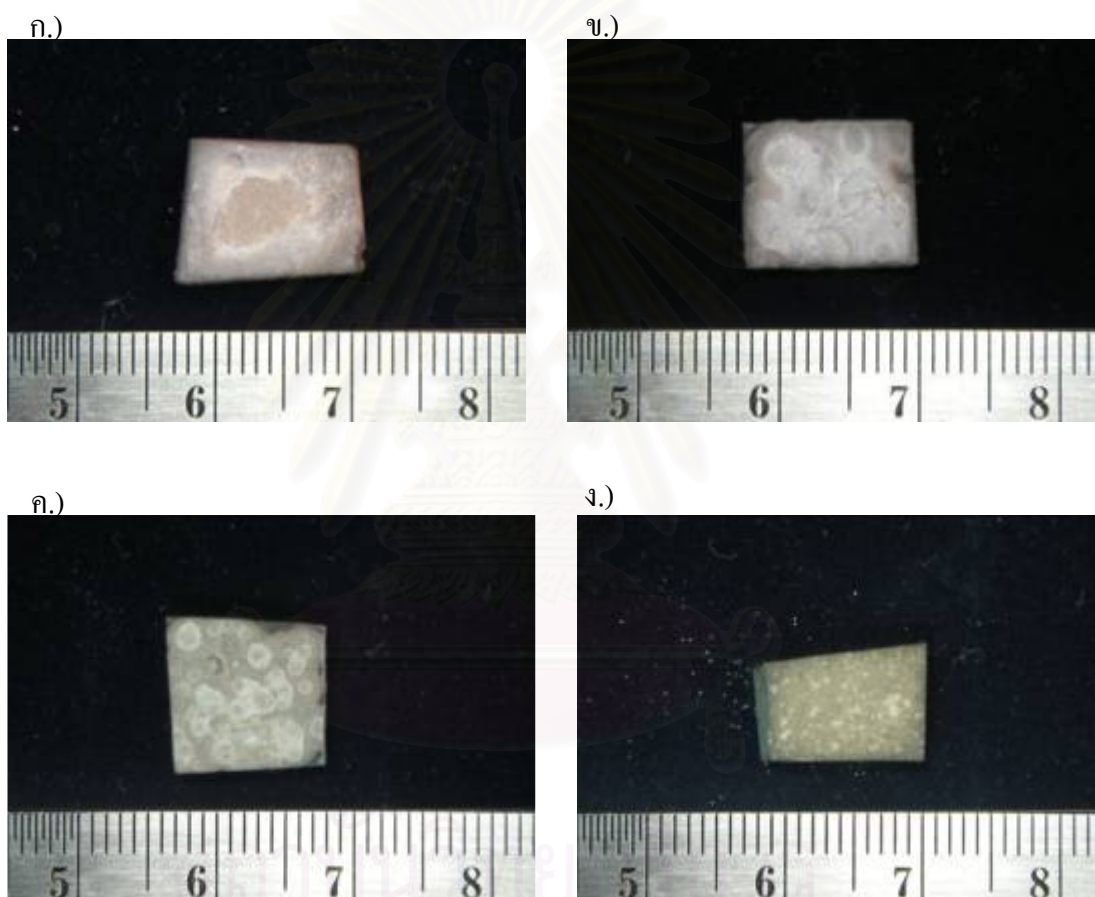


รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมไนซิงบน GTD 111 1000°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยอัตราส่วนผสม Al:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ก) 10:0, ข) 7:3, ค) 5:5, ง) 3:7 โดยน้ำหนัก

จากรูปที่ 4.7 โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้ นิกเกิลเกรด GTD 111 ผ่านการทำอะลูมิเนียมไนซิง ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 1 ชม. โดยเปลี่ยนอัตราส่วนผสมระหว่าง Al:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> รูปที่ 4.7 ก.) อัตราส่วนผสมเป็น 10:0 ชั้นเคลือบหนาต่อเนื่องทั้งชิ้นงานโดยมีบางส่วนแตกและหลุดจากผิวได้ รูปที่ 4.7 ข.) อัตราส่วนผสมเป็น 7:3 พบชั้นเคลือบหนาต่อเนื่องทั่วทั้งชิ้นงาน รูป 4.7 ค.) มีอัตราส่วนผสมเป็น 5:5 มีชั้นเคลือบไม่ต่อเนื่องทั้งชิ้นงาน รูปที่ 4.7 ง.) ส่วนที่อัตราส่วนผสม 3:7 พบชั้นเคลือบเป็นจุดๆ ไม่ต่อเนื่องติดอยู่บริเวณผิวชิ้นงาน โดยทุกชิ้นพบผงอะลูมิเนียมและผงอะลูมินาผสมผงอะลูมิเนียมที่เหลือจะเกาะตัวกันเป็นแผ่นพรุณบางหลุดออกจากผิวหน้าชิ้นงานได้

จากรูปที่ 4.8 โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้ นิกเกิลเกรด GTD 111 ผ่านการทำอะลูมิเนียมไนซิง ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 2.25 ชม. โดยเปลี่ยนอัตราส่วนผสมระหว่าง Al:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> รูปที่ 4.8 ก.)

อัตราส่วนผสมเป็น 10:0 พบแผ่นพรุนบางของผงอะลูมิเนียมที่เคลือบบนผิวหน้าชิ้นงานเมื่อ ชั้นเคลือบกระจายทั้งชิ้นงาน รูปที่ 4.8 ข.) อัตราส่วนผสมเป็น 7:3 พบชั้นเคลือบหนา กระจายตัวทั่วไป รูป 4.8 ค.) มีอัตราส่วนผสมเป็น 5:5 มีชั้นเคลือบไม่ต่อเนื่องทั่วทั้งชิ้นงาน ส่วนรูปที่ 4.8 ง.) อัตราส่วนผสม 3:7 พบชั้นเคลือบเป็นจุดๆกระจายอยู่บริเวณผิวชิ้นงาน โดยทุกชิ้นยกเว้นที่อัตราส่วน 10:0 จะพบผงอะลูมินาผสมผงอะลูมิเนียมที่เคลือจะเกาะตัวกันเป็นแผ่นพรุนบาง หลุดออกจากผิวหน้าชิ้นงานได้



รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในชิงบน GTD 111 ที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2.25 ชั่วโมง โดยอัตราส่วนผสม  $\text{Al}:\text{Al}_2\text{O}_3$  ก) 10:0, ข) 7:3, ค) 5:5, ง) 3:7 โดยน้ำหนัก

ก.)

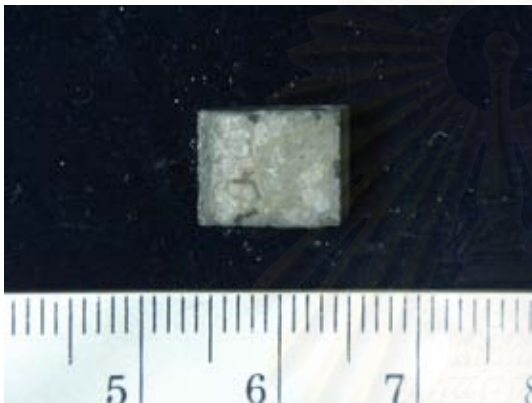


ข.)

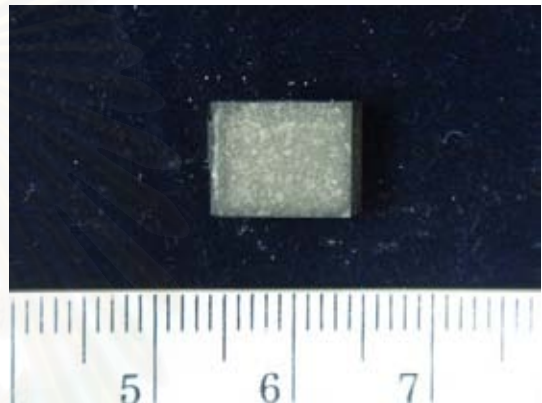


31

ค.)



ง.)



รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมไนซิงบน GTD 111 ที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 4 ชั่วโมงโดยอัตราส่วนผสม Al:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ก) 10:0, ข) 7:3, ค) 5:5, ง) 3:7 โดยน้ำหนัก

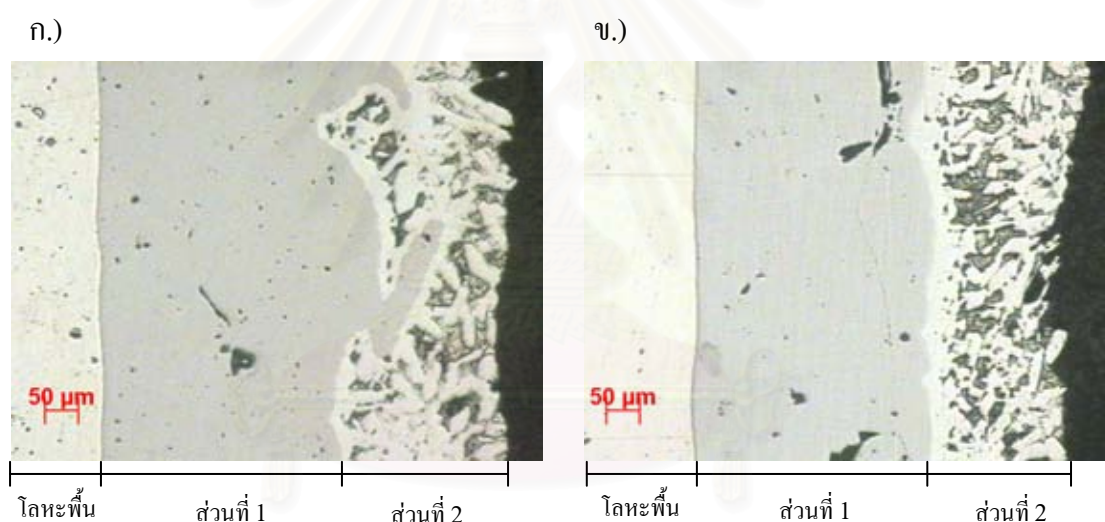
จากรูปที่ 4.9 โลหะผสมพิเศษเนื้อพ่นนิกเกิลเกรด GTD 111 ผ่านการทำอะลูมิเนียมไนซิง ที่อุณหภูมิ  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 4 ชม. โดยเปลี่ยนอัตราส่วนผสมระหว่าง Al:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> รูปที่ 4.9 ก.) อัตราส่วนผสมเป็น 10:0 พบผงอะลูมิเนียมที่เหลือจะเกาะตัวกันเป็นแผ่นติดอยู่บนชิ้นงาน มีชั้นเคลือบหนาต่อเนื่องทั้งชิ้นงาน รูปที่ 4.9 ข.) อัตราส่วนผสมเป็น 7:3 พบชั้นเคลือบหนาต่อเนื่องทั่วไป รูป 4.9 ค.) มีอัตราส่วนผสมเป็น 5:5 มีชั้นเคลือบต่อเนื่องอยู่ทั่วทั้งชิ้นงาน ส่วนรูปที่ 4.9 ง.) อัตราส่วนผสม 3:7 พบชั้นเคลือบเป็นจุดๆติดอยู่บริเวณผิวชิ้นงาน โดยทุกชิ้นยกเว้นที่อัตราส่วน 10:0 จะพบผงอะลูมิเนียมผสมผงอะลูมิเนียมที่เหลือจะเกาะตัวกันเป็นแผ่นพ่นบางหลุดออกจากผิวหน้าชิ้นงานได้

### 4.3 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวางของชั้นเคลือบ

#### 4.3.1 โครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวางของชั้นเคลือบบนโลหะนิกเกิลบริสุทธิ์

รูปที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวางของชิ้นงานโลหะนิกเกิลผ่านการทำอะลูมิเนียมไนซิง ที่อุณหภูมิ  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2.25 ชม. โดยเปลี่ยนอัตราส่วนผสมระหว่าง  $\text{Al}:\text{Al}_2\text{O}_3$  ชั้นเคลือบ ที่มีความหนาต่อเนื่องทั่วทั้งหน้าตัดในชิ้นงานที่มีอัตราส่วนผสมระหว่าง  $\text{Al}:\text{Al}_2\text{O}_3$  เป็น 10:0 (รูปที่ 4.10 ก.) มีความหนาประมาณ  $600 - 620 \mu\text{m}$  และ 7:3 (รูปที่ 4.10 ข.) มีความหนาประมาณ  $560 - 580 \mu\text{m}$  ซึ่งพบลักษณะชั้นเคลือบที่แตกต่างกันมากสองบริเวณ คือบริเวณส่วนที่ 1 ซึ่งอยู่ติดกับเนื้อพื้นนิกเกิล มีลักษณะเป็นเฟสเดียว คือเฟสซีเทา และบริเวณส่วนที่ 2 ซึ่งอยู่ติดกับผิวด้านนอก โดยบริเวณที่ 2 นี้ ประกอบไปด้วย 2 เฟสคือ เฟสสีขาว และเฟสซีเทาเข้ม

กล่าวได้ว่าชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมไนซิงบนโลหะนิกเกิลที่อุณหภูมิ  $1000^{\circ}\text{C}$  เวลา 2.25 ชม. ประกอบไปด้วย 2 ส่วน ที่มี 3 เฟสดังที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น

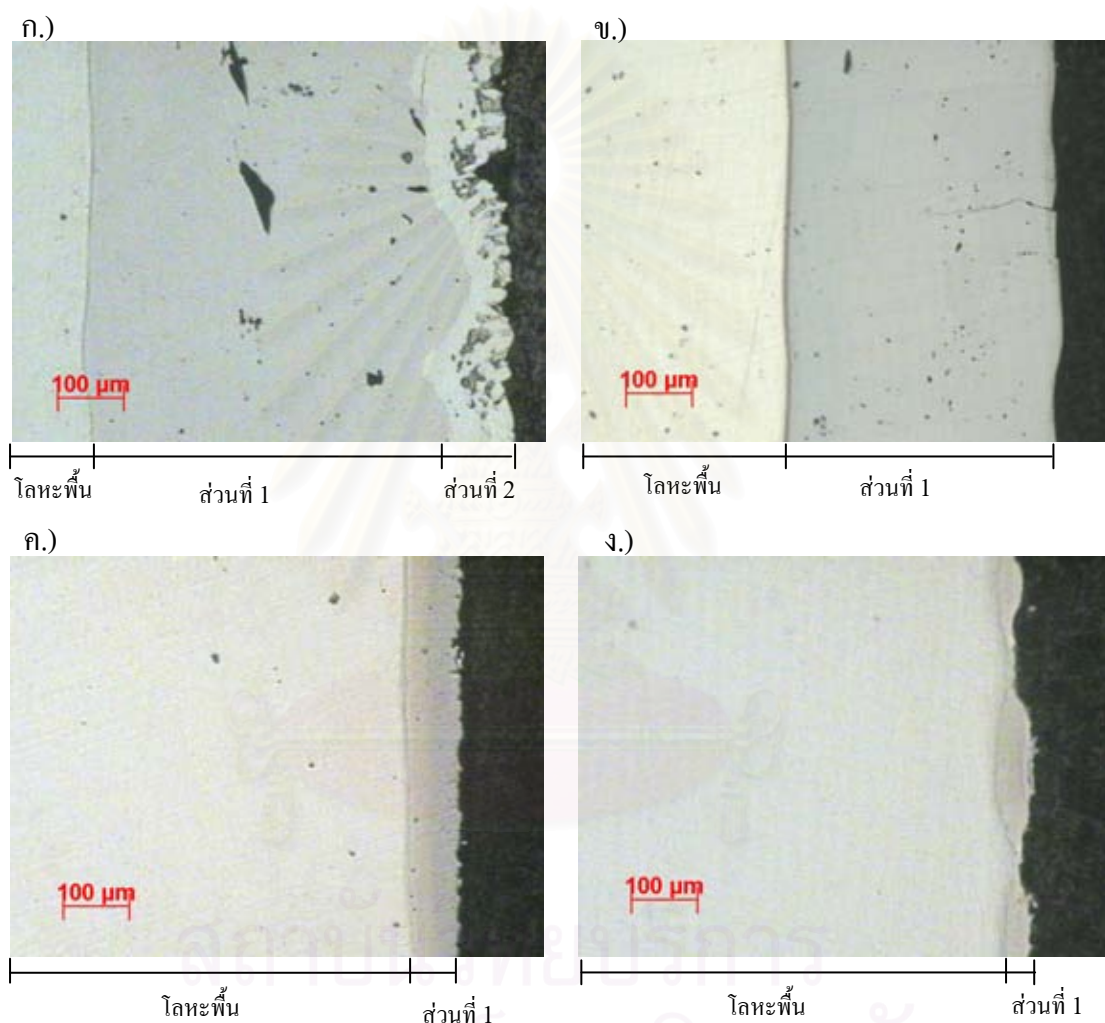


รูปที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวางของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมไนซิงบนโลหะนิกเกิล ที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2.25 ชั่วโมง โดยอัตราส่วนผสม  $\text{Al}:\text{Al}_2\text{O}_3$  ก) 10:0, ข) 7:3 โดยน้ำหนัก

โดยเมื่อทำการเพิ่มเวลาเป็น 4 ชม. ใน กรณีอัตราส่วน 10:0 (รูปที่ 4.11 ก.) พบชั้นเคลือบเป็น 2 ส่วน ประกอบด้วย 3 เฟส เช่นเดียวกับในกรณีของชิ้นงานใช้เวลา 2.25 ชม. โดยชั้นเคลือบทั้ง 2 ส่วน มีความหนา  $640 - 660 \mu\text{m}$  เมื่อพิจารณาแยกเป็นส่วนจะพบว่าที่ชิ้นงานอัตราส่วน 10:0 เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจาก 2.25 เป็น 4 ชม. ความหนาของส่วนที่ 1 จะเพิ่มขึ้น (จาก  $300$  เป็น  $500 \mu\text{m}$ ) ในขณะที่ความหนาของส่วนที่ 2 ลดลง (จาก  $300$  เป็น  $150 \mu\text{m}$ )

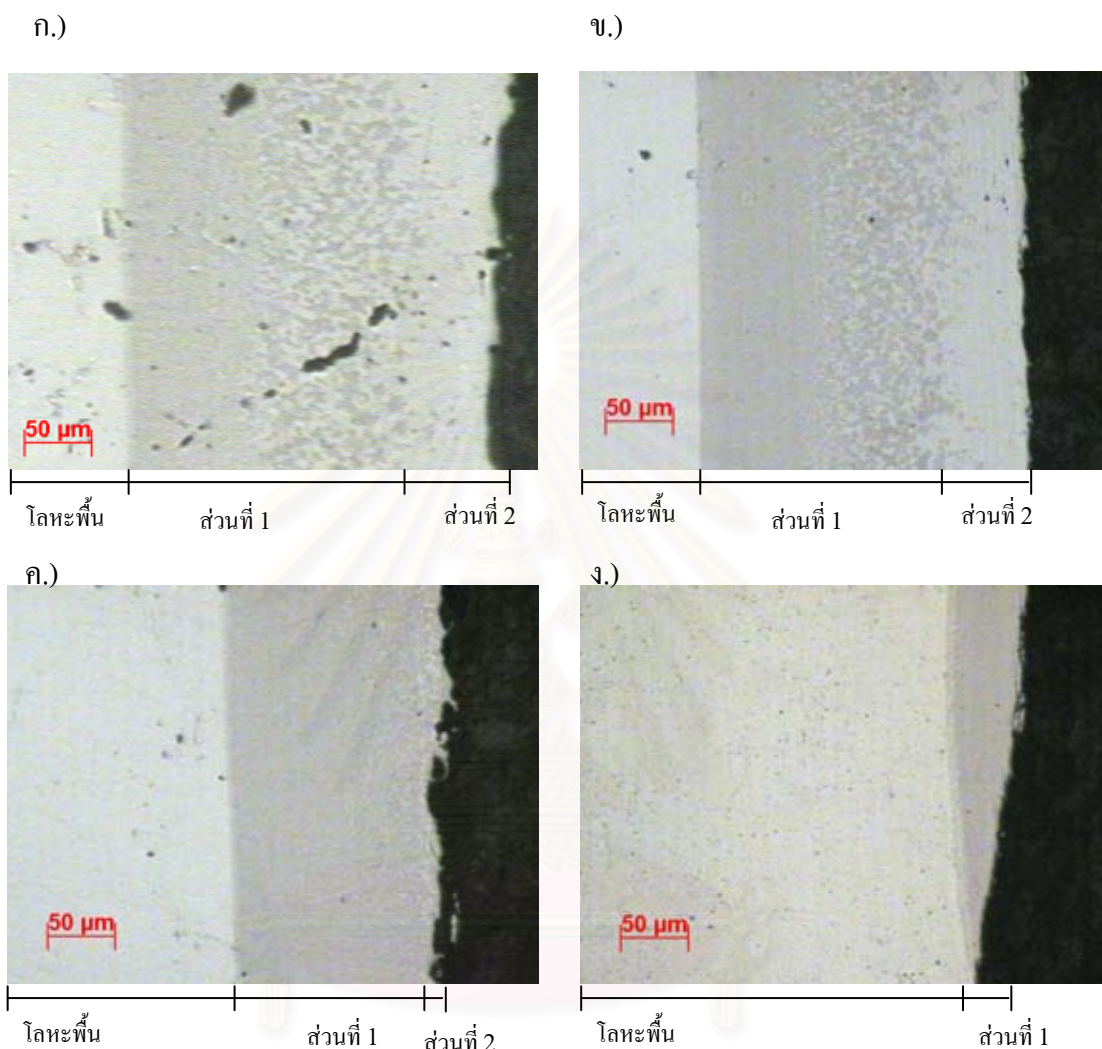


สำหรับชิ้นงานที่เคลือบโดยใช้อัตราส่วนผสมเป็น 7:3 ชั้นเคลือบมีความหนาประมาณ 580 – 590  $\mu\text{m}$  (ดังรูปที่ 4.11 ข.) เมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนผสมของอะลูมิเนียมน้อยลงเป็น 5:5 (รูปที่ 4.11 ค.) พบชั้นเคลือบที่มีความหนาน้อยลง (60 – 100  $\mu\text{m}$ ) เมื่อส่วนผสมเป็น 3:7 พบชั้นเคลือบติดอยู่เฉพาะบางพื้นที่ไม่ทั่วทั้งชิ้นงาน (ดังรูปที่ 4.11 ง.) โดยทั้งสามอัตราส่วนคือ 7:3, 5:5, 3:7 พบว่าลักษณะชั้นเคลือบมีส่วนที่ 1 เพียงส่วนเดียว นั่นคือ พบเพียงเฟสสีกา เพียงเฟสเดียว



รูปที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคตัดขวางของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบนโลหะนิกเกิล ที่ 1000°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยอัตราส่วนผสม Al:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ก) 10:0, ข) 7:3, ค) 5:5, ง) 3:7 โดยน้ำหนัก

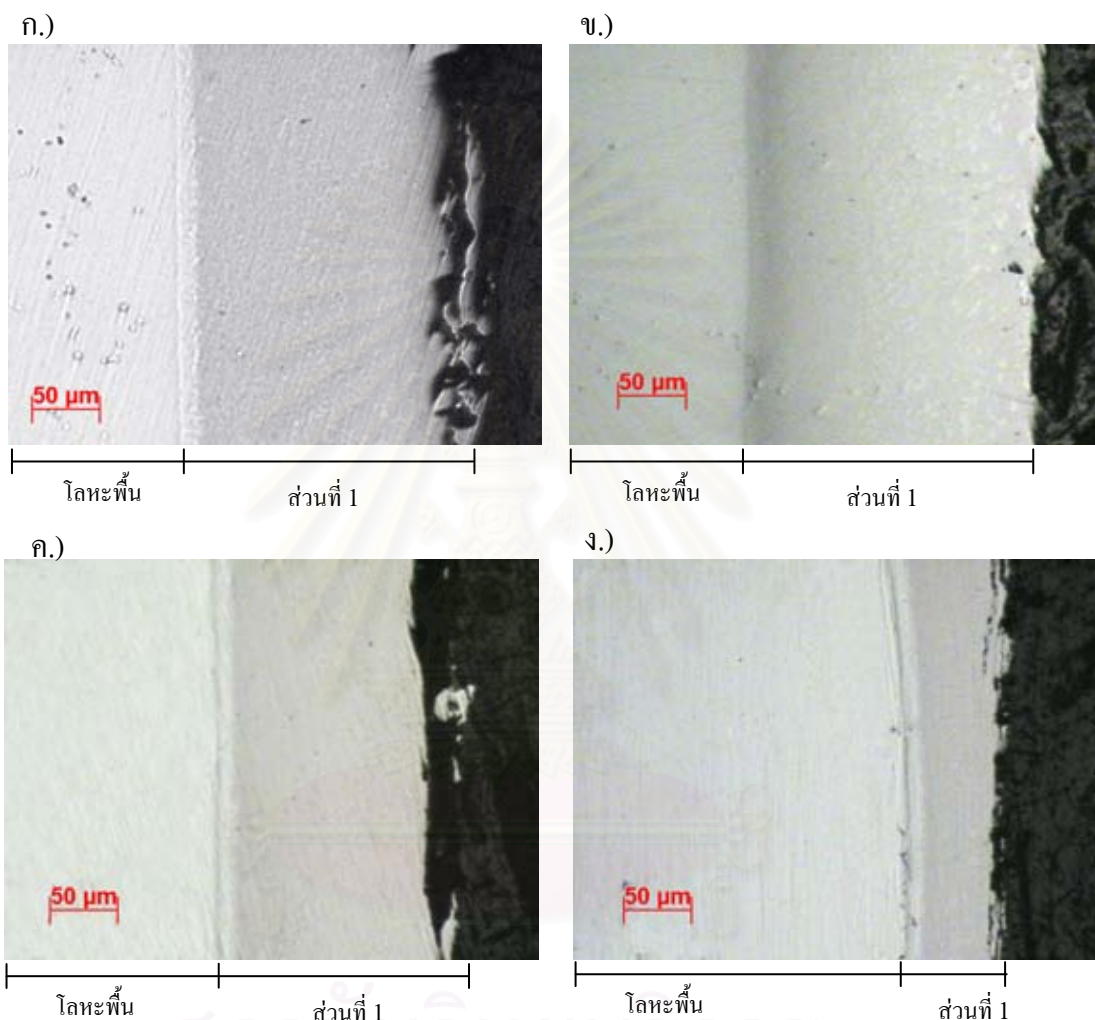
### 4.3.2 โครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวางของชั้นเคลือบบนโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลเกรด Inconel 738



รูปที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคตัดขวางของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบน In 738 ที่ 1000°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยอัตราส่วนผสม Al:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ก) 10:0, ข) 7:3, ค) 5:5, ง) 3:7 โดยน้ำหนัก

โครงสร้างจุลภาคตัดขวางของชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลเกรด IN 738 ผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 1 ชม. ได้แสดงไว้ในรูป 4.12 โดยที่พบชั้นเคลือบที่มีความหนาต่อเนื่องทั่วทั้งหน้าตัดในชิ้นงานที่มีอัตราส่วนผสมระหว่าง Al:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เป็น 10:0 (หนาประมาณ 290 – 300 μm) และ 7:3 (หนาประมาณ 240 – 250 μm) ดังรูปที่ 4.11 ก.) และ ข.) ตามลำดับ พบชั้นเคลือบที่มีความหนาน้อยกว่า และมีความไม่ต่อเนื่อง ในชิ้นงานอัตราส่วน 5:5 (หนา 140 – 200 μm) ดังรูปที่ 4.12 ค) โดยสีของผิวชั้นเคลือบในอัตราส่วน 10:0, 7:3 และ 5:5 มีลักษณะคล้ายกันคือมีบริเวณที่สีแตกต่างกันเห็นชัดเจน 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 บริเวณใกล้เนื้อพื้่นมีสี

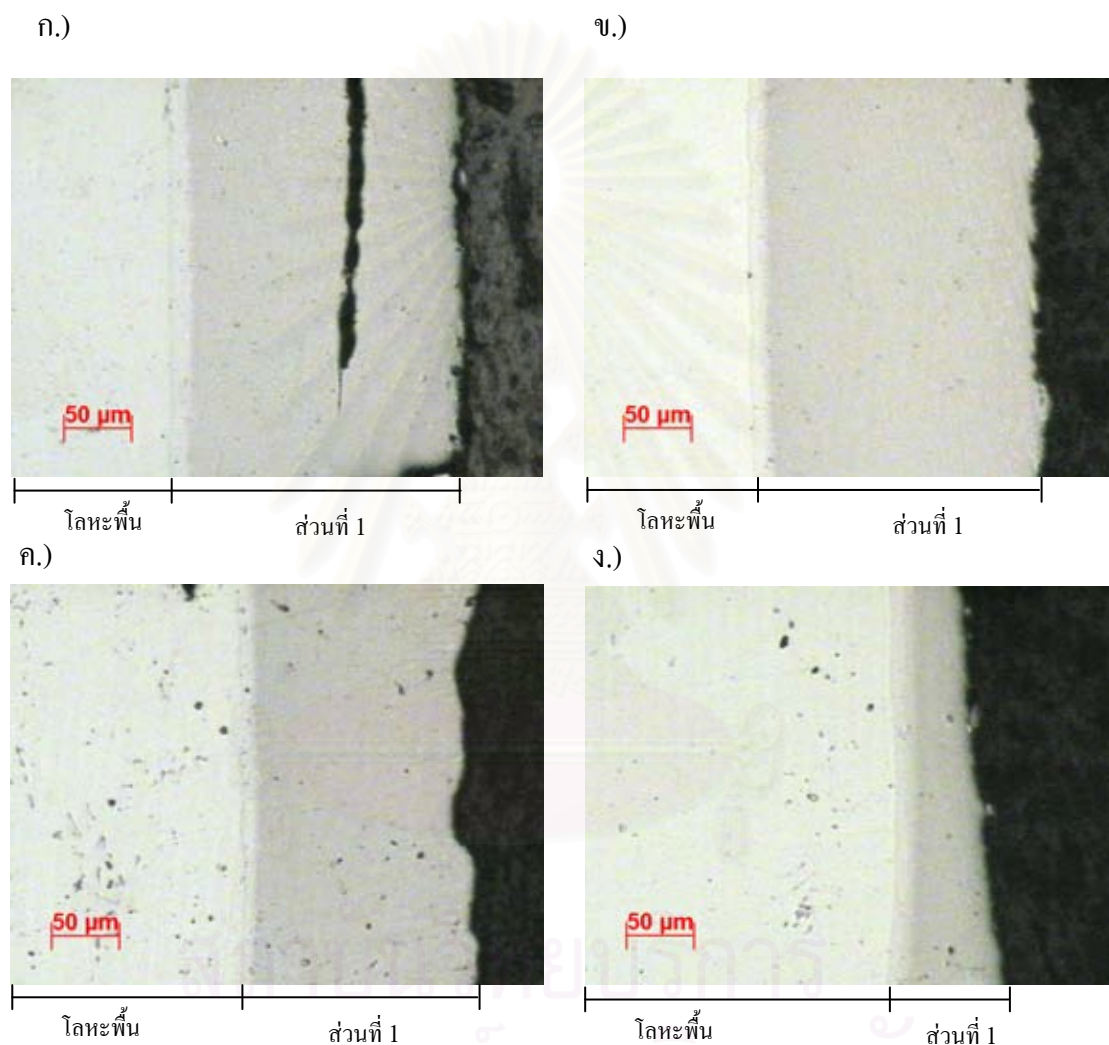
เทาสลับขาว และส่วนที่ 2 เป็นสีขาวอยู่บริเวณผิวนอก แต่ที่อัตราส่วนผสมของอะลูมิเนียมมีน้อยลง เป็น 3:7 พบชั้นเคลือบที่ไม่ต่อเนื่องความหนาแน่น (0-60  $\mu\text{m}$ ). ดังรูปที่ 4.12 ง.) และลักษณะชั้นเคลือบจะมีเพียงส่วนที่ 1 ที่มีสีเทาเพียงส่วนเดียว แต่จะพบแถบสีขาว ที่บริเวณรอยต่อของผิวเคลือบกับเนื้อพื้น



รูปที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาคตัดขวางของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิงบน In 738 ที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2.25 ชั่วโมง โดยอัตราส่วนผสม Al:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ก) 7:3, ข) 5:5, ค) 3:7 โดยน้ำหนัก

โครงสร้างจุลภาคตัดขวางของชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด IN 738 ผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิงที่อุณหภูมิ  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2.25 ชม. ได้แสดงไว้ในรูป 4.13 โดยที่พบชั้นเคลือบมีความหนาต่อเนื่องทั่วทั้งหน้าตัด ในชิ้นงานที่มีอัตราส่วนผสม Al:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เป็น 10:0 (หนาประมาณ 210 – 230  $\mu\text{m}$ ) 7:3 (หนาประมาณ 220 – 230  $\mu\text{m}$ ) ดังรูปที่ 4.13 ก.) และ ข.) ตามลำดับ แต่ที่อัตราส่วนผสมของอะลูมิเนียมมีน้อยลงเป็น 5:5 (รูป 4.13 ข.) ชั้นเคลือบไม่ต่อเนื่องมีความหนาตั้งแต่ 140 – 160  $\mu\text{m}$  และที่ 3:7 (รูป 4.13 ค.) พบชั้นเคลือบเป็นบางพื้นที่ที่มีความหนาแน่น (60-

90  $\mu\text{m}$ ) ลักษณะของผิวเคลือบในทุกๆอัตราส่วนพบลักษณะชั้นเคลือบส่วนที่ 1 เพียงส่วนเดียว โดยบริเวณรอยต่อของผิวชั้นเคลือบและเนื้อพื้นโลหะเดิม มีแถบสีขาวปรากฏ เหมือนชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด IN 738 ผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิงที่อุณหภูมิ  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชม. ในอัตราส่วนผสมเป็น 5:5 และ 3:7



รูปที่ 4.14 โครงสร้างจุลภาคตัดขวางของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิงบน IN 738 ที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยอัตราส่วนผสม Al:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ก) 10:0, ข) 7:3, ค) 5:5, ง) 3:7 โดยน้ำหนัก

เช่นเดียวกันกับชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด IN 738 ผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิงที่อุณหภูมิ  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2.25 ชม. เมื่อเพิ่มเวลาทำอะลูมิเนียมในซิงให้ชิ้นงานเป็นเวลา 4 ชม. ชั้นเคลือบที่พบจะมีเพียงส่วนที่ 1 โดยมีลักษณะสีเทาทั้งผิวชั้นเคลือบโดยบริเวณรอยต่อของผิวชั้นเคลือบและเนื้อพื้นโลหะเดิมมีแถบสีขาวปรากฏ โดยที่ความหนาชั้นเคลือบมีความต่อเนื่องทั่วทั้ง

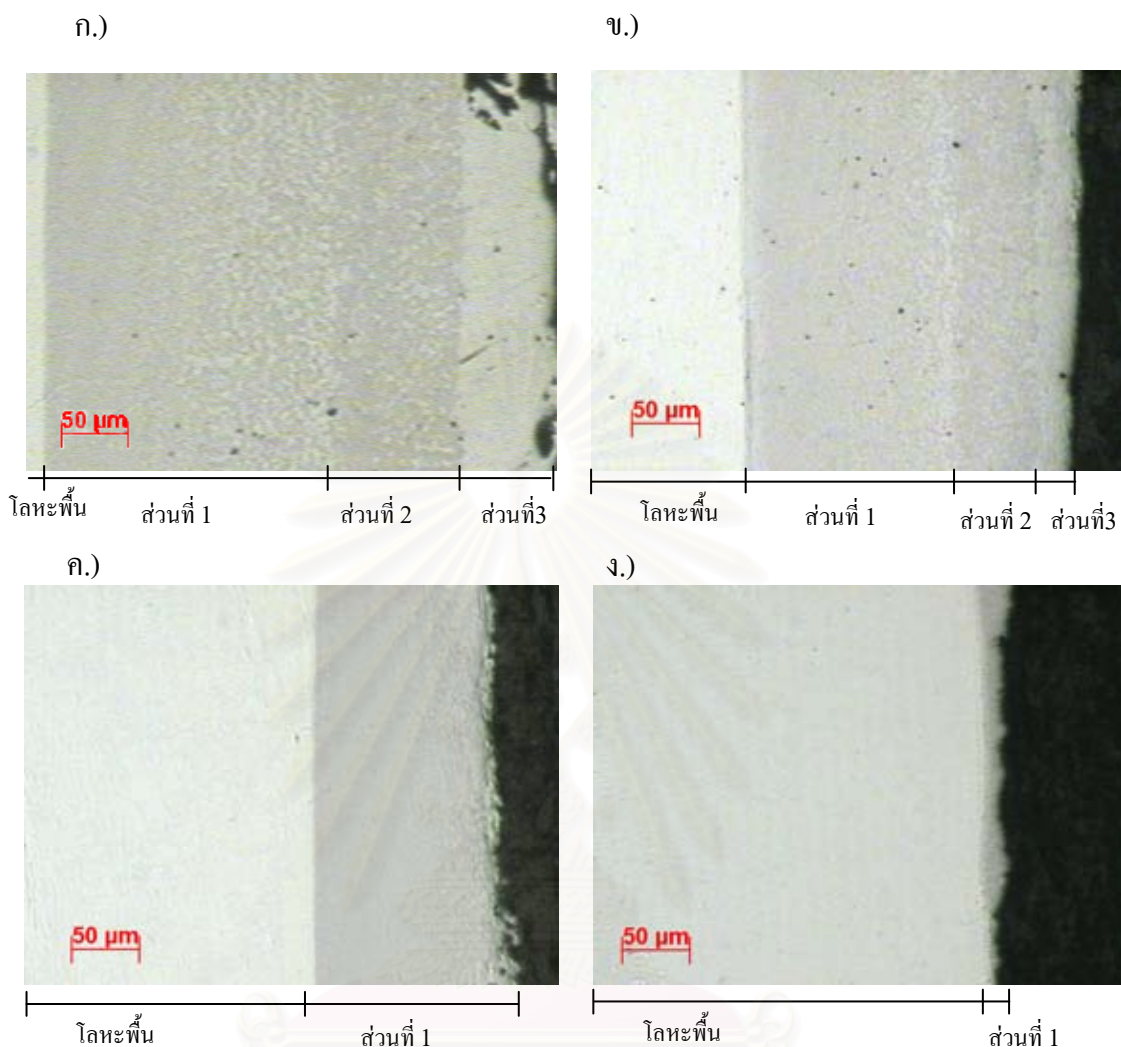
หน้าตัดในชิ้นงาน ที่มีอัตราส่วนผสมระหว่าง  $Al:Al_2O_3$  เป็น 10:0 (หนาประมาณ 205 – 215  $\mu m$ ) และ 7:3 (หนาประมาณ 210 – 215  $\mu m$ ) ดังรูปที่ 4.14 ก.) และ ข.) ตามลำดับ แต่ที่อัตราส่วนผสมของอะลูมิเนียมร้อยละเป็น 5:5 (มีความหนาตั้งแต่ 150 – 400  $\mu m$ ) และ 3:7 (มีความหนาตั้งแต่ 50 – 90  $\mu m$ ) ดังรูป 4.14 ค.)และ ง.) ตามลำดับ พบว่าความหนาชั้นเคลือบ น้อยกว่าและไม่ต่อเนื่อง

#### 4.3.3 โครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวางของชั้นเคลือบบนโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด GTD 111

รูปที่ 4.15 แสดงโครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวางของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด GTD 111 ผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิงที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 1 ชม. โดยที่พบชั้นเคลือบที่มีความหนาต่อเนื่องทั่วทั้งหน้าตัดในชิ้นงาน ที่มีอัตราส่วนผสมระหว่าง  $Al:Al_2O_3$  เป็น 10:0 (รูปที่ 4.15 ก.) มีความหนาหนาประมาณ 350 – 365  $\mu m$  พบการแตกของผิวเคลือบบางจุด และ 7:3 (รูปที่ 4.15 ข.) มีความหนาประมาณ 240 – 255  $\mu m$  ซึ่งพบลักษณะสีผิวชั้นเคลือบเหมือนกันทั้งสองอัตราส่วนคือมีสีที่แตกต่างกัน 3 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 บริเวณด้านในติดกับเนื้อพื้นมีสีเทาเข้ม ส่วนที่ 2 ตรงกลางชั้นเคลือบมีสีเทาอ่อนและเทาเข้มสลับกัน และส่วนที่ 3 บริเวณด้านนอกของผิวเคลือบมีสีขาว

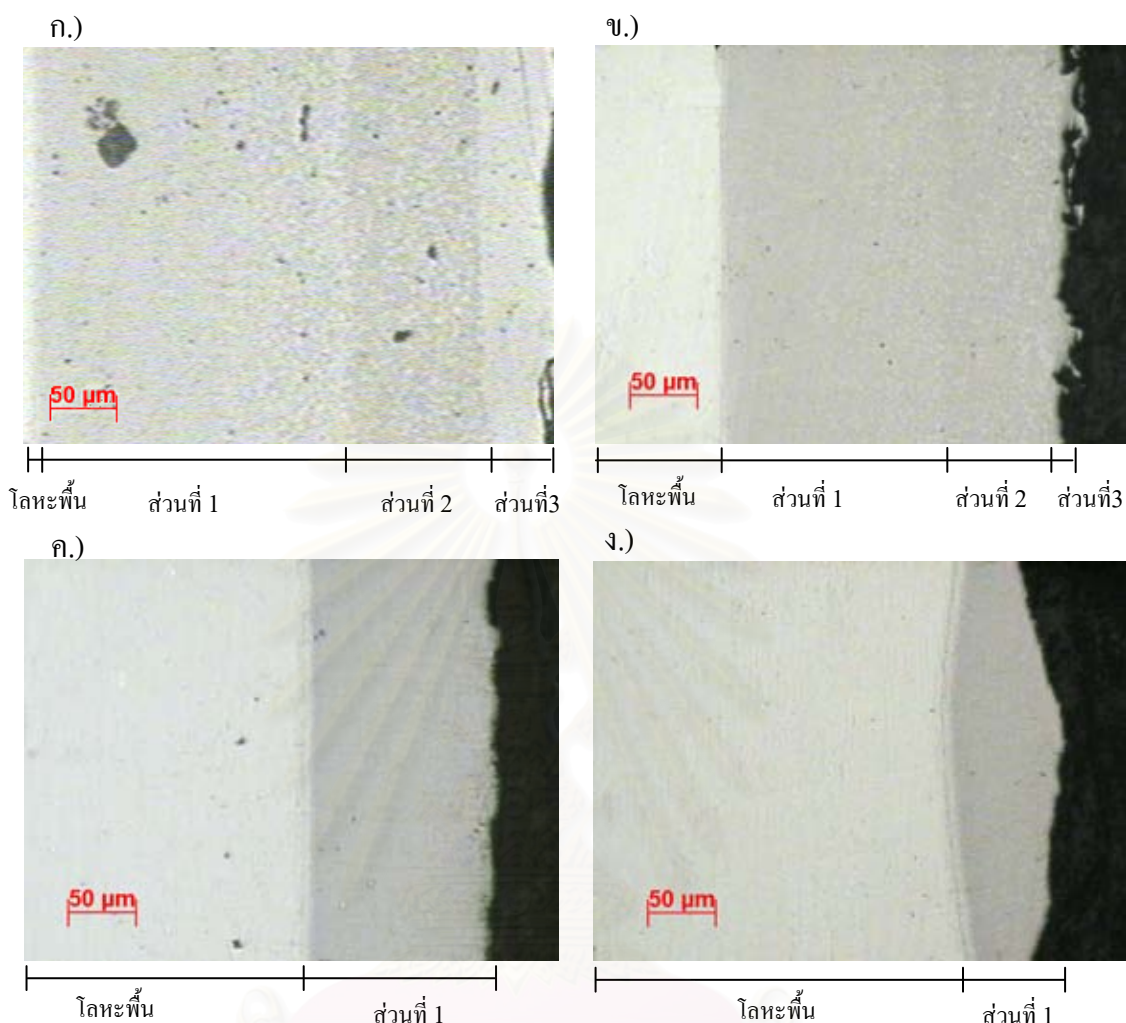
ที่อัตราส่วนผสมของอะลูมิเนียมร้อยละเป็น 5:5 (รูปที่ 4.15 ค.) ชั้นเคลือบมีความหนาตั้งแต่ 100 – 150  $\mu m$  และเมื่ออัตราส่วนผสมเป็น 3:7 (รูปที่ 4.15 ง.) พบชั้นเคลือบติดบนผิวชิ้นงานมีความหนาน้อยมากประมาณ 0 – 70  $\mu m$  โดยชั้นเคลือบที่ได้ไม่ต่อเนื่อง ลักษณะชั้นเคลือบ ทั้งสองอัตราส่วนจะมีเพียงส่วนที่ 1 ที่เป็นสีเทาอ่อนเพียงส่วนเดียว โดยบริเวณรอยต่อของผิวชั้นเคลือบและเนื้อพื้นโลหะเดิมมีแถบ สีขาวปรากฏ

เมื่อเพิ่มเวลาเป็น 2.25 ชม. ลักษณะผิวเคลือบในกรณี 10:0 ( หนาประมาณ 390 – 410  $\mu m$  ) และ 7:3 (หนาประมาณ 240 – 255  $\mu m$ ) (ดังรูปที่ 4.16 ก. และ ข. ตามลำดับ) เหมือนกับชิ้นงาน โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด GTD 111 เป็นเวลา 1 ชม. สัดส่วน 10:0 และ 7:3 คือมี 3 ส่วน มีการเปลี่ยนแปลงคือส่วนที่ 1 หนาเพิ่มขึ้น ในขณะที่ ส่วนที่ 2 และ 3 ความหนาลดลงเมื่อเทียบกับที่เวลา 1 ชม. ที่อัตราส่วนเดียวกัน โดยที่ชั้นเคลือบในทั้งสองส่วนผสม มีความหนาต่อเนื่องทั่วทั้งหน้าตัด



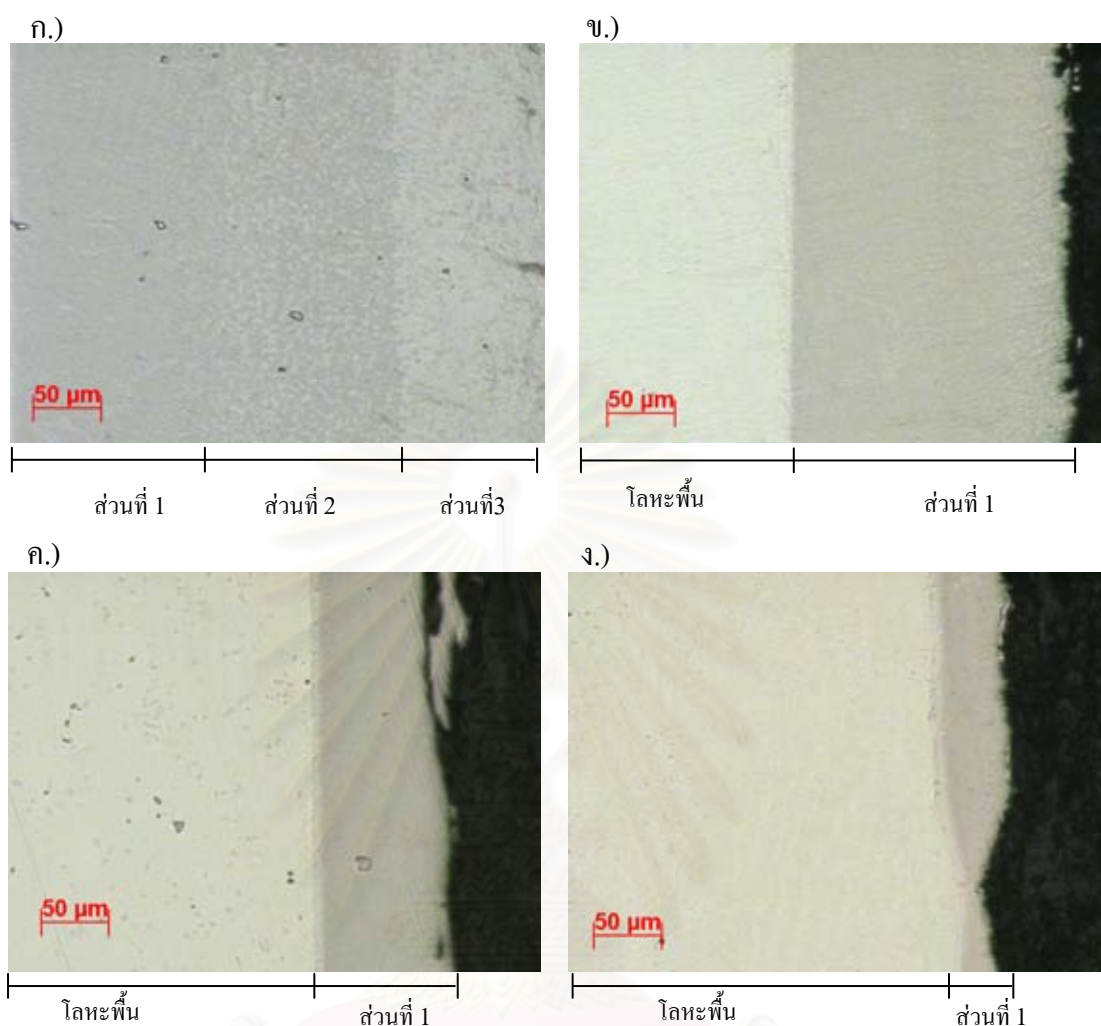
รูปที่ 4.15 โครงสร้างจุลภาคตัดขวางของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมไนซิงบน GTD 111 ที่ 1000°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยอัตราส่วนผสม Al:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ก) 10:0, ข) 7:3, ค) 5:5, ง) 3:7 โดยน้ำหนัก

สำหรับชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้กนิกเกิลเกรด GTD 111 ผ่านการทำอะลูมิเนียมไนซิงที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 2.25 ชม. ที่มีอัตราส่วนผสมระหว่าง Al:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เป็น 5:5 และ 3:7 จะพบชั้นเคลือบส่วนที่ 1 เพียงส่วนเดียว โดยที่พบว่าที่อัตราส่วนเป็น 5:5 (รูปที่ 4.16 ค.) มีความหนาชั้นเคลือบไม่ต่อเนื่อง หนาตั้งแต่ 120 – 150 μm และเมื่ออัตราส่วนผสมของอะลูมิเนียมเข้มข้นลงเหลือ 3:7 (รูปที่ 4.16 ง.) พบชั้นเคลือบติดบนผิวชิ้นงานไม่ต่อเนื่อง มีความหนาน้อยมาก (0 – 90 μm)



รูปที่ 4.16 โครงสร้างจุลภาคตัดขวางของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิงบน GTD 111 ที่ 1000°C เป็นเวลา 2.25 ชั่วโมง โดยอัตราส่วนผสม Al:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ก) 10:0, ข) 7:3, ค) 5:5, ง) 3:7 โดยน้ำหนัก

โครงสร้างจุลภาคตัดขวางของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้กเกิดเกรด GTD 111 ผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิงที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 4 ชม. ได้แสดงไว้ในรูป 4.17 โดยที่พบชั้นเคลือบที่มีความหนาต่อเนื่องทั่วทั้งหน้าตัดในชิ้นงานที่มีอัตรา ส่วนผสมระหว่าง Al:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เป็น 10:0 (หนาประมาณ 410-430 μm) ดังรูปที่ 4.17 ก. โดยสีผิวชั้นเคลือบที่แตกต่างกันมาก 3 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 บริเวณด้านในติดกับเนื้อพื้กมีสีเทาเข้ม ส่วนที่ 2 ตรงกลางชั้นเคลือบมีสีเทาอ่อนและเทาเข้มสลับกัน และส่วนที่ 3 บริเวณด้านนอกของผิวเคลือบมีสีขาว



รูปที่ 4.17 โครงสร้างจุลภาคตัดขวางของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในชิงบน GTD 111 ที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยอัตราส่วนผสม  $\text{Al}:\text{Al}_2\text{O}_3$  ก) 10:0, ข) 7:3, ค) 5:5, ง) 3:7 โดยน้ำหนัก

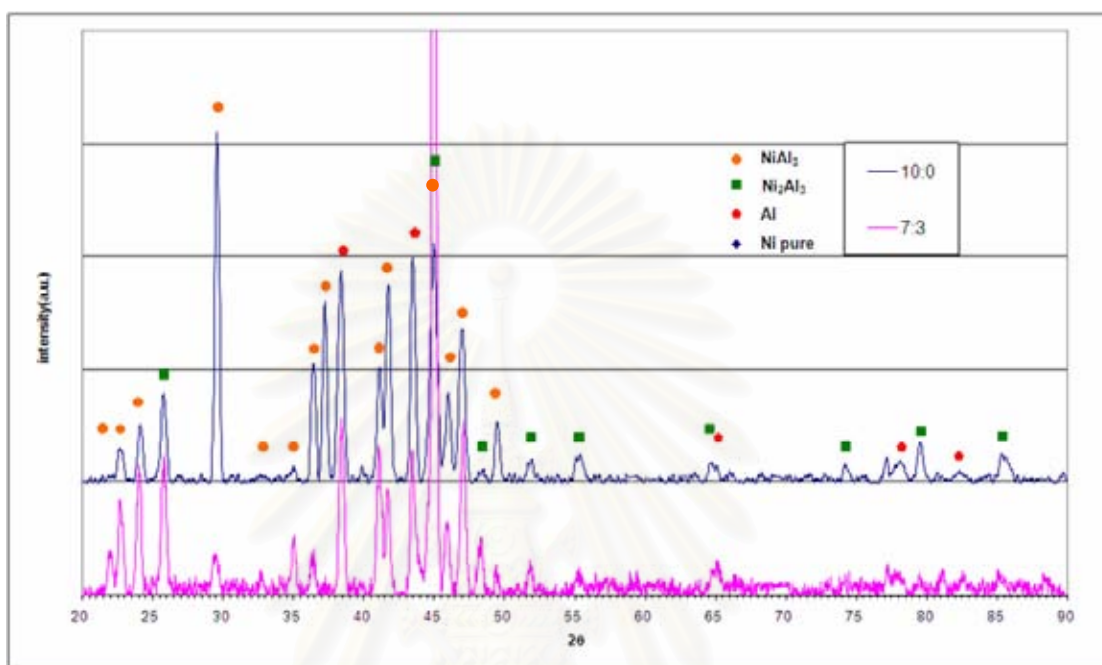
รูปที่ 4.17 ข.) หน้าตัดของชิ้นงานที่มีอัตราส่วนผสมระหว่าง  $\text{Al}:\text{Al}_2\text{O}_3$  เป็น 7:3 (หนาประมาณ  $240 - 260 \mu\text{m}$ ) พบชั้นเคลือบที่มีความหนาต่อเนื่องทั่วทั้งหน้าตัด ที่อัตราส่วนผสมของอะลูมิเนียมน้อยลงเป็น 5:5 (รูปที่ 4.17 ค.) ความหนาชั้นเคลือบไม่ต่อเนื่อง หนาตั้งแต่  $95 - 170 \mu\text{m}$  และเมื่ออัตราส่วนผสมของอะลูมิเนียมน้อยลงเหลือ 3:7 (รูปที่ 4.17 ง.) พบชั้นเคลือบติดบนผิวชิ้นงานมีความหนาน้อยมาก อีกทั้งยังไม่ต่อเนื่อง ( $0 - 50 \mu\text{m}$ ) โดยลักษณะผิวเคลือบที่พบในชิ้นงานที่อัตราส่วน 7:3, 5:5 และ 3:7 จะพบชั้นเคลือบ ส่วนที่ 1 เพียงส่วนเดียวเท่านั้น



#### 4.4 ผลการตรวจสอบเชิงคุณภาพของชั้นเคลือบ

##### 4.4.1 ผลการตรวจสอบเชิงคุณภาพโดย XRD

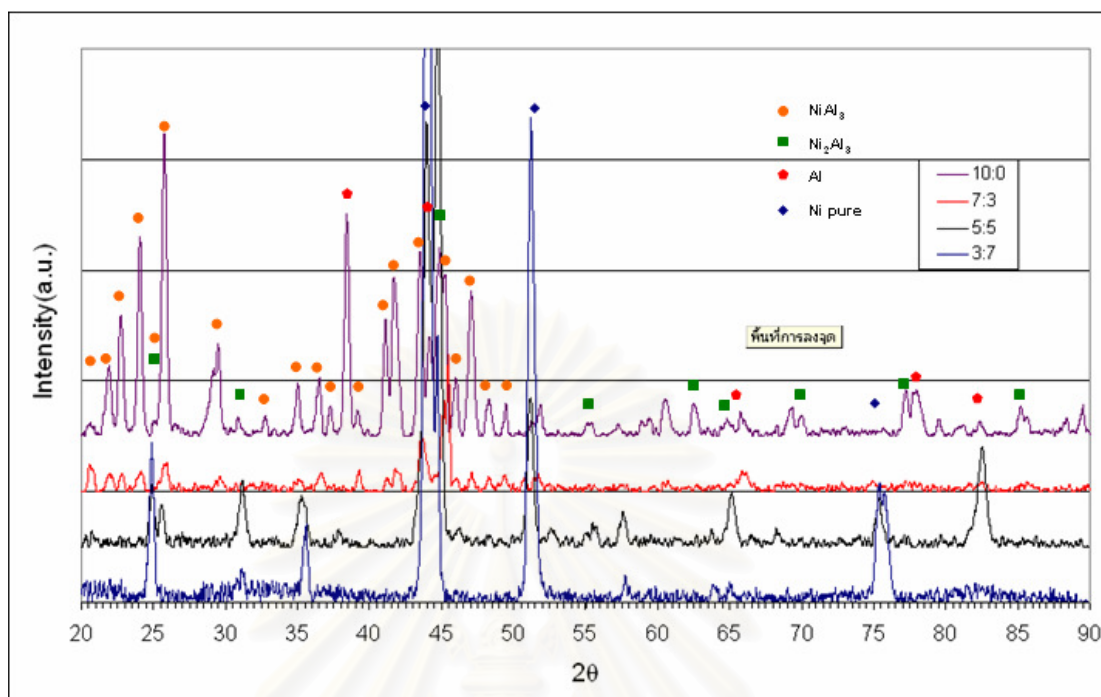
##### 4.4.1.1 การตรวจสอบเชิงคุณภาพโดย XRD ของโลหะนิกเกิล



รูปที่ 4.18 ผลการเปรียบเทียบการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบนนิกเกิล ที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2.25 ชั่วโมง ด้วยวิธี GIXD

จากรูปที่ 4.18 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบด้วย XRD แบบ GIXD ที่มุมตกกระทบ  $5^{\circ}$  ของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบน โลหะนิกเกิล ที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2.25 ชม. ที่อัตราส่วนผสม  $\text{Al}:\text{Al}_2\text{O}_3$  เป็น 10:0 และ 7:3 พบพีคของเฟส  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$ ,  $\text{NiAl}_3$ , Al และ Ni (JCPDS No.03-1052, 02-0416, 85-1327 และ 88-2326) เกิดขึ้น โดยพีคที่มีความเข้มสัมพัทธ์ (Relative Intensity) สูงสุดคือ เฟส  $\text{NiAl}_3$  ซึ่งเหมือนกันทั้งอัตราส่วน 10:0 และ 7:3

กรณีของชิ้นงานโลหะนิกเกิลที่ผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิง ที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 4 ชม. จากรูปที่ 4.19 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบด้วย XRD แบบ GIXD ที่มุมตกกระทบ  $5^{\circ}$  ที่อัตราส่วนผสม  $\text{Al}:\text{Al}_2\text{O}_3$  เป็น 10:0 พบพีคของเฟส  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$ ,  $\text{NiAl}_3$ , Al และ Ni โดยพีคที่มีความเข้มสัมพัทธ์ (Relative Intensity) สูงสุดคือ เฟส  $\text{NiAl}_3$  และยังพบความเข้มสัมพัทธ์ของพีค Al สูงด้วย ซึ่งต่างที่อัตราส่วนผสมอื่นๆจะไม่พบพีคของ Al สำหรับที่อัตราส่วน 7:3 พีคที่มีความเข้มสัมพัทธ์สูงสุดคือ  $\text{NiAl}_3$  ส่วนที่อัตราส่วนอะลูมิเนียมลดลงเป็น 5:5 และ 3:7 พบว่า พีคที่มีความเข้มสัมพัทธ์สูงสุดกลายเป็น พีคของ Ni และมีพีคของ  $\text{NiAl}_3$

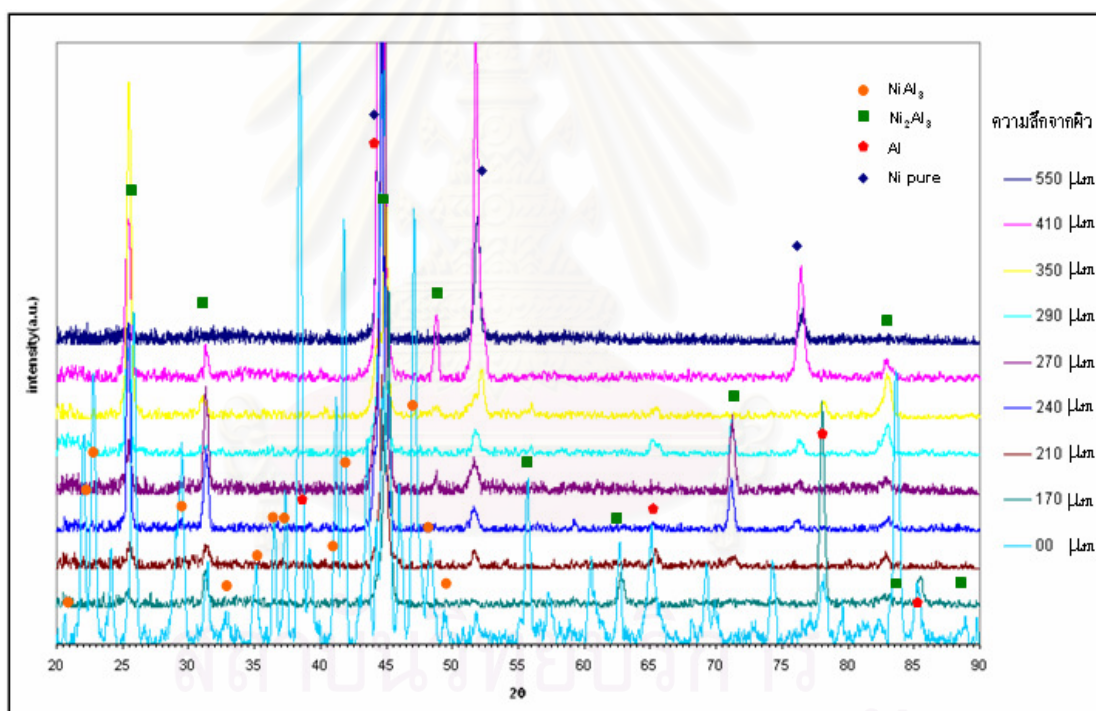


รูปที่ 4.19 ผลการเปรียบเทียบการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบน นิกเกิลที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยวิธี GIXD

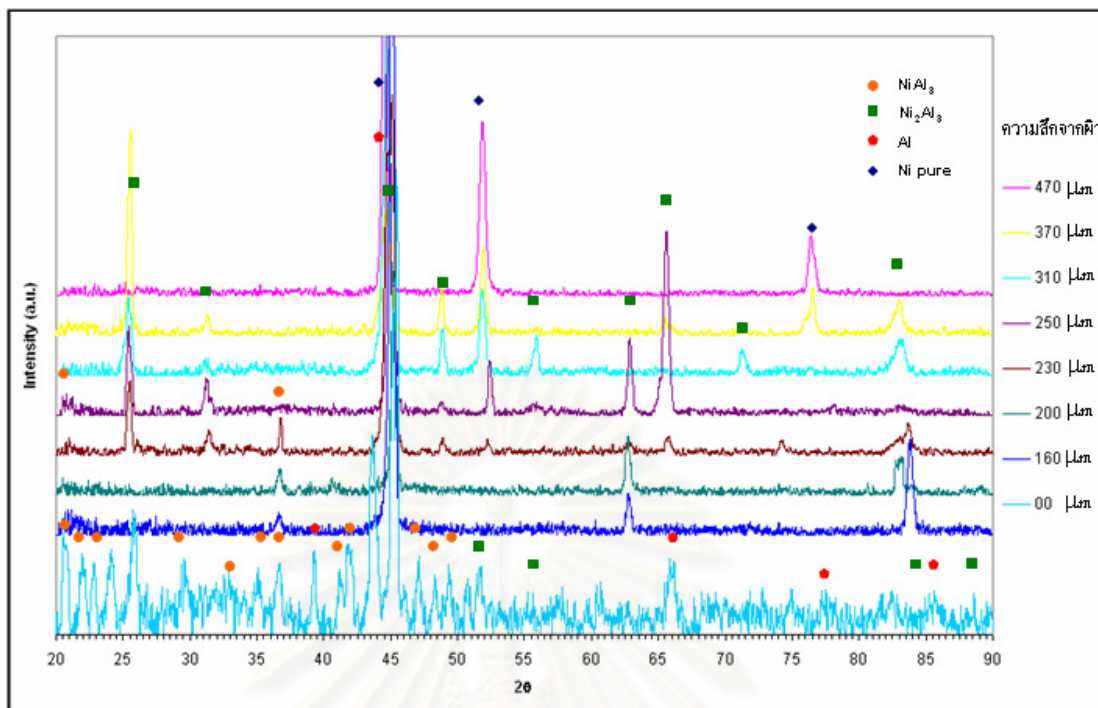
เนื่องจากภาพถ่าย โครงสร้างจุลภาคตัดขวางแสดงให้เห็นว่าชั้นเคลือบมีลักษณะแตกต่างกัน ที่ความลึกต่างกัน จึงได้ทำการตรวจสอบชิ้นงานที่ความลึกต่างๆจากผิวด้วย XRD แบบ GIXD ที่ มุมตกกระทบ  $5^{\circ}$  เมื่อพิจารณาชิ้นงานผ่านการทำ อะลูมิเนียมในเชิงบน โลหะนิกเกิล ที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2.25 ชม. ที่อัตราส่วนผสมทั้ง 10:0 และ 7:3 มีลักษณะใกล้เคียงกันจึงเลือกชิ้นงานอัตราส่วน 7:3 มา ตรวจสอบ

ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำ อะลูมิเนียมในเชิงบน โลหะนิกเกิล ที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2.25 ชม. ที่อัตราส่วนผสม Al:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เป็น 7:3 ที่ความลึกต่างๆกัน ด้วย XRD แบบ GIXD ที่ มุมตกกระทบ  $5^{\circ}$  ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.20 พบว่าที่ผิวนอกสุดของชั้นเคลือบ พบฟิสิกของเฟส Ni<sub>2</sub>Al<sub>3</sub>, NiAl<sub>3</sub>, Al, และ Ni โดยฟิสิกของ Al และ ฟิสิกของ NiAl<sub>3</sub> มีความเข้มสัมพัทธ์สูง แต่เมื่อทำการ ตรวจสอบ ที่ความลึกจากผิวนอกเข้ามา ที่ความลึก 170  $\mu\text{m}$  ความเข้มสัมพัทธ์ของฟิสิก NiAl<sub>3</sub> จะ ค่อยๆลดลงเหลือซึ่งตรงข้ามกับฟิสิกของ Ni<sub>2</sub>Al<sub>3</sub> ที่มีความเข้มสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น และเมื่อทำการทดสอบ เข้าไปที่ความลึก 240  $\mu\text{m}$  จะเริ่มพบ ความเข้มสัมพัทธ์ของฟิสิก Ni ที่มากขึ้น โดยที่เมื่อเพิ่มความลึก ผิวนั้น ฟิสิกของ Ni<sub>2</sub>Al<sub>3</sub> จะค่อยๆมีความเข้มสัมพัทธ์ที่ต่ำลง และเมื่อทดสอบลึกเข้าไปที่ความลึก 550  $\mu\text{m}$  ฟิสิกของ Ni<sub>2</sub>Al<sub>3</sub> จะหายไปพบเพียงฟิสิกของ Ni

สำหรับชิ้นงานผ่านการทำ อะลูมิเนียมในเชิงบนโลหะนิกเกิล ที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 4 ชม. ที่อัตราส่วนผสม 7:3, 5:5 และ 3:7 ชั้นเคลือบประกอบไปด้วยส่วนที่ 1 เพียงส่วนเดียว และเป็นเนื้อเดียวกันหมด แต่ที่อัตราส่วน 10:0 มีความแตกต่างกันที่ความลึกต่างๆ จึงเลือกชิ้นงาน 10:0 มาตรวจสอบที่ความลึกต่างๆกัน ด้วย XRD แบบ GIXD ที่มุมตกกระทบ  $5^{\circ}$  (รูปที่ 4.21) พบว่าที่ผิวนอกสุดของชั้นเคลือบพบฟิสิกของเฟส  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$ ,  $\text{NiAl}_3$  และ  $\text{Al}$ ,  $\text{Ni}$  โดยมีฟิสิกของ  $\text{NiAl}_3$  และ ฟิสิกของ  $\text{Al}$  ซึ่งมีความเข้มสัมพัทธ์สูง แต่เมื่อทำการตรวจสอบที่ความลึกจากผิวเข้ามา ที่ความลึก  $160\ \mu\text{m}$  ความเข้มสัมพัทธ์ของฟิสิก  $\text{NiAl}_3$  จะค่อยๆลดลงเหลือซึ่งตรงข้ามกับฟิสิกของ  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  ที่ความเข้มสัมพัทธ์เพิ่มขึ้น และเมื่อทำการทดสอบ เข้าไปที่ความลึก  $250\ \mu\text{m}$  จะเริ่มพบความเข้มสัมพัทธ์ของฟิสิก  $\text{Ni}$  ที่มากขึ้น โดยที่เมื่อความลึกผิวเพิ่มมากขึ้นอีก ฟิสิกของ  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  จะความเข้มสัมพัทธ์ที่ต่ำลง และเมื่อทดสอบลึกเข้าไปที่ความลึก  $470\ \mu\text{m}$  พบเพียงฟิสิกของเฟส  $\text{Ni}$



รูปที่ 4.20 ผลการเปรียบเทียบการตรวจสอบชั้นเคลือบที่ความลึกต่างๆจากผิวของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบนนิกเกิล ที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2.25 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนผสม  $\text{Al}:\text{Al}_2\text{O}_3$  เป็น 7:3 ด้วยวิธี GIXD

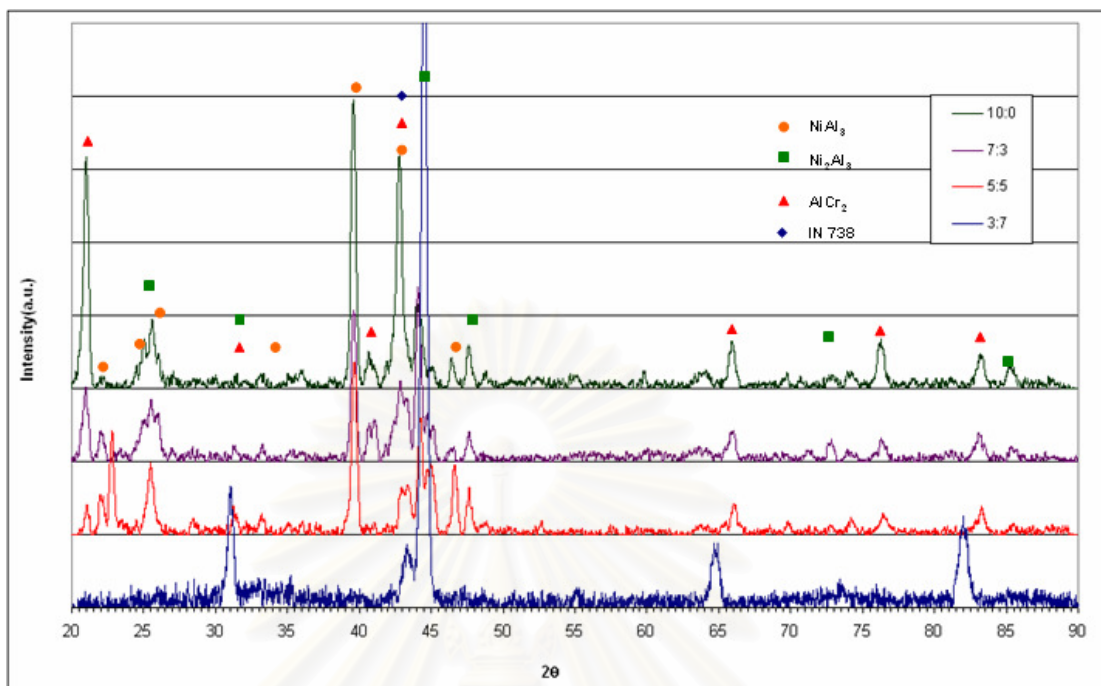


รูปที่ 4.21 ผลการเปรียบเทียบการตรวจสอบชั้นเคลือบที่ความลึกต่างๆจากผิวของชิ้นงานผ่านการ  
ทำอะลูมิเนียมในเชิงบนนิกเกิล ที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนผสม  
 $\text{Al}:\text{Al}_2\text{O}_3$  เป็น 10:0 ด้วยวิธี GIXD

#### 4.4.1.2 การตรวจสอบเชิงคุณภาพโดย XRD ของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด IN 738

เมื่อนำชั้นเคลือบไปทำการตรวจสอบด้วย XRD แบบ GIXD ที่มุมตกกระทบ  $5^{\circ}$  ของ  
ชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบนโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด IN 738 ที่  $1000^{\circ}\text{C}$  ที่  
อัตราส่วนผสม  $\text{Al}:\text{Al}_2\text{O}_3$  เป็น 10:0, 7:3, 5:5 และ 3:7 มาเปรียบเทียบกันพบว่าจะปรากฏพีคที่  
ตำแหน่งเดียวกัน ซึ่งจะเหมือนกันทั้ง 1, 2.25 และ 4 ชั่วโมง (รูปที่ 4.22, 4.23 และ 4.24 ตามลำดับ)

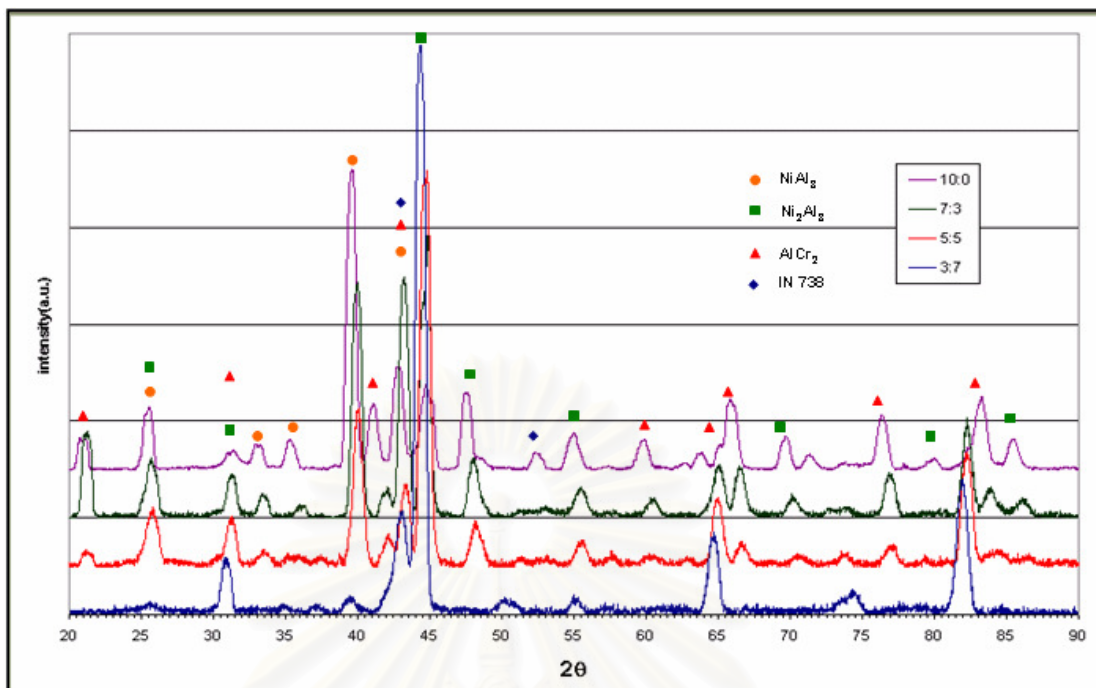
สำหรับผลการตรวจสอบชั้นเคลือบด้วยวิธี XRD แบบ GIXD ที่มุมตกกระทบ  $5^{\circ}$  ของ  
ชิ้นงานที่ผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบนโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด IN 738 ที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา  
1 ชม. รูปที่ 4.22 ที่อัตราส่วนผสม  $\text{Al}:\text{Al}_2\text{O}_3$  เป็น 10:0, 7:3 และ 5:5 นอกเหนือจากพีคที่ปรากฏใน  
IN 738 เดิม ยังพบพีคของเฟส  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$ ,  $\text{NiAl}$  และ  $\text{AlCr}_2$  (JCPDS No.03-1052, 02-0416 และ 29-  
0016) แต่ที่อัตราส่วนผสมเป็น 3:7 พบเพียงพีคของเฟส  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  โดยพบว่าความเข้มสัมพัทธ์ของ  
 $\text{AlCr}_2$  จะลดลงเมื่ออัตราส่วน  $\text{Al}:\text{Al}_2\text{O}_3$  ลดลง จนกระทั่งไม่พบพีคของ  $\text{AlCr}_2$  ที่อัตราส่วนเป็น 7:3  
ซึ่งเป็นไป ในทิศทางเดียวกันกับ  $\text{NiAl}$  ที่จะลดลงจนมีค่าน้อยมากที่อัตราส่วนเป็น 3:7



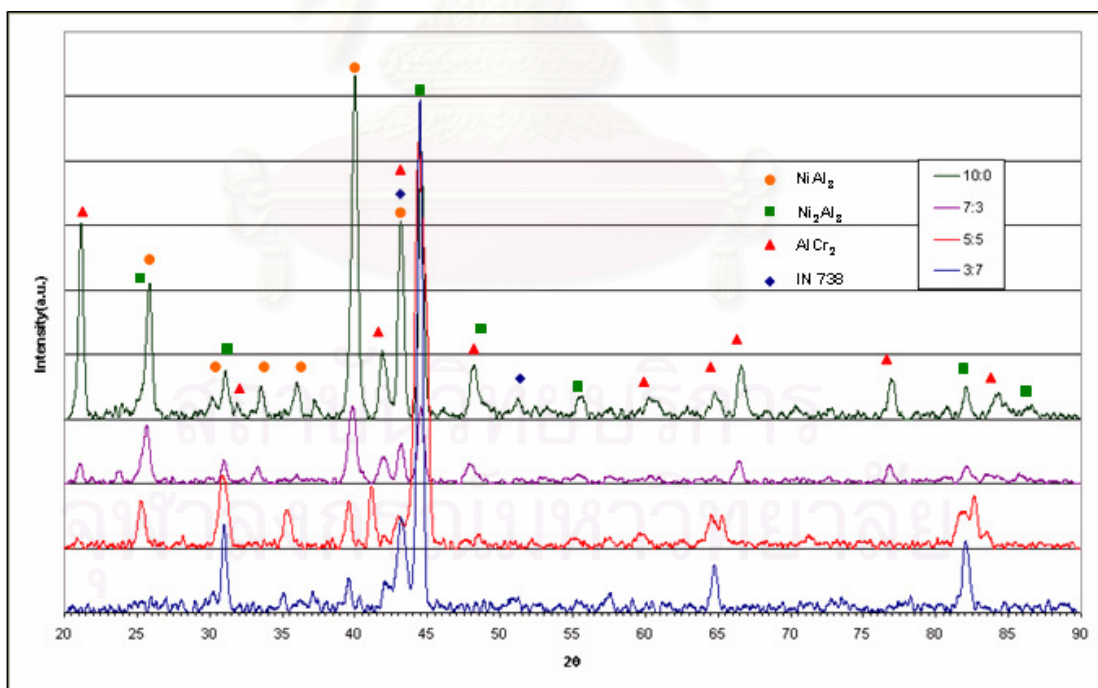
รูปที่ 4.22 ผลการเปรียบเทียบการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในซับสเตรต IN 738 ที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ด้วยวิธี GIXD

จากรูปที่ 4.23 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบด้วยวิธี XRD แบบ GIXD ที่มุมตกกระทบ  $5^{\circ}$  ของชิ้นงานที่ผ่านการทำอะลูมิเนียมในซับสเตรตโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด IN 738 ที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2.25 ชม. ที่อัตราส่วนผสม Al:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เป็น 10:0, 7:3 และ 5:5 จะพบฟลักของเฟส Ni<sub>2</sub>Al<sub>3</sub>, NiAl<sub>3</sub> และ AlCr<sub>2</sub> เกิดขึ้นนอกเหนือจากฟลักที่ปรากฏใน IN 738 เดิม แต่สำหรับที่อัตราส่วนผสมเป็น 3:7 พบเพียงฟลักของเฟส Ni<sub>2</sub>Al<sub>3</sub> นอกจากนี้ยังพบว่าความเข้มสัมพัทธ์ ของ AlCr<sub>2</sub> จะลดลงตามสัดส่วน Al:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> จนกระทั่งไม่พบฟลักของ AlCr<sub>2</sub> ที่ผิวชิ้นงานอัตราส่วน 3:7 เช่นเดียวกับความเข้มสัมพัทธ์ของ NiAl<sub>3</sub> ที่จะลดลงจนมีค่าน้อยมาก ที่อัตราส่วนเป็น 3:7

จากรูปที่ 4.24 พบว่าชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในซับสเตรตโลหะผสมพิเศษ เนื้อพื้นนิกเกิลเกรด IN 738 ที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 4 ชม. ที่อัตราส่วนผสม Al:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เป็น 10:0 และ 7:3 นอกเหนือจากฟลักที่ปรากฏใน IN 738 เดิมจะพบฟลักของเฟส Ni<sub>2</sub>Al<sub>3</sub>, NiAl<sub>3</sub> และ AlCr<sub>2</sub> เกิดขึ้น แต่สำหรับที่ อัตราส่วนผสมเป็น 5:5 และ 3:7 พบเพียงฟลักของเฟส Ni<sub>2</sub>Al<sub>3</sub> และ NiAl<sub>3</sub> เพียงเล็กน้อย สำหรับ AlCr<sub>2</sub> และ NiAl<sub>3</sub> พบว่าความเข้มสัมพัทธ์จะลดลง เมื่ออัตราส่วนของอะลูมิเนียมลดลง คล้ายกับที่เวลา 1 และ 2.25 ชม. แต่จะไม่พบ AlCr<sub>2</sub> ทั้งที่อัตราส่วน 5:5 และ 3:7

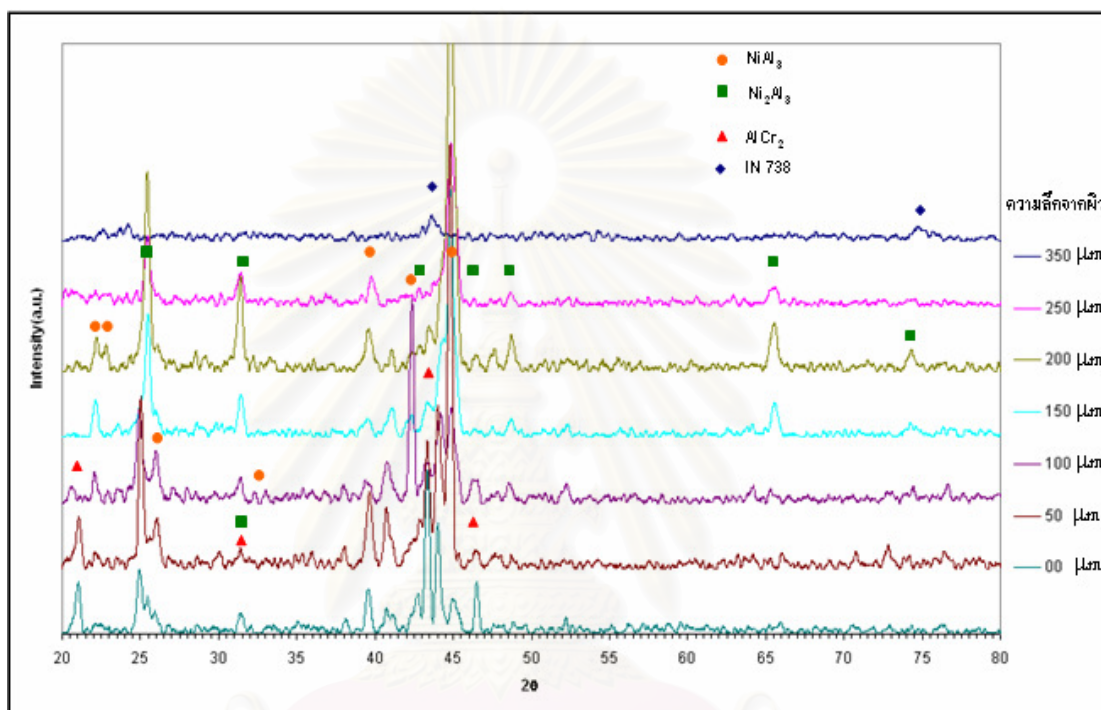


รูปที่ 4.23 ผลการเปรียบเทียบการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบน IN 738 ที่ 1000°C เป็นเวลา 2.25 ชั่วโมง ด้วยวิธี GIXD



รูปที่ 4.24 ผลการเปรียบเทียบการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบน IN 738 ที่ 1000°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยวิธี GIXD

เมื่อพิจารณาภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคตัดขวางชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบนโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิลเกรด IN 738 ที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชม. ที่อัตราส่วนผสม 10:0 และ 7:3 แสดงให้เห็นว่าชั้นเคลือบมีลักษณะแตกต่างกันที่ความลึกต่างกัน จึงได้เลือกชิ้นงานที่อัตราส่วน 10:0 ทำการตรวจสอบสารประกอบที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน ที่ความลึกต่างๆจากผิวด้วย XRD แบบ GIXD ที่มุมตกกระทบ  $5^{\circ}$

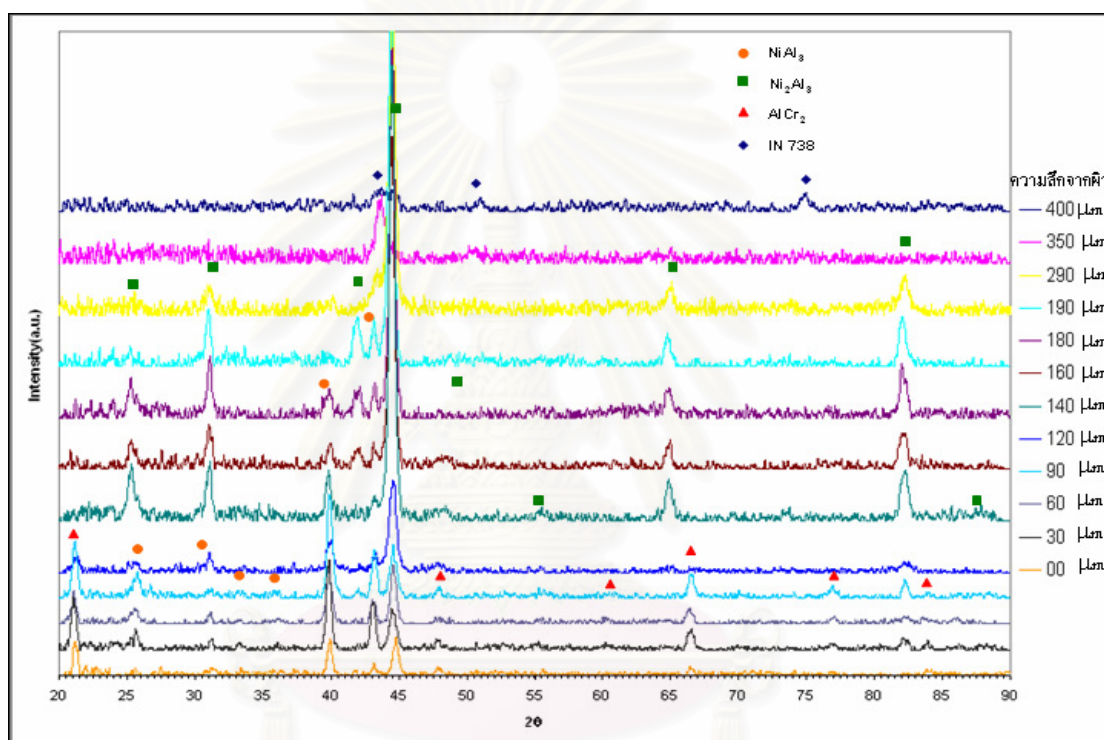


รูปที่ 4.25 ผลการเปรียบเทียบการตรวจสอบชั้นเคลือบที่ความลึกต่างๆจากผิวของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบน IN 738 ที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนผสม Al:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เป็น 10:0 ด้วยวิธี GIXD

ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำ อะลูมิเนียมในเชิงบนโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิลเกรด IN 738 ที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชม. ที่อัตราส่วนผสม Al:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เป็น 10:0 ที่ความลึกต่างๆกันด้วย XRD แบบ GIXD ที่มุมตกกระทบ  $5^{\circ}$  ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.25 พบว่าที่ผิวบนสุดของชั้นเคลือบ พบฟีดของเฟส Ni<sub>2</sub>Al<sub>3</sub>, NiAl<sub>3</sub> และ AlCr<sub>2</sub> โดยฟีดของเฟส AlCr<sub>2</sub> จะเป็นฟีดที่มีความเข้มสัมพัทธ์สูงสุด และที่ความลึก 100 μm ฟีดของเฟส AlCr<sub>2</sub> จะมีความเข้มสัมพัทธ์ต่ำลง โดยจะปรากฏฟีดของเฟสของ NiAl<sub>3</sub> มีความเข้มสัมพัทธ์สูงสุดแทน ซึ่งเมื่อทำการทดสอบ XRD แบบ GIXD ที่มุมตกกระทบ  $5^{\circ}$  ที่ลึกเข้าไปเรื่อยๆ ความเข้มสัมพัทธ์ของฟีด Ni<sub>2</sub>Al<sub>3</sub> จะค่อยๆเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความเข้มสัมพัทธ์ของฟีด NiAl<sub>3</sub> จะต่ำลง เมื่อทดสอบลึกเข้าไปที่ความลึก 250 μm จะพบ

เพียงฟีกของเฟส  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  จนกระทั่งทำการ ตรวจสอบ ที่ความลึกชั้นเคลือบมากกว่า  $350 \mu\text{m}$  พบเพียงฟีกของโลหะที่เป็นเนื้อพื้นเท่านั้น

เมื่อเพิ่มเวลาในการทำอะลูมิเนียมในเชิงบนโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้น นิกเกิลเกรด IN 738 ที่  $1000^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 2.25 ที่อัตราส่วนผสม 7:3, 5:5 และ 3:7 และ 4 ชม. ที่ทุกอัตราส่วนผสมพบว่า ชั้นเคลือบประกอบไปด้วยส่วนที่ 1 เพียงส่วนเดียว จึงได้ทำการศึกษารประกอบที่ความลึกต่างๆ ในชั้นงาน ด้วย XRD แบบ GIXD ที่มุมตกกระทบ  $5^\circ$  โดยเลือก ชั้นงาน เวลา 2.25 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนผสม เป็น 7:3 มาเป็นตัวแทนในการตรวจสอบ



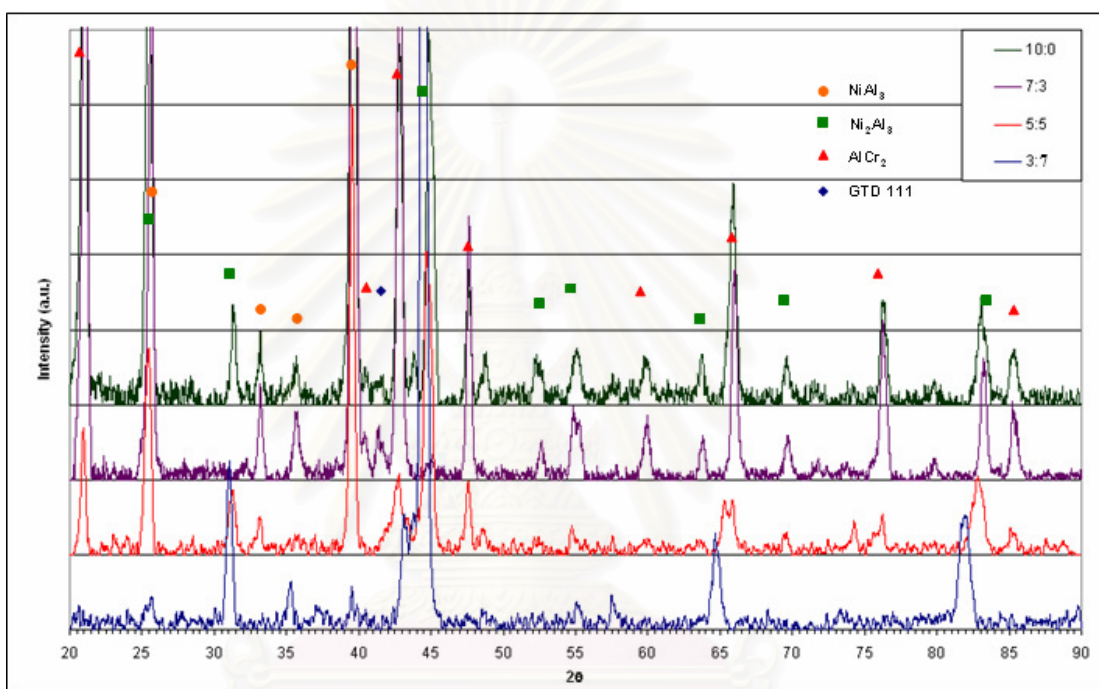
รูปที่ 4.26 ผลการเปรียบเทียบการตรวจสอบชั้นเคลือบที่ความลึกต่างๆจากผิวของชั้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบน IN 738 ที่  $1000^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 2.25 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนผสม Al: $\text{Al}_2\text{O}_3$  เป็น 7:3 ด้วยวิธี GIXD

ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบของชั้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบนโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้น นิกเกิลเกรด IN 738 ที่  $1000^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 2.25 ชม. ที่อัตราส่วนผสม Al: $\text{Al}_2\text{O}_3$  เป็น 7:3 ที่ความลึกต่างๆกัน ด้วย XRD แบบ GIXD ที่มุมตกกระทบ  $5^\circ$  ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.26 พบว่าที่ผิวนอกสุดของชั้นเคลือบ พบฟีกของเฟส  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$ ,  $\text{NiAl}_3$  และ  $\text{AlCr}_2$  ความเข้มสัมพัทธ์ของ  $\text{AlCr}_2$  ต่ำลงเรื่อยๆเมื่อความลึกผิวเพิ่มขึ้น จนกระทั่งเมื่อความลึกมากกว่า 140 จนถึง  $350 \mu\text{m}$  พบว่าฟีกของ  $\text{AlCr}_2$  หายไป



และมีเพียงฟีกของ  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  เป็นหลักโดยมี  $\text{NiAl}_3$  เล็กน้อย จนกระทั่งที่ความลึก 400  $\mu\text{m}$  ฟีกที่พบ จะมีเพียงฟีกของโลหะเนื้อพื้น เท่านั้น

#### 4.4.1.3 การตรวจสอบเชิงคุณภาพโดย XRD ของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด GTD 111

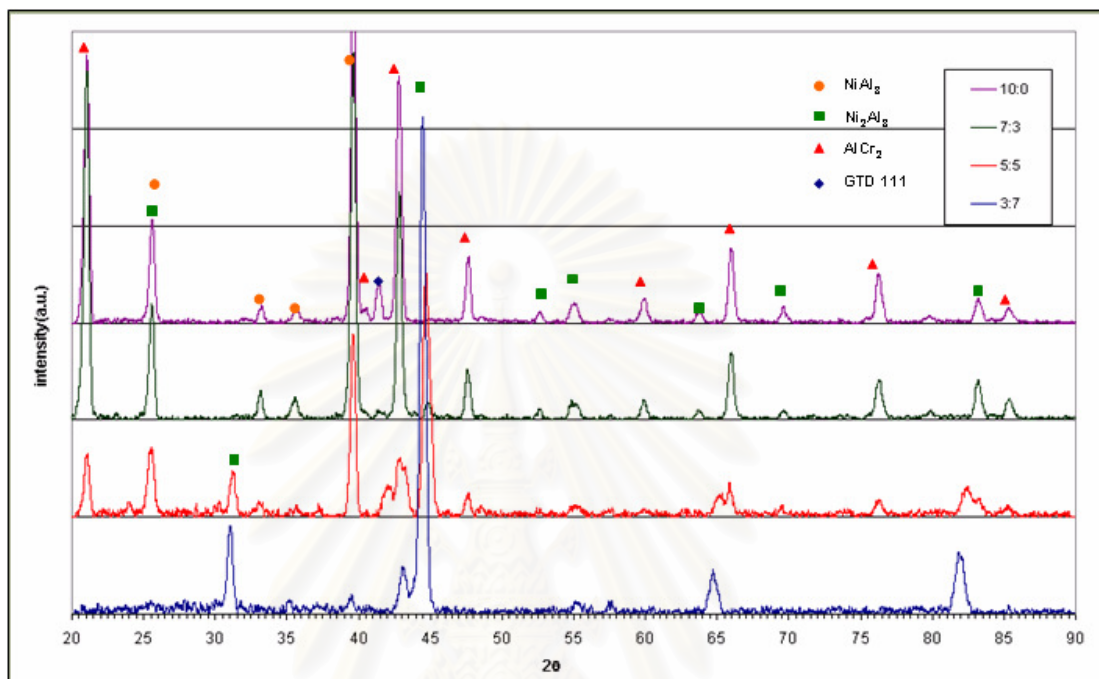


รูปที่ 4.27 ผลการเปรียบเทียบการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบน GTD 111 ที่  $1000^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ด้วยวิธี GIXD

เมื่อนำชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบนโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด GTD 111 ที่  $1000^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 1, 2.25 และ 4 ชั่วโมง (รูปที่ 4.27, 4.28 และ 4.29 ตามลำดับ) ที่อัตราส่วนผสม  $\text{Al}:\text{Al}_2\text{O}_3$  เป็น 10:0, 7:3, 5:5 และ 3:7 ที่ผ่านการทำการตรวจสอบด้วย XRD แบบ GIXD ที่มุมตกกระทบ  $5^\circ$  มาเปรียบเทียบกันพบว่า จะปรากฏฟีกที่ตำแหน่งเดียวกัน

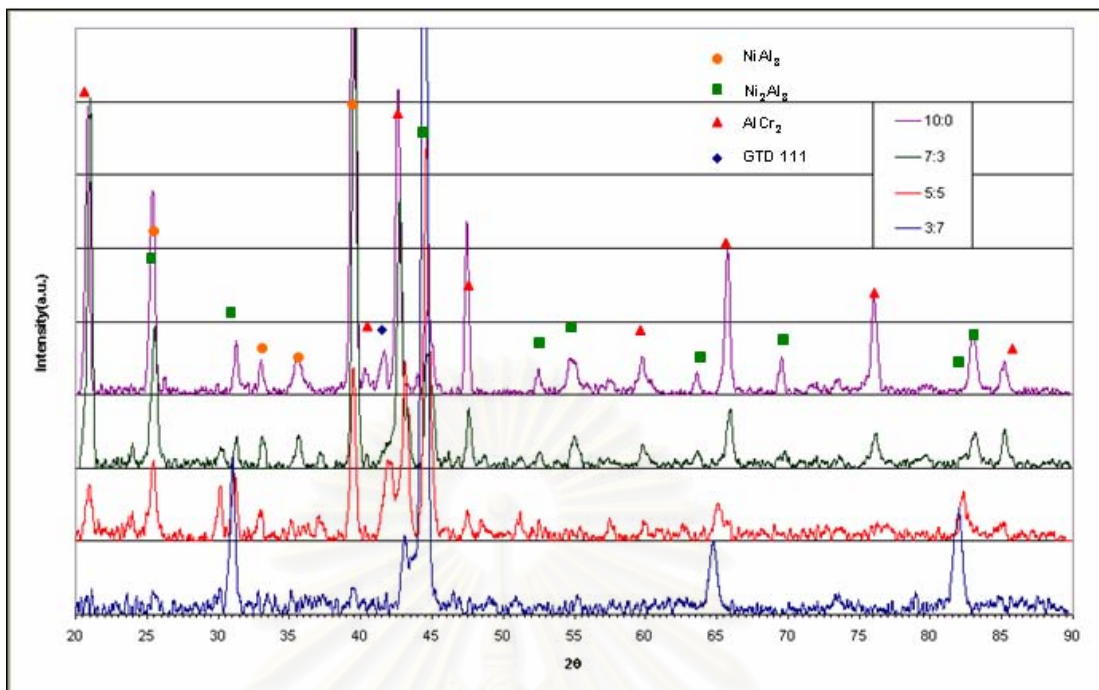
จากรูปที่ 4.27 เมื่อนำชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบนโลหะผสมพิเศษ เนื้อพื้นนิกเกิลเกรด GTD 111 ที่  $1000^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนผสม  $\text{Al}:\text{Al}_2\text{O}_3$  เป็น 10:0, 7:3 และ 5:5 ที่ผ่านการทำการตรวจสอบด้วย XRD แบบ GIXD ที่มุมตกกระทบ  $5^\circ$  มาเปรียบเทียบกันพบว่า นอกจากฟีกของ GTD 111 เดิมแล้วยังพบเฟส  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$ ,  $\text{NiAl}_3$  และ  $\text{AlCr}_2$  (JCPDS No.03-1052, 02-0416 และ 29-0016) แต่ที่อัตราส่วนผสมเป็น 3:7 พบเพียงฟีกของเฟส  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  โดยพบว่า

$\text{AlCr}_2$  มีความเข้มสัมพัทธ์ที่ลดลงจนกระทั่งไม่พบฟีกของ  $\text{AlCr}_2$  ที่อัตราส่วนเป็น 3:7 ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับ  $\text{NiAl}_3$  ที่จะลดลงจนมีค่าน้อยมากที่อัตราส่วนเป็น 3:7



รูปที่ 4.28 ผลการเปรียบเทียบการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในชิงบน GTD 111 ที่ 1000°C เป็นเวลา 2.25 ชั่วโมง ด้วยวิธี GIXD

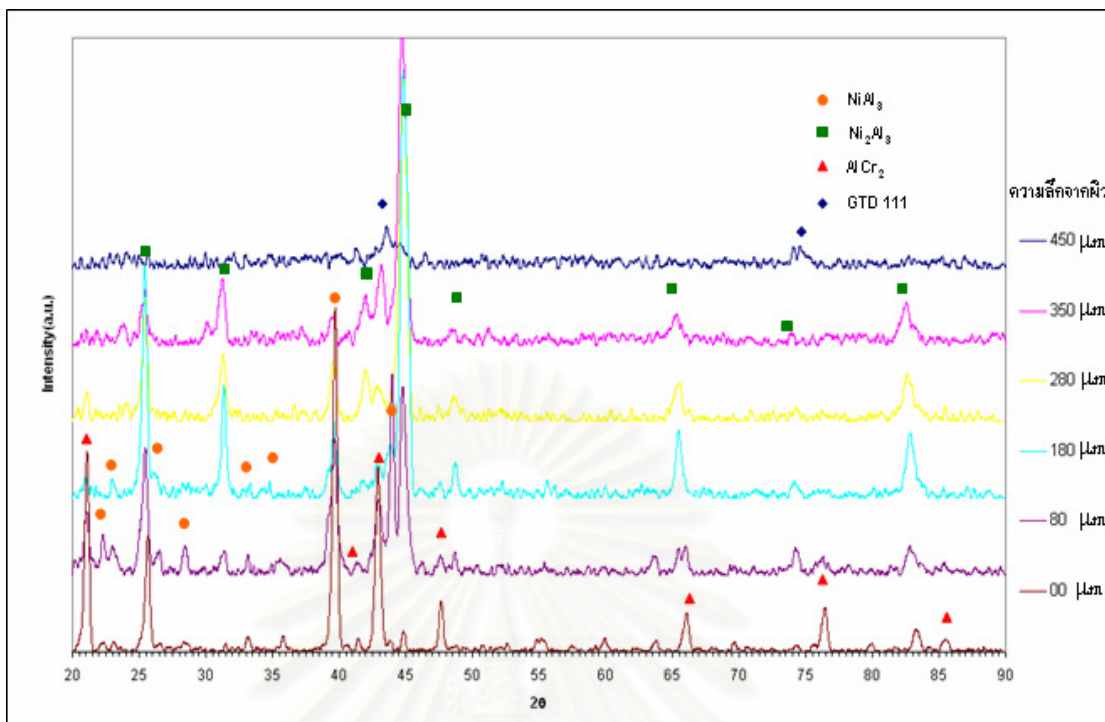
จากรูปที่ 4.28 พบว่าชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในชิงบนโลหะผสมพิเศษ เนื้อพื้นนิกเกิลเกรด GTD 111 ที่ 1000°C เป็นเวลา 2.25 ชม. ที่อัตราส่วนผสม Al:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เป็น 10:0, 7:3 และ 5:5 จะพบฟีกของเฟส Ni<sub>2</sub>Al<sub>3</sub>, NiAl<sub>3</sub> และ AlCr<sub>2</sub> เกิดขึ้นนอกเหนือจากฟีกที่ปรากฏใน GTD 111 เดิม แต่สำหรับที่อัตราส่วนผสมเป็น 3:7 ไม่พบฟีกของเฟส NiAl<sub>3</sub> พบเพียงฟีกของเฟส Ni<sub>2</sub>Al<sub>3</sub> สำหรับความเข้มสัมพัทธ์ของ AlCr<sub>2</sub> และ NiAl<sub>3</sub> จะเป็นเช่นเดียวกันกับชิ้นงาน ที่ใช้เวลา 1 ชม. คือมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนอะลูมิเนียมลดลงจนกระทั่งที่อัตราส่วน 3:7 จะไม่พบ AlCr<sub>2</sub> และ NiAl<sub>3</sub>



รูปที่ 4.29 ผลการเปรียบเทียบการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบน GTD 111 ที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยวิธี GIXD

จากรูปที่ 4.29 เมื่อนำชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบน โลหะผสมพิเศษ เนื้อพื้นนิเกิลเกรด GTD 111 ที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนผสม Al:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เป็น 10:0 และ 7:3 ที่ผ่านการทำการตรวจสอบด้วย XRD แบบ GIXD ที่มุมตกกระทบ  $5^{\circ}$  พบว่านอกจากพีคของ GTD 111 เดิมแล้วยังพบเฟส Ni<sub>2</sub>Al<sub>3</sub>, NiAl<sub>3</sub> และ AlCr<sub>2</sub> สำหรับที่อัตราส่วนผสมเป็น 3:7 พบเพียงพีคของเฟส Ni<sub>2</sub>Al<sub>3</sub> และความเข้มสัมพัทธ์ของ AlCr<sub>2</sub> และ NiAl<sub>3</sub> จะลดลงเมื่ออัตราส่วน Al:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ลดลง จนกระทั่งไม่พบพีคของ AlCr<sub>2</sub> และ NiAl<sub>3</sub> ที่อัตราส่วนเป็น 3:7

จากโครงสร้างจุลภาคตัดขวางของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบน โลหะผสมพิเศษ เนื้อพื้นนิเกิลเกรด GTD 111 ที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 1, 2.25, 4 ชม. พบว่าชั้นเคลือบมีลักษณะแตกต่างกันตามความลึกผิว จึงได้ทำการเลือกชิ้นงาน ที่อัตราส่วนผสม Al:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เป็น 10:0 เวลา 2.25 ชม. ให้เป็นตัวแทนของชิ้นงานทั้งหมด โดยนำมาทำการตรวจสอบ ด้วย XRD แบบ GIXD ที่มุมตกกระทบ  $5^{\circ}$  ที่ความลึกต่างๆ เพื่อศึกษาว่าที่ความลึกต่างกันสารประกอบ ที่เกิดขึ้นจะเหมือนหรือแตกต่างกันอย่างไร

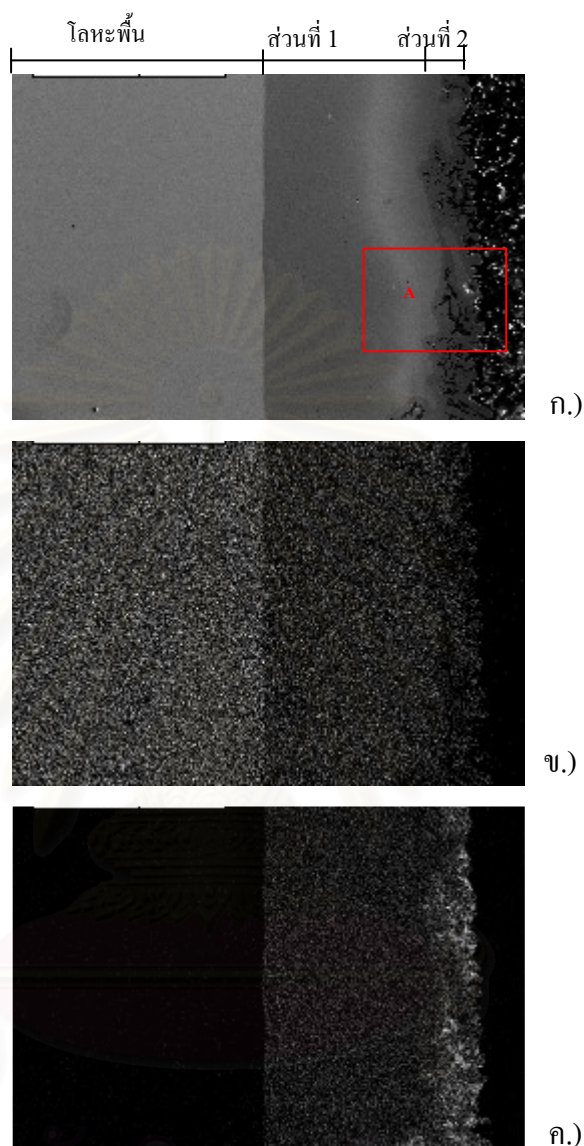


รูปที่ 4.30 ผลการเปรียบเทียบการตรวจสอบชั้นเคลือบที่ความลึกต่างๆจากผิวของชิ้นงานผ่านการ  
ทำอะลูมิเนียมในเชิงบน GTD 111 ที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2.25 ชั่วโมง  
ที่อัตราส่วนผสม  $\text{Al}:\text{Al}_2\text{O}_3$  เป็น 10:0 ด้วยวิธี GIXD

ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบที่ความลึกต่างๆกันของชิ้นงานผ่านการทำ อะลูมิเนียมในเชิงบน โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิลเกรด GTD 111 ที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2.25 ชม. ที่อัตราส่วนผสม  $\text{Al}:\text{Al}_2\text{O}_3$  เป็น 10:0 ด้วย XRD แบบ GIXD ที่มุมตกกระทบ  $5^{\circ}$  ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.30 พบว่าที่ผิวนอกสุดของชั้นเคลือบ พบพีคของเฟส  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$ ,  $\text{NiAl}_3$  และ  $\text{AlCr}_2$  โดยพีคของเฟส  $\text{AlCr}_2$  จะเป็นพีคที่มีความเข้มสัมพัทธ์มากที่สุด และที่ความลึก  $80\ \mu\text{m}$  พีคของเฟส  $\text{AlCr}_2$  จะมีความเข้มสัมพัทธ์ต่ำลง โดยจะปรากฏพีคของเฟสของ  $\text{NiAl}_3$  มีความเข้มสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นแทน ซึ่งเมื่อทำการทดสอบ XRD แบบ GIXD ที่มุมตกกระทบ  $5^{\circ}$  ที่ลึกเข้าไปความเข้มสัมพัทธ์ของพีค  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  จะค่อยๆเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความเข้มสัมพัทธ์ของพีค  $\text{NiAl}_3$  จะต่ำลง เมื่อทดสอบลึก เข้าไปที่ความลึก  $350\ \mu\text{m}$  จะพบเพียงพีคของเฟส  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  จนกระทั่งทำการตรวจสอบ ที่ความลึกชั้นเคลือบมากกว่า  $450\ \mu\text{m}$  จะมีเพียงพีคของโลหะที่เป็นเนื้อพื้นเท่านั้น

#### 4.4.2 ผลการตรวจสอบเชิงคุณภาพ โดย spectroscopy

##### 4.4.2.1 โลหะนิกเกิล



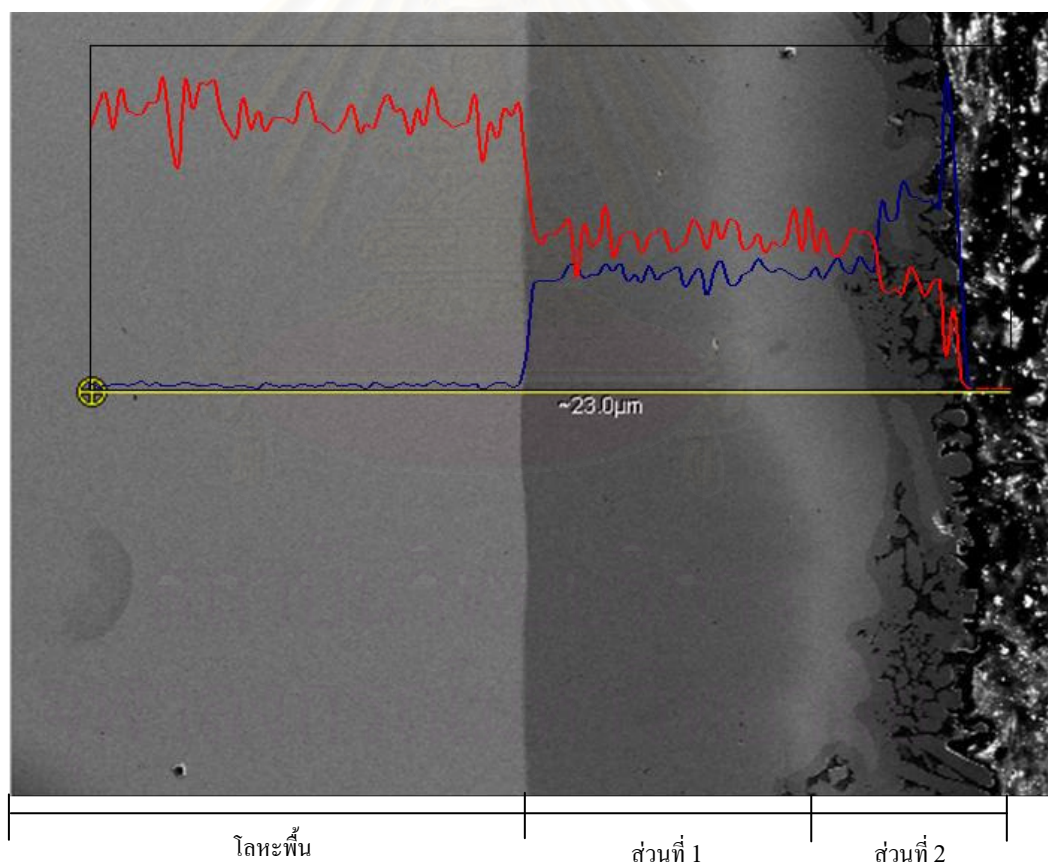
รูปที่ 4.31 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบนโลหะนิกเกิล ที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2.25 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนผสม  $\text{Al}:\text{Al}_2\text{O}_3$  เป็น 10:0 ด้วยวิธี Mapping EDS  
 ก.) Secondary electron, ข.) นิกเกิล, ค.) อะลูมิเนียม

จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคตัดขวางชั้นเคลือบของโลหะนิกเกิลพบว่าลักษณะชั้นเคลือบมี 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่ 1 ประกอบด้วยส่วนที่ 1 และส่วนที่ 2 และกลุ่มที่ 2 มีเพียงส่วนที่ 1 เพียงส่วนเดียว จึงตรวจสอบการกระจายตัวปริมาณของธาตุต่างๆ ในแต่ละบริเวณ ชิ้นงานผ่านการทำ อะลูมิเนียมในเชิงบนโลหะนิกเกิล ที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2.25 ชม. ที่อัตราส่วนผสม  $\text{Al}:\text{Al}_2\text{O}_3$  เป็น 10:0 เป็น

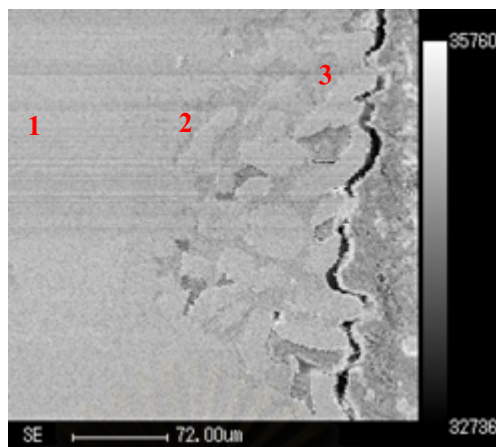
ตัวแทนของ ชั้นเคลือบกลุ่มที่ 1 และ ชั้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิง บนโลหะนิกเกิล ที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 4 ชม. ที่อัตราส่วนผสม  $\text{Al}:\text{Al}_2\text{O}_3$  เป็น 7:3 เป็นตัวแทนของ ชั้นเคลือบกลุ่มที่ 2

ชั้นเคลือบของชั้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบนโลหะนิกเกิล ที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2.25 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนผสม  $\text{Al}:\text{Al}_2\text{O}_3$  เป็น 10:0 มาตรฐานตรวจสอบด้วยวิธี EDS แบบ Mapping (รูปที่ 4.31) พบว่าบริเวณส่วนที่ 1 Ni และ Al มีปริมาณที่สม่ำเสมอ สำหรับบริเวณส่วนที่ 2 ปริมาณของ Ni จะลดลง ส่วนปริมาณ Al จะเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะเห็นได้ชัดจากผล Line scan (รูปที่ 4.32) ว่าที่บริเวณใกล้ผิวปริมาณ Ni ลดลง ส่วนปริมาณ Al เพิ่มขึ้น

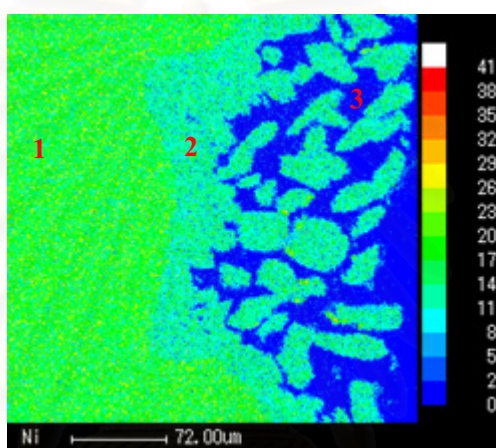
ซึ่งเมื่อพิจารณาใกล้ผิว (บริเวณ A ของรูป 4.31 ก.) ด้วยวิธี EPMA (รูปที่ 4.33 ) พบว่าชั้นเคลือบแบ่งออกได้เป็น 3 เฟส โดยที่ เฟสที่ 2 และ 3 จะรวมกันอยู่ในบริเวณส่วนที่ 2 เฟสที่มีปริมาณ Al สูงสุดคือเฟสที่ 3 รองลงมาคือ 2 และ 1 ตามลำดับ ส่วน Ni พบมากในเฟสที่ 1 รองลงมาคือ เฟสที่ 2 และ 3 ตามลำดับ



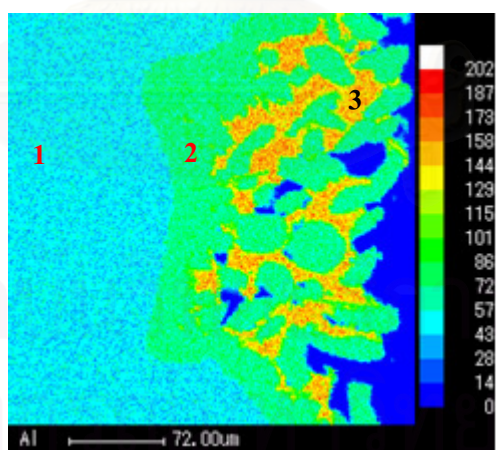
รูปที่ 4.32 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบของชั้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบนโลหะนิกเกิล ที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2.25 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนผสม  $\text{Al}:\text{Al}_2\text{O}_3$  เป็น 10:0 ด้วยวิธี Line scan EDS สีแดง แทน นิกเกิล, สีน้ำเงิน แทน อะลูมิเนียม



ก.)



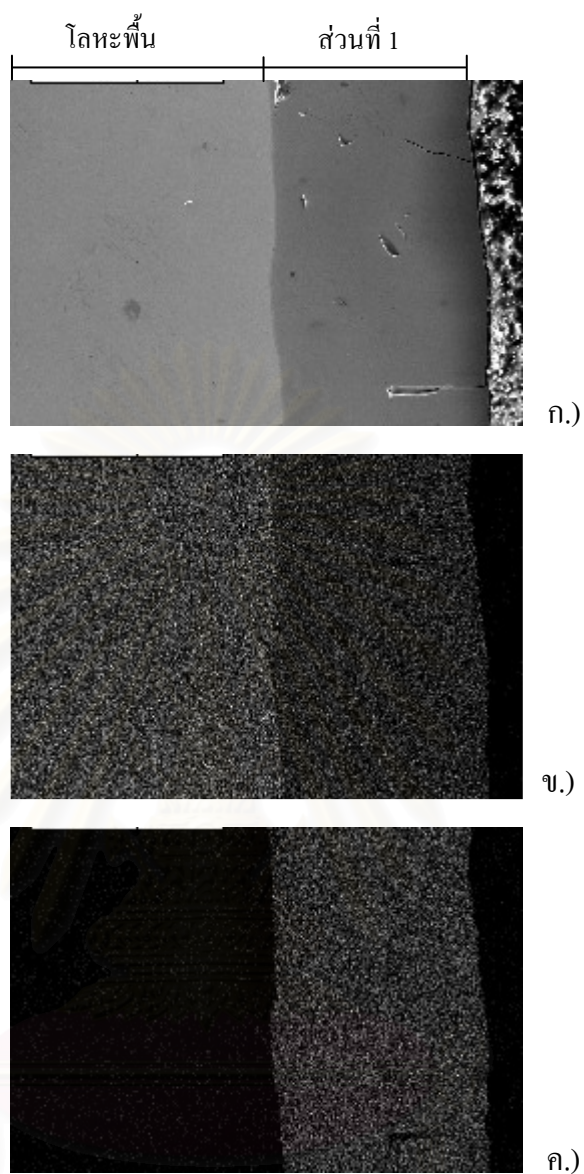
ข.)



ค.)

รูปที่ 4.33 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบบริเวณ A ของชิ้นงาน รูปที่ 4.31 ก.) ด้วยวิธี EPMA

ก.) Secondary electron, ข.) นิกเกิล, ค.) อะลูมิเนียม



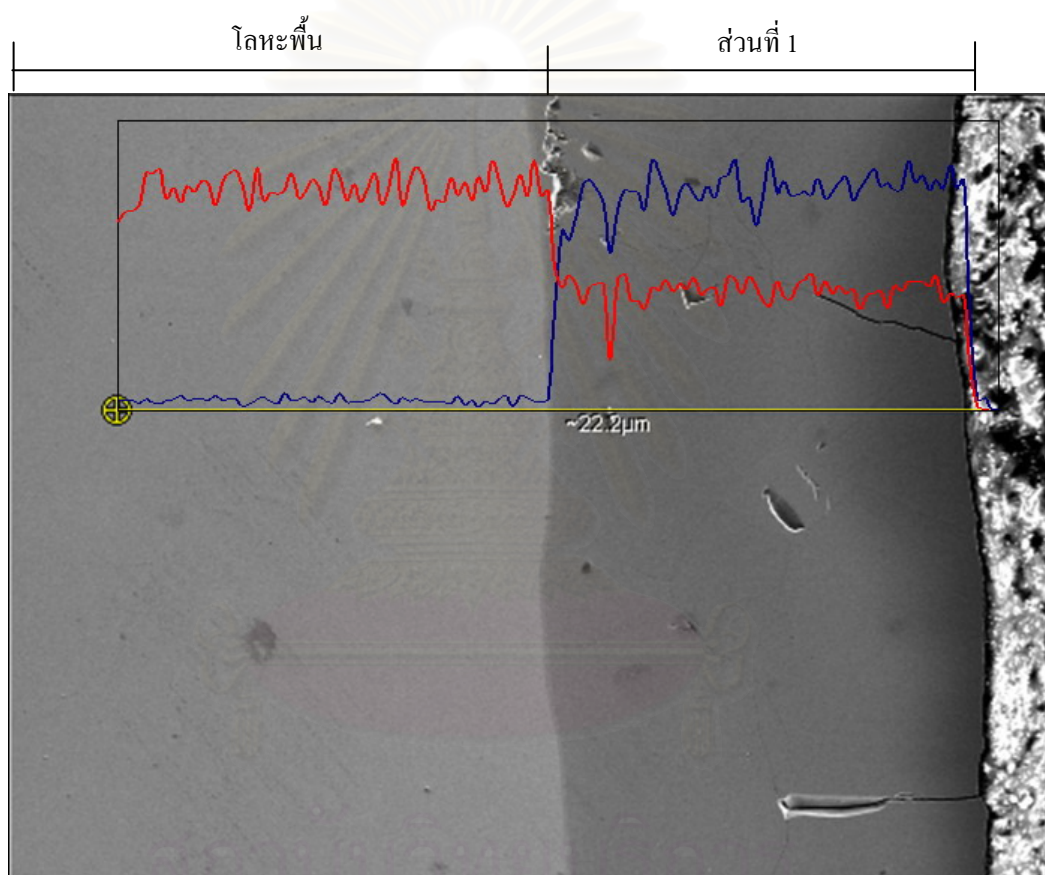
รูปที่ 4.34 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมไนซิงบนโลหะนิกเกิล ที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนผสม  $\text{Al}:\text{Al}_2\text{O}_3$  เป็น 7:3 ด้วยวิธี Mapping EDS

ก.) Secondary electron, ข.) นิกเกิล, ค.) อะลูมิเนียม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



เมื่อเวลาในการทำอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้นลักษณะชั้นเคลือบเปลี่ยนแปลงไปคือพบชั้นเคลือบมีเพียงส่วนที่ 1 โดยจะไม่พบส่วนที่ 2 จึงนำชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบนโลหะนิกเกิล ที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนผสม  $\text{Al}:\text{Al}_2\text{O}_3$  เป็น 7:3 มาเป็นตัวแทนลักษณะชั้นเคลือบแบบนี้มาตรวจสอบด้วยวิธี EDS แบบ Mapping (รูปที่ 4.34) พบว่าปริมาณของนิกเกิล ที่บริเวณผิวเคลือบมีค่าใกล้เคียงกัน และเพิ่มมากขึ้นเมื่อเข้าสู่บริเวณเนื้อพื้น ซึ่งตรงข้ามกับปริมาณ Al ที่มีมากบริเวณผิวเคลือบ และแทบจะไม่พบปริมาณของ Al เมื่อเข้าสู่เนื้อพื้น ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนเมื่อพิจารณาผลจาก Line scan (รูปที่ 4.35)



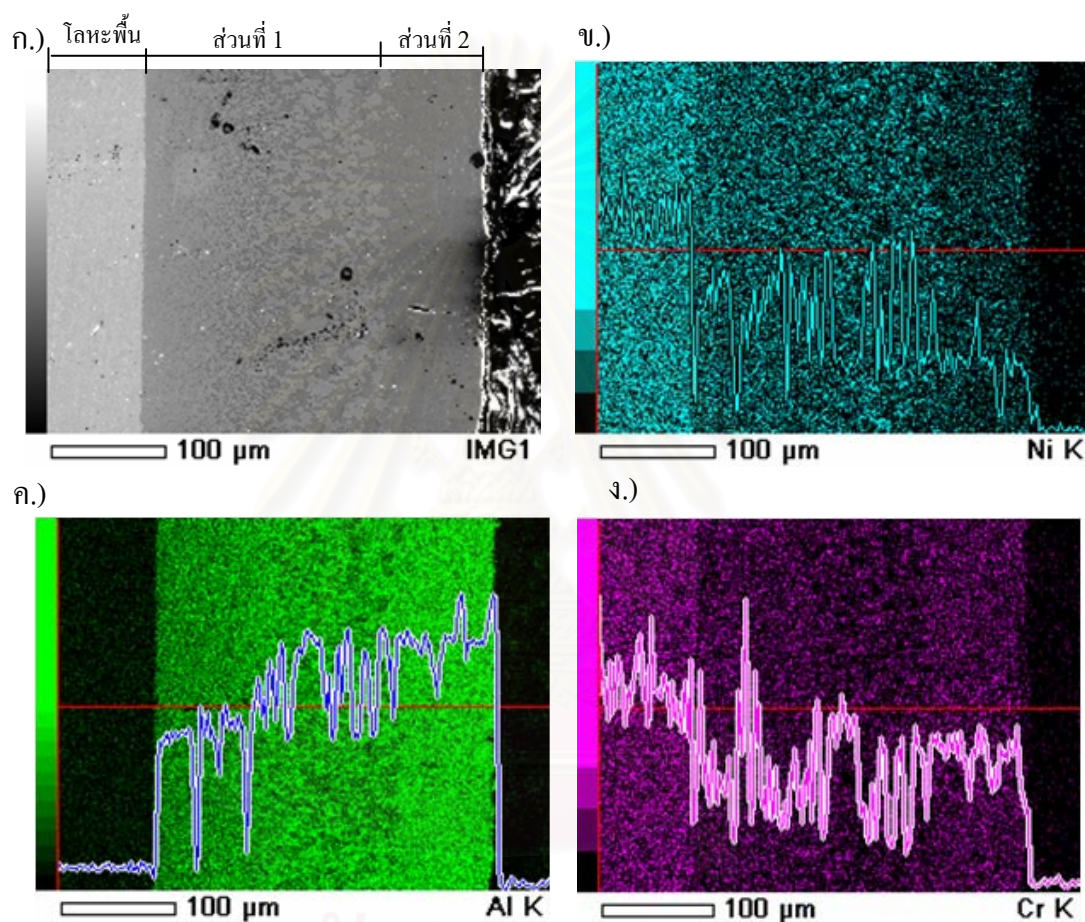
รูปที่ 4.35 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบนโลหะนิกเกิล ที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนผสม  $\text{Al}:\text{Al}_2\text{O}_3$  เป็น 10:0 ด้วยวิธี Line scan EDS สีแดง แทน นิกเกิล, สีน้ำเงิน แทน อะลูมิเนียม

#### 4.4.2.2 โลหะผสมพิเศษเนื้อพ่นนิกเกิลเกรด Inconel 738

ลักษณะลักษณะชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมไนซิงบนโลหะผสมพิเศษเนื้อพ่นนิกเกิลทั้ง IN 738 แบ่งเป็น 2 กลุ่มคือ

กลุ่มที่ 1. ชั้นเคลือบมีลักษณะแตกต่างกันตามความลึกผิว

กลุ่มที่ 2. ชั้นเคลือบมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันทั้งชั้นเคลือบ



รูปที่ 4.36 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมไนซิงบน IN 738 ที่ 1000°C

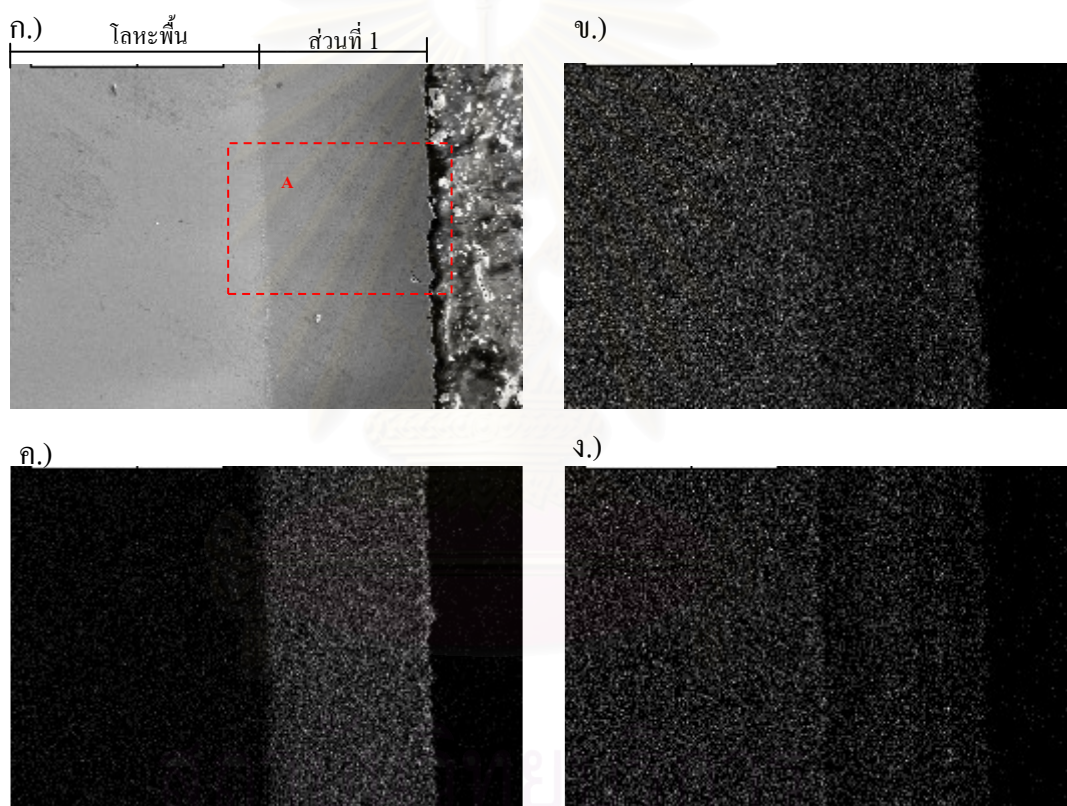
เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนผสม Al:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เป็น 10:0

ด้วย EDS ก.) Secondary electron, ข.) นิกเกิล, ค.) อะลูมิเนียม, ง.) โครเมียม

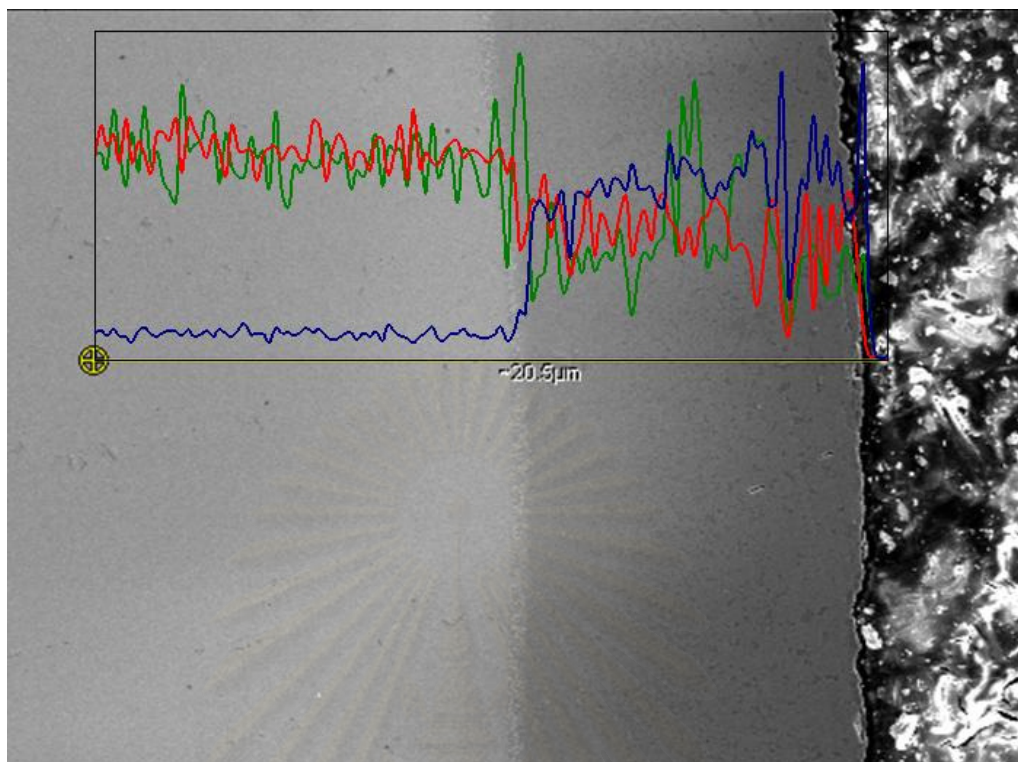
เพื่อทำการตรวจสอบชั้นเคลือบกลุ่มที่ 1 จึงเลือกชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมไนซิงบนโลหะ เนื้อพ่นนิกเกิลเกรด IN 738 ที่ 1000°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนผสม Al:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เป็น 10:0 ตรวจสอบ ด้วยเครื่องมือ SEM โดยใช้ EDS แบบ Mapping และ Line scan (จากรูปที่ 4.36) ในบริเวณผิวหน้าของชั้นเคลือบ พบปริมาณของ Al ที่มากในบริเวณส่วนที่ 2 และลดลงใน

ส่วนที่ 1 ซึ่งตรงข้ามกับปริมาณ Ni ในส่วนที่ 1 จะมีมากกว่าส่วนที่ 2 และมากที่สุดที่บริเวณเนื้อพื้น ส่วนปริมาณ Cr นั้นพบมากในส่วนที่ 2 และพบน้อยในปริมาณค่อนข้างคงที่ในส่วนที่ 1

สำหรับลักษณะชั้นเคลือบกลุ่มที่ 2 เลือกชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบนโลหะผสมพิเศษ เนื้อพื้นนิกเกิลเกรด IN 738 ที่ 1000°C เป็นเวลา 2.25 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนผสม Al:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เป็น 7:3 มา ตรวจสอบชั้นเคลือบด้วยวิธี EDS แบบ Mapping (รูปที่ 4.37) พบปริมาณของ Ni มีลักษณะเดียวกันกับปริมาณ Cr คือมากที่สุดที่บริเวณเนื้อพื้นและค่อยๆลดลงเมื่อเข้าสู่ชั้นเคลือบส่วนที่ 1 ปริมาณ Al พบมากที่สุดที่บริเวณผิวเคลือบส่วนที่ 1 และมีน้อยมากที่สุดที่เนื้อพื้น ซึ่งสอดคล้องกับผลจาก Line scan (รูปที่ 4.38)



รูปที่ 4.37 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบน IN 738 ที่ 1000°C เป็นเวลา 2.25 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนผสม Al:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เป็น 7:3 ด้วยวิธี Mapping EDS ก.) Secondary electron, ข.) นิกเกิล, ค.) อะลูมิเนียม, ง.) โครเมียม



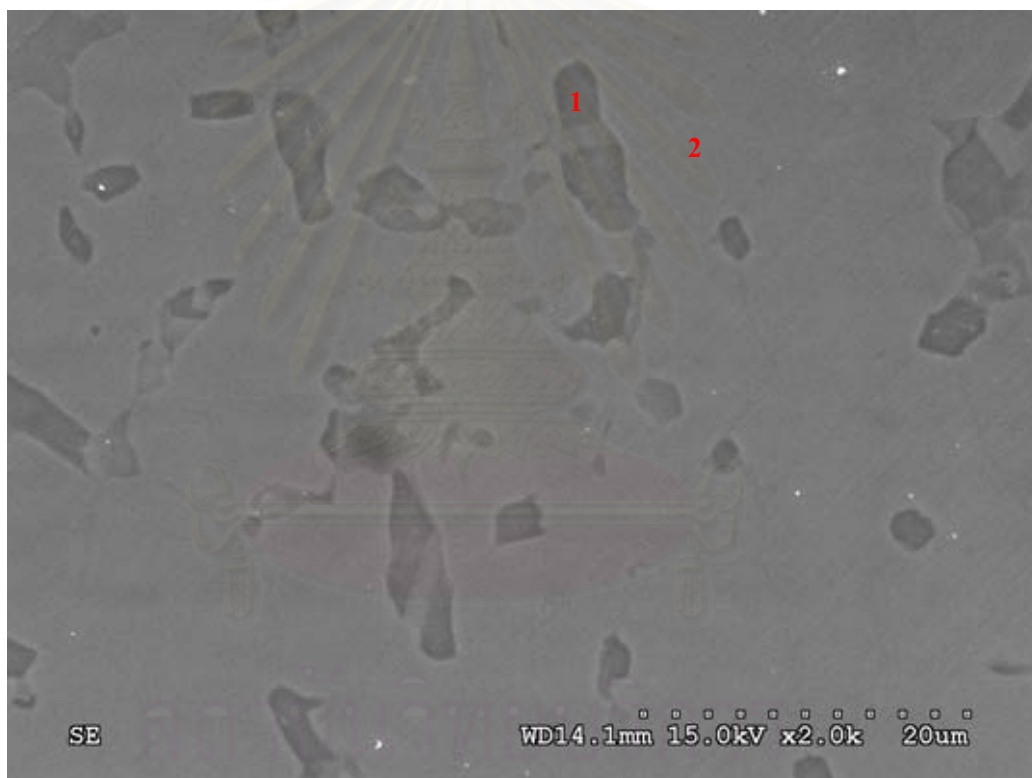
รูปที่ 4.38 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมไนซิงบน IN 738 ที่ 1000°C เป็นเวลา 2.25 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนผสม Al:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เป็น 7:3 ด้วยวิธี Line scan EDS สีแดง แทน นิกเกิล, สีน้ำเงิน แทน อะลูมิเนียม, สีเขียว แทน โครเมียม



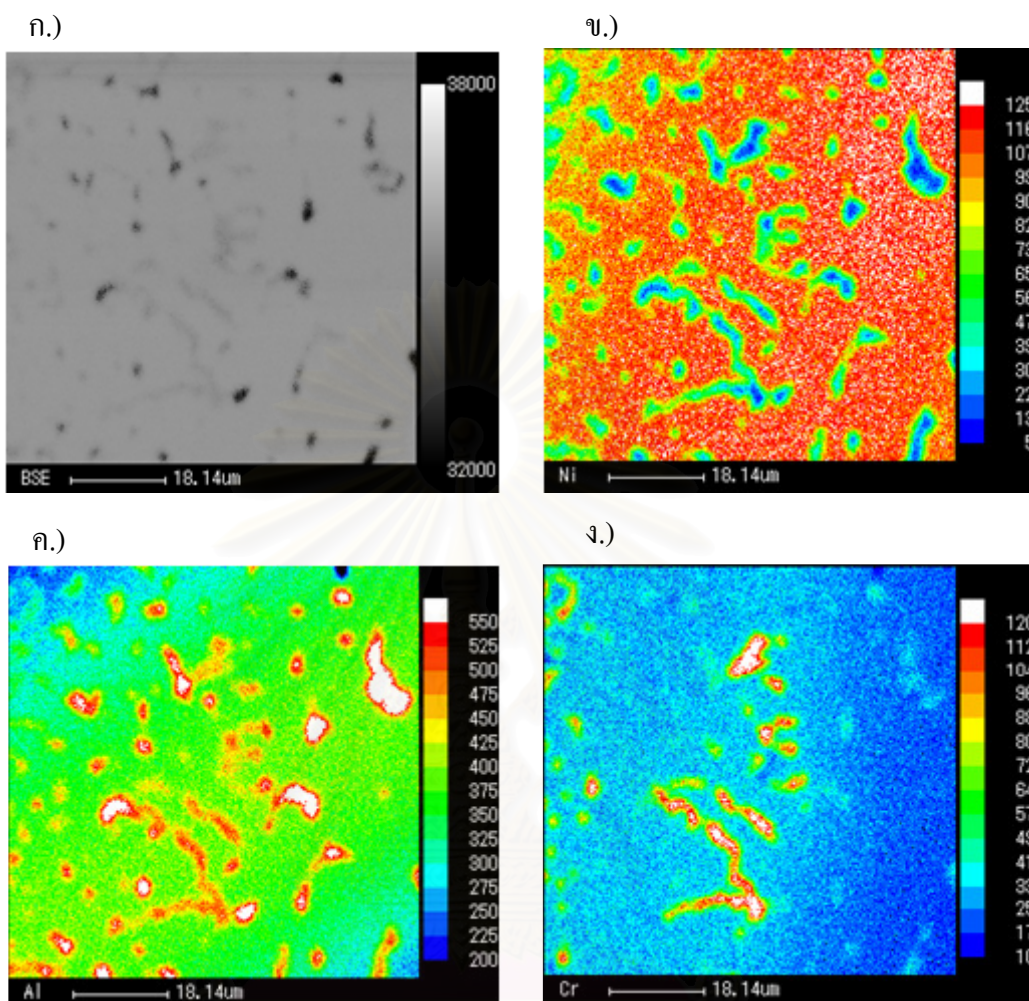
รูปที่ 4.39 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบบริเวณ A ของชิ้นงาน รูปที่ 4.37 ก.) ด้วย SEM

เมื่อพิจารณาเฉพาะผิวชั้นเคลือบบริเวณ A ของชั้นเคลือบรูป 4.37 ก ด้วย SEM (รูปที่ 4.39) ด้วยกำลังขยายเป็น 500 เท่า พบว่าชั้นเคลือบไม่ได้มีเพียงเฟสเดียวจึงได้ทำการ ตรวจสอบต่อด้วย EPMA โดยแบ่งพิจารณาเป็น 2 บริเวณ คือบริเวณใกล้ผิว (A) และบริเวณใกล้เนื้อพื้น (B)

รูปที่ 4.40 และ พิจารณาริเวณ A ของรูปที่ 4.39 ด้วย SEM ที่กำลังขยาย 2000 เท่า พบมี เฟสสี่เหลี่ยม (1) และ เทาอ่อน (2) ทำการตรวจสอบต่อด้วย EPMA โดยแสดงไว้ใน รูปที่ 4.41 พบว่าปริมาณของ Ni จะพบมากในบริเวณเฟส 1 และแทบจะไม่พบในบริเวณเฟส 2 พบ Al พบ มากกว่าในบริเวณเฟส 2 แต่ในส่วนของปริมาณโครเมียม พบมากในบริเวณเฟส 1 และแทบไม่พบ ในบริเวณเฟส 2 เลย



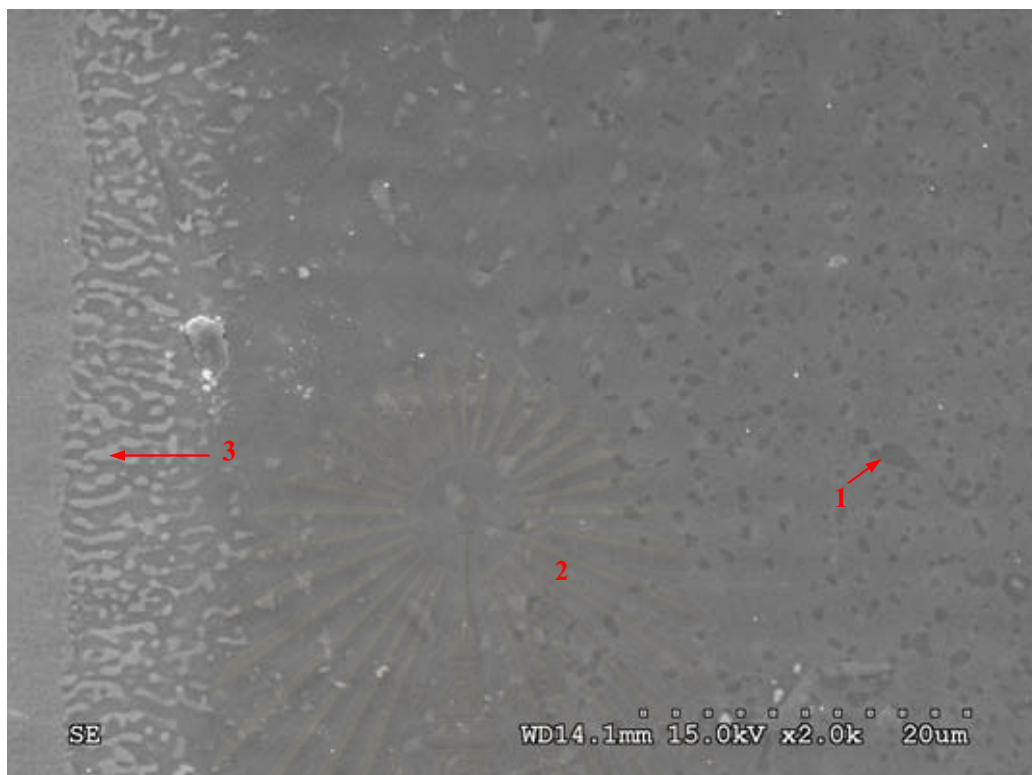
รูปที่ 4.40 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบบริเวณ A ของชิ้นงาน รูปที่ 4.39 ด้วย SEM



รูปที่ 4.41 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบ รูปที่ 4.40 ด้วยวิธี EPMA

ก.) Secondary electron, ข.) นิกเกิล, ค.) อะลูมิเนียม, ง.) โครเมียม

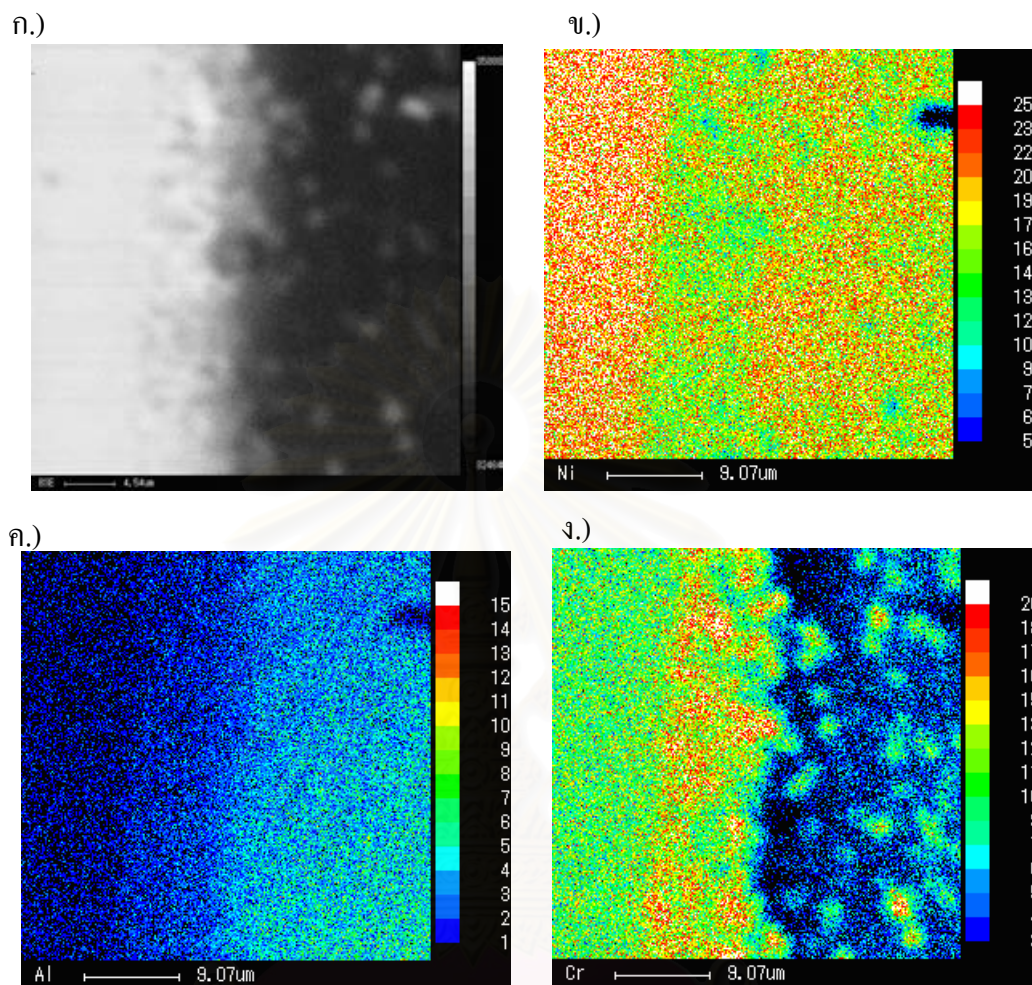
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.42 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบบริเวณ B ของชิ้นงาน รูปที่ 4.39 ด้วย SEM

ทำการตรวจสอบชั้นเคลือบบริเวณรอยต่อของชั้นเคลือบกับโลหะพื้น (บริเวณ B) ของรูปที่ 4.39 ด้วย SEM (รูปที่ 4.42) พบมีเฟสขาว (3) จับตัวกันเป็นก้อนกระจายอยู่ที่บริเวณรอยต่อของชั้นเคลือบกับโลหะพื้น และยังคงพบเฟสสีเทาเข้ม (1) กระจายอยู่ทั่วไปในเฟสสีเทาอ่อน (2) ทำการตรวจสอบด้วย EPMA (รูปที่ 4.43) พบว่าในเฟส 1 และ 2 มีปริมาณ Al กระจายอยู่ใกล้เคียงกัน ปริมาณ Ni จะมีน้อยที่สุดในบริเวณเฟส 3 ส่วนปริมาณของ Cr มีมากที่สุดที่เฟส 3 และน้อยมากเมื่อพิจารณาที่เฟส 2

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

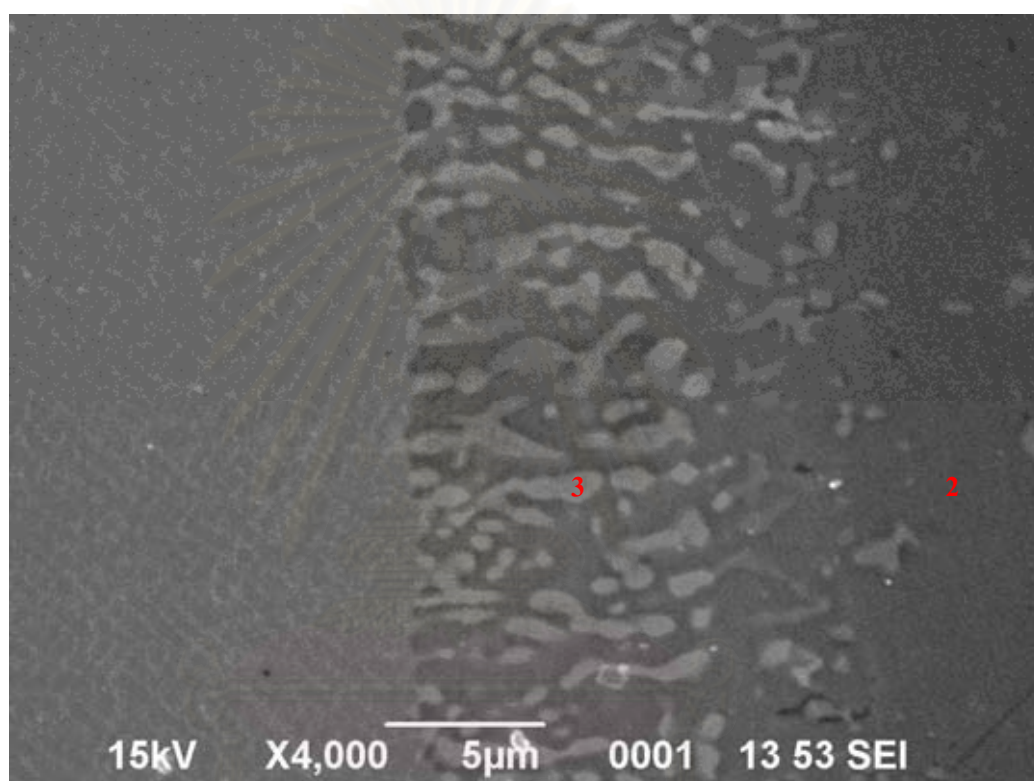


รูปที่ 4.43 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบของรูปที่ 4.42 ด้วยวิธี EPMA  
 ก.)Secondary electron, ข.) นิกเกิล, ค.) อะลูมิเนียม, ง.) โครเมียม

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

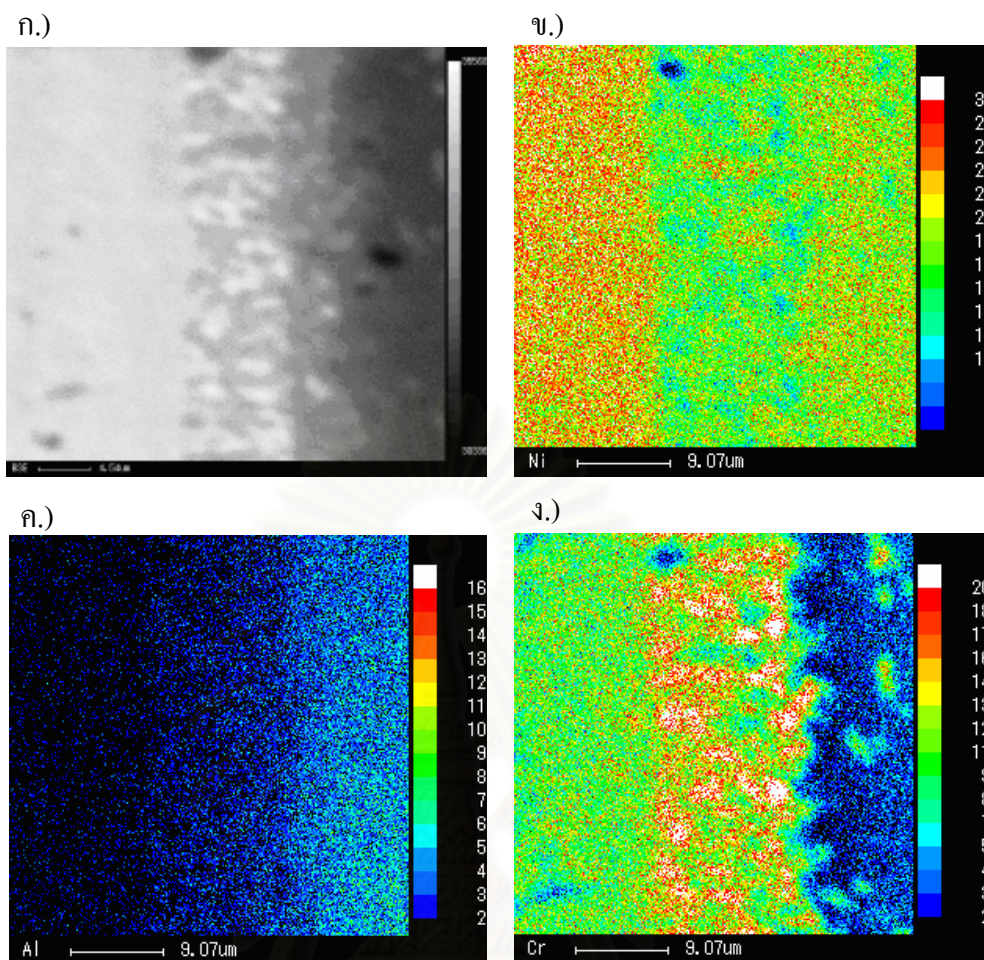


นอกจากนี้ยังพบลักษณะเช่นเดียวกันในชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบนโลหะเนื้อพื้น นิกเกิลเกรด IN 738 ที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนผสม  $\text{Al}:\text{Al}_2\text{O}_3$  เป็น 10:0 ดังแสดงใน รูป 4.44 พบว่าที่ชั้นเคลือบบริเวณใกล้รอยต่อระหว่างเนื้อพื้นกับชั้นเคลือบ มีเฟสที่มีสีขาว(3) จับตัว กันเป็นก้อนกระจายอยู่ทั่วไป ในเฟสสีเทาอ่อน (2)



รูปที่ 4.44 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบน IN 738 ที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 4 ชั่วโมง อัตราส่วนผสม  $\text{Al}:\text{Al}_2\text{O}_3$  10:0 ด้วย SEM

สถาบันวิจัยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



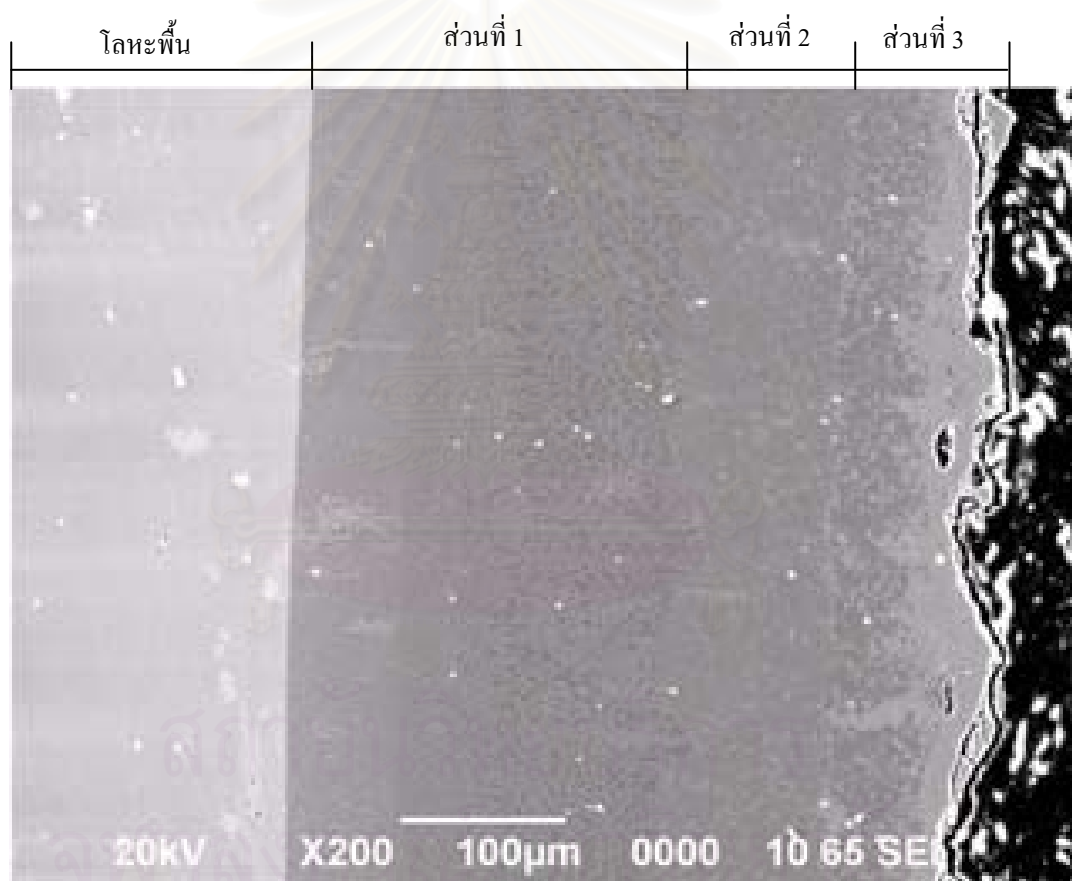
รูปที่ 4.45 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบ รูปที่ 4.44 ด้วยวิธี EPMA

ก.) Secondary electron, ข.) นิกเกิล, ค.) อะลูมิเนียม, ง.) โครเมียม

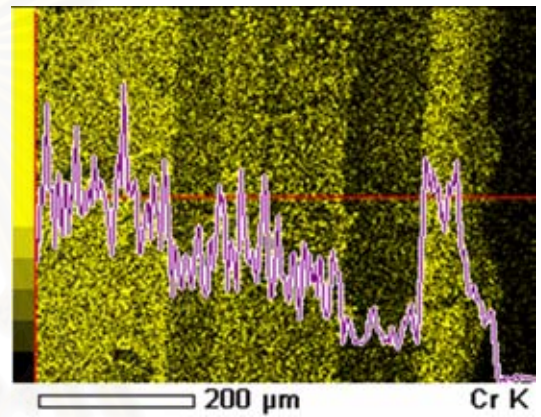
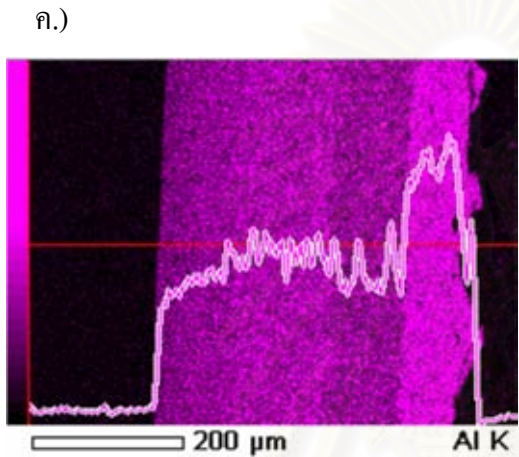
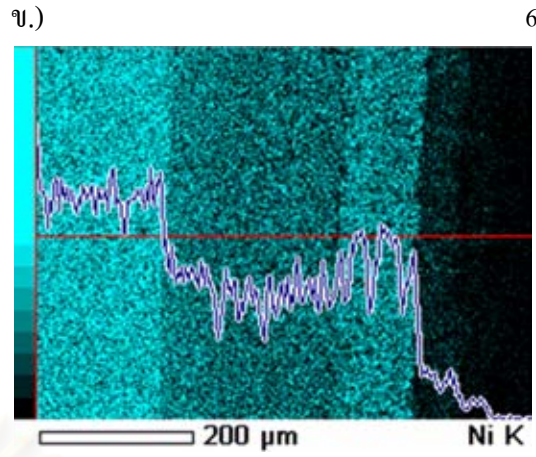
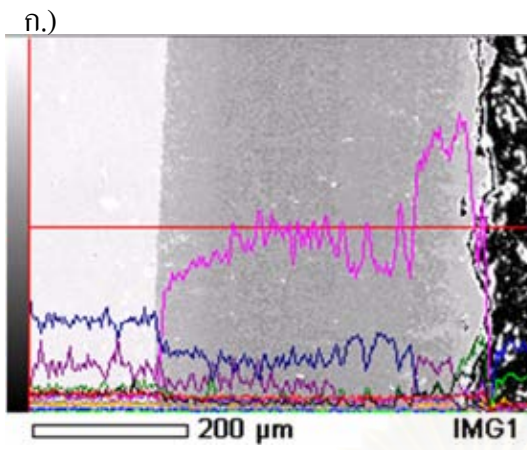
เมื่อทำการตรวจสอบรูป 4.44 ด้วย EPMA โดยแสดงไว้ในรูปที่ 4.45 พบว่าในเฟส 2 และเฟส 3 มีปริมาณ Al กระจายอยู่ใกล้เคียงกัน ซึ่งปริมาณ Ni ที่บริเวณเฟส 3 จะมีน้อยกว่าเฟสที่ 2 ส่วนปริมาณของ Cr นั้นจะมีมากที่สุดที่บริเวณเฟส 3 และน้อยลงในบริเวณเฟส 2 ซึ่งสอดคล้องกับชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมไนซิงบนโลหะเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด IN 738 ที่ 1000°C เป็นเวลา 2.25 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนผสม Al:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เป็น 7:3

#### 4.4.2.3 โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด GTD 111

จากรูปที่ 4.46 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบน โลหะ เนื้อพื้นนิกเกิลเกรด GTD 111 ที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนผสม Al:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เป็น 10:0 ด้วย SEM ที่กำลังขยาย 200 เท่า พบว่าชั้นเคลือบมีลักษณะที่แตกต่างกัน 3 ส่วน จึงได้ทำการตรวจสอบโดยใช้ EDS แบบ Mapping และ Line scan (รูปที่ 4.47) ในบริเวณส่วนที่ 3 ของชั้นเคลือบ พบปริมาณของ Al ที่มากสุดในส่วนที่ 3 และน้อยลงในปริมาณที่ใกล้เคียงกันในส่วนที่ 1 ส่วนที่ 2 จนกระทั่งน้อยสุดในเนื้อพื้น ซึ่งตรงข้ามกับปริมาณ Ni ที่มีน้อยในส่วนที่ 3 และมากที่สุดที่บริเวณเนื้อพื้น ส่วนปริมาณ Cr นั้นพบมากที่เนื้อพื้น และมีน้อย ในปริมาณที่ใกล้เคียงกันตลอดบริเวณส่วนที่ 1 และลดลงเมื่อเข้าสู่ส่วนที่ 2 โดยพบมากที่สุดที่ส่วนที่ 3



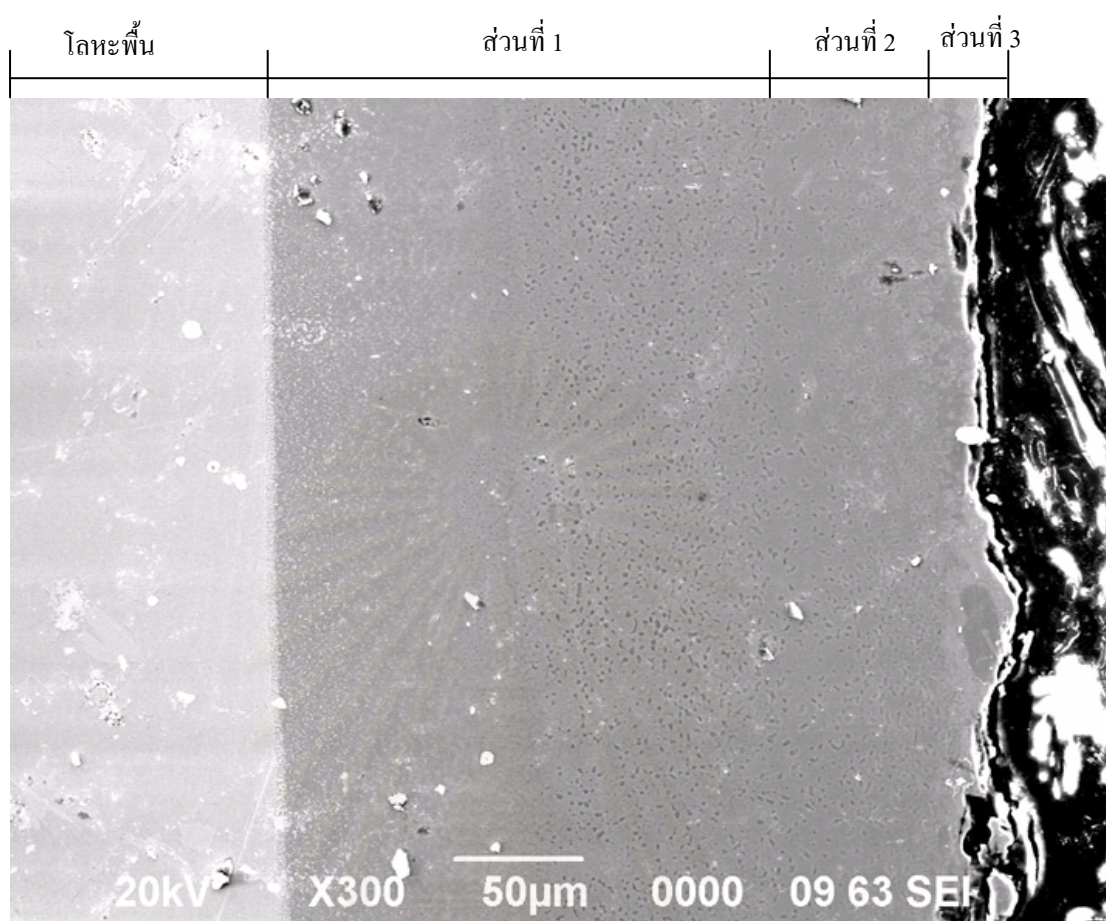
รูปที่ 4.46 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบ ของชิ้นงาน ผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบน GTD 111 ที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนผสม Al:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เป็น 10:0 ด้วย SEM



รูปที่ 4.47 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบน GTD 111 ที่ 1000°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนผสม Al:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เป็น 10:0 ด้วย EDS ก.)Secondary electron, ข.)

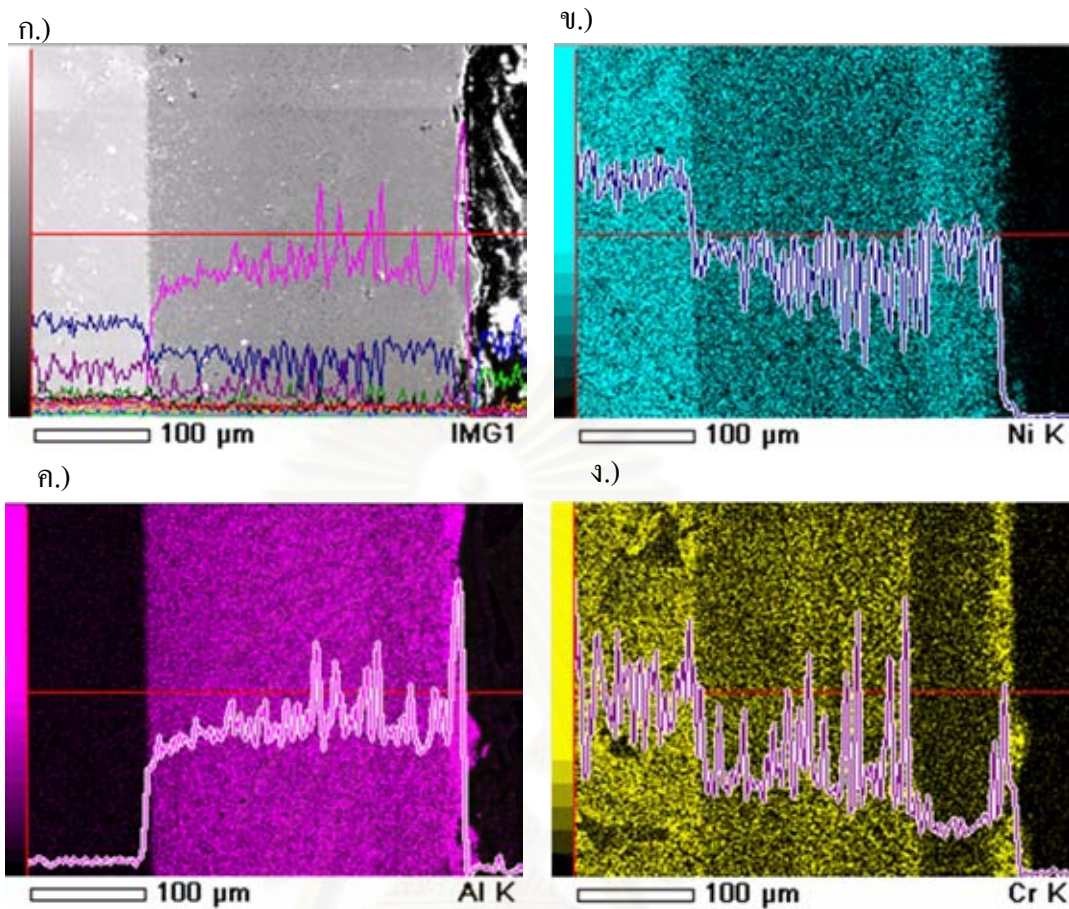
นิกเกิล, ค.) อะลูมิเนียม, ง.) โครเมียม

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.48 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบ ของชิ้นงาน ผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิงบน GTD 111 ที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2.25 ชั่วโมงที่อัตราส่วนผสม  $\text{Al}:\text{Al}_2\text{O}_3$  เป็น 7:3 ด้วย SEM

ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิงบนโลหะ เนื้อพื้นนิกเกิลเกรด GTD111 ที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2.25 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนผสม  $\text{Al}:\text{Al}_2\text{O}_3$  เป็น 7:3 ด้วย SEM ที่กำลังขยาย 300 เท่า (รูปที่ 4.48) พบลักษณะที่แตกต่างกันของชั้นเคลือบตามความลึกผิว จึงได้ทำการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุโดยใช้ EDS แบบ Mapping และ Line scan (รูปที่ 4.49) พบปริมาณของ Al มากสุดในส่วนที่ 3 และน้อยลงในปริมาณที่ใกล้เคียงกันในส่วนที่ 1 ส่วนที่ 2 ซึ่งตรงข้ามกับปริมาณ Ni ที่มีน้อยในส่วนที่ 3 และมากที่สุดที่บริเวณเนื้อพื้น ส่วนปริมาณ Cr นั้นพบมากที่เนื้อพื้น และมีน้อย ในปริมาณที่ใกล้เคียงกันตลอดบริเวณส่วนที่ 1 และลดลงเมื่อเข้าสู่ส่วนที่ 2 โดยพบมากที่สุดที่ส่วนที่ 3 ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับชิ้นงาน ผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิงบนโลหะเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด GTD 111 และ IN 738 ที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2.25 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนผสม  $\text{Al}:\text{Al}_2\text{O}_3$  เป็น 10:0



รูปที่ 4.49 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมไนซิงบน GTD 111 ที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2.25 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนผสม  $\text{Al}:\text{Al}_2\text{O}_3$  เป็น 7:3 ด้วย EDS ก.)Secondary electron, ข.)

นิกเกิล, ค.) อะลูมิเนียม, ง.) โครเมียม

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### วิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 5.1 ผลการวิเคราะห์ขนาดผงอะลูมิเนียม

จากผลการเปรียบเทียบการเลือกใช้ขนาดผงอะลูมิเนียม ขนาด 42 และ 3  $\mu\text{m}$  ของชิ้นงาน นิกเกิลผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิงที่อุณหภูมิ  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 4 ชม. ขนาดผง 42  $\mu\text{m}$  ไม่พบชั้นเคลือบ แต่จะเกิดชั้นเคลือบ เมื่อเลือกใช้ผงอะลูมิเนียมขนาด 3  $\mu\text{m}$  การที่ผงอะลูมิเนียมขนาดเล็กมีโอกาสที่จะสามารถเกิดชั้นเคลือบผิวมากกว่าผงอะลูมิเนียมขนาดใหญ่เนื่องมาจากความสามารถในการเปียก (wettability) ของอะลูมิเนียมที่หลอมเหลวบนผงอะลูมิเนียมมีค่าต่ำ นั่นคืออะลูมิเนียมหลอมเหลวจะไม่สามารถเปียกหรือแผ่ลงบนผงอะลูมิเนียม ทำให้ขณะทำการอะลูมิเนียมในซิงเพื่อเป็นการลดพลังงานพื้นผิว อะลูมิเนียมเหลวจึงเปลี่ยนรูปร่างเป็นเป็นทรงกลม และเกาะตัวกันอยู่ระหว่างผงอะลูมิเนียม ทำให้ อะลูมิเนียมไม่สามารถหยดลงมาบนนิกเกิลได้และค้างอยู่บนผงอะลูมิเนียมที่หนีจากการทำอะลูมิเนียมในซิง ยิ่งผงอะลูมิเนียมมีขนาดใหญ่จะทำให้เกิดการรวมกลุ่มกันเป็นก้อนใหญ่มากขึ้น การกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ โอกาสที่อะลูมิเนียมเหลวจะหยดผ่านผงอะลูมิเนียมมาถึงผิวโลหะ จึงมีน้อยตามไปด้วย

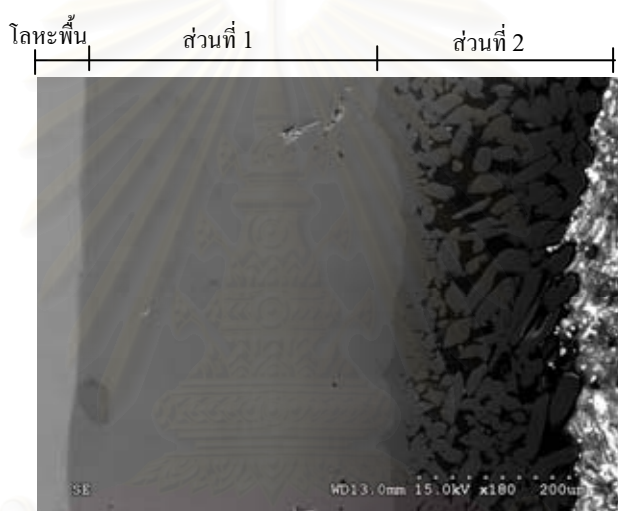
นอกจากนี้ ถึงแม้ว่าจะมีโอกาสที่ผงอะลูมิเนียมขนาดใหญ่ จะเกิดการไหลของอะลูมิเนียม หลอมเหลวผ่านผงอะลูมิเนียมมาลงบนพื้นนิกเกิลได้ แต่ถ้าปริมาณของอะลูมิเนียมเหลวนี้น้อย จะไม่เกิดความต่อเนื่อง อันเนื่องมาจากความสามารถในการเปียกของอะลูมิเนียมหลอมเหลวบนนิกเกิล ไม่ดีเช่นเดียวกัน ดังนั้นเมื่ออะลูมิเนียมหลอมเหลวหยดลงมาบนนิกเกิลแล้วจะไม่สามารถไหลและกระจายไปจนทั่วผิวหน้าเพื่อให้เกิดเป็นชั้นเคลือบที่ต่อเนื่องนั้น แต่จะเกิดการฟอร์มตัวเป็น สารประกอบ  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  ขึ้นทันทีเป็นชั้นที่อยู่ระหว่างอะลูมิเนียมหลอมเหลวและพื้นนิกเกิลแล้วนิกเกิล จึงละลายเข้าไปในอะลูมิเนียมเหลวมากขึ้นทำให้ได้สารประกอบ  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  ในลักษณะที่เป็นอนุภาค สัณฐานกลมรีบนผิวหน้านิกเกิล จึงพบสารประกอบที่เกิดขึ้นอย่างไม่ต่อเนื่องบนผิวหน้านิกเกิล

#### 5.2 ผลการวิเคราะห์เฟสในชั้นเคลือบ

##### 5.2.1 วิเคราะห์เฟสในชั้นเคลือบของโลหะนิกเกิล

ชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิงบนโลหะนิกเกิล ที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2.25 ชั่วโมง อัตราส่วนผสม  $\text{Al}:\text{Al}_2\text{O}_3$  10:0 และ 7:3 เมื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคตัดขวางด้วย SEM พบ ลักษณะชั้นเคลือบมี 2 ส่วน ประกอบด้วย 3 เฟส คือ บริเวณส่วนที่ 1 ซึ่งอยู่ติดกับเนื้อพื้นนิกเกิล มีลักษณะเป็นเฟสเดี่ยว คือเฟสซีเทา และบริเวณส่วนที่ 2 ซึ่งอยู่ติดกับผิวด้านนอก โดยบริเวณที่ 2 นี้ ประกอบไปด้วย 2 เฟสคือเฟสซีเทาเข้มและ เฟสสีดำ (ดังรูป 5.1) เมื่อตรวจสอบการกระจายตัว

ปริมาณของธาตุต่างๆในแต่ละบริเวณ ด้วย EDS แบบ Mapping และ Linescan พบว่าบริเวณส่วนที่ 1 มีปริมาณ Ni และ Al ที่สม่ำเสมอ สำหรับบริเวณส่วนที่ 2 ปริมาณของ Ni จะลดลงจนน้อยสุดที่ผิว ส่วนปริมาณ Al จะเพิ่มมากขึ้นจนมากที่สุดที่ผิว ซึ่งผลของ EPMA ได้แสดงให้เห็นว่า ปริมาณ Ni จะมากที่สุดที่เฟสสีเทาที่อยู่ในส่วนที่ 1 พบน้อยลงบริเวณเฟสสีเทาเข้ม และจะไม่พบ Ni บริเวณเฟสสีดำ ในส่วนที่ 2 เลย ส่วนปริมาณของ Al นั้น จะพบมากที่สุดบริเวณเฟสสีดำ ในส่วนที่ 2 และน้อยที่สุดบริเวณเฟสสีเทาในส่วนที่ 1 จากผล XRD แบบ GIXD ที่มุมตกกระทบ  $5^{\circ}$  ฝวนอกสุดของชั้นเคลือบ พบพีคของ Al และ พีคของ  $\text{NiAl}_3$  มีความเข้มสัมพัทธ์สูง เมื่อทดสอบลึกลงเข้ามาจากผิว พีคของ Al จะหายไป ความเข้มสัมพัทธ์ของพีค  $\text{NiAl}_3$  จะลดลง ในขณะที่ความเข้มสัมพัทธ์  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  จะลดลง

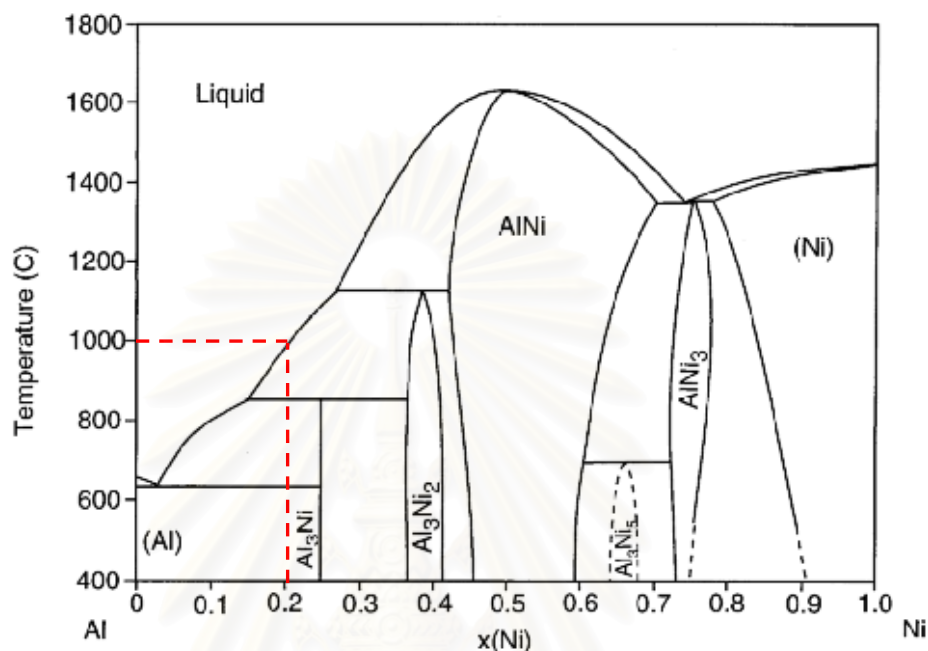


รูปที่ 5.1 ภาพถ่ายชั้นเคลือบของชิ้นงานนิกเกิลผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิง ที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2.25 ชั่วโมง อัตราส่วนผสม 10:0 ด้วย SEM

เมื่อพิจารณาผลทั้งหมดทำให้ทราบว่า เฟสสีเทาที่เกิดขึ้น ในส่วนที่ 1 ติดกับเนื้อพื้นนิกเกิล เป็น  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  สำหรับเฟสสีดำ และ สีเทาเข้มที่เกิดขึ้นในส่วนที่ 2 เป็น Al และ  $\text{NiAl}_3$  ตามลำดับ โครงสร้างจุลภาคลักษณะนี้เกิดจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจนอะลูมิเนียมหลอมเหลว นิกเกิลจะเริ่มละลายออกเข้ามาในอะลูมิเนียมจนกระทั่งปริมาณของนิกเกิลที่ละลายออกมาจากเนื้อพื้นมีปริมาณมากถึงค่าความสามารถสูงสุดในการละลาย (maximum solubility) ของนิกเกิลในอะลูมิเนียมคือมากกว่า 20 % atom จะเริ่มมีการตกผลึกของเฟส  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  ตามเฟสไดอะแกรม (รูปที่ 5.2) และจะค่อยๆมีความหนาเพิ่มขึ้น จนกระทั่งเมื่อหยุดการทดลองหากยังมีปริมาณอะลูมิเนียมเหลวที่มีปริมาณนิกเกิลละลายอยู่ เมื่ออุณหภูมิลดลงแต่ยังคงสูงกว่าอุณหภูมิเพอริเทคติก (Peritectic Temperature) จะเกิดการตกผลึกของเฟส  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  เมื่ออุณหภูมิลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิเพอริเทคติก



จะมีเฟส  $\text{NiAl}_3$  เกิดขึ้น และเมื่ออุณหภูมิลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิยูเทคติก (Eutectic Temperature) เกิดขึ้นเฟสของ Al และ  $\text{NiAl}_3$  จากปฏิกิริยายูเทคติก ตามลำดับดังเฟสไดอะแกรม



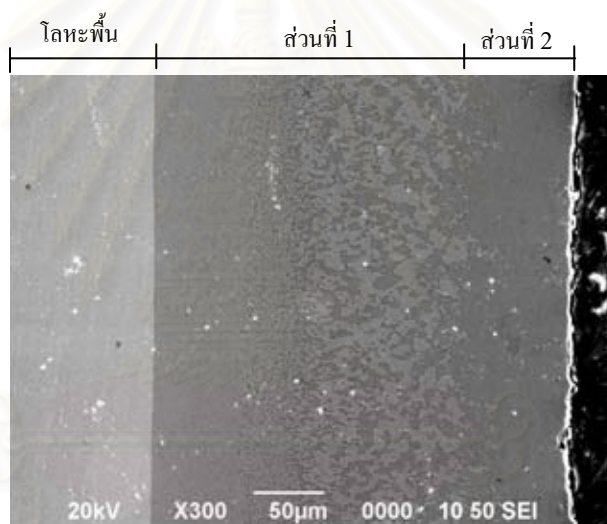
รูปที่ 5.2 แผนภูมิสมดุลระหว่างอะลูมิเนียมและนิกเกิล

เมื่อเพิ่มเวลาการทดลองขึ้นเป็น 4 ชม. ชั้นสารประกอบ  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  จะโตขึ้นตามเวลาในการทำอะลูมิเนียมในซิง ทำให้ปริมาณของอะลูมิเนียมเหลวจะลดลง ทำให้บริเวณส่วนที่ 1 ที่เป็นเฟสของ  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  มีความหนาเพิ่มขึ้น ในขณะที่ส่วนที่ 2 จะลดลง ดังรูปโครงสร้างจุลภาคตัดขวางของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิงบนโลหะนิกเกิล ที่  $1000^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยอัตราส่วนผสมอะลูมิเนียมต่ออะลูมินาเป็น 10:0 และเมื่ออัตราส่วนอะลูมิเนียมต่ออะลูมินาตกลงเป็น 7:3, 5:5 และ 3:7 ปริมาณของอะลูมิเนียมเหลวจะลดลงด้วย ส่งผลให้ชั้นเคลือบที่ได้บางลง และมีเพียงเฟสสีเทาในส่วนที่ 1 ที่เป็นเฟสของ  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  เพียงส่วนเดียว

### 5.2.2 วิเคราะห์เฟสในชั้นเคลือบของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด Inconel 738

ชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิงบนโลหะผสมพิเศษ เนื้อพื้นนิกเกิลเกรด IN 738 ที่  $1000^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยอัตราส่วนผสม Al: $\text{Al}_2\text{O}_3$  10:0 พบลักษณะชั้นเคลือบจากภาพโครงสร้างจุลภาคตัดขวาง แบ่งได้เป็น 2 ส่วน (จากดังรูป 5.3) คือ ส่วนที่ 1 บริเวณใกล้เนื้อพื้นมีสีเทาผสมเฟสสีเทาเข้ม โดยมีเฟสสีเทาเป็นหลัก แต่จะมีเฟสสีเทาเข้มเพิ่มตามระยะห่างจากเนื้อพื้น และส่วนที่ 2 เป็นสีเทาเข้มอยู่บริเวณผิวนอก เมื่อตรวจสอบการกระจายตัวปริมาณของธาตุต่างๆ ในแต่ละบริเวณ ด้วย EDS แบบ Mapping และ Linescan (จากรูป 4.36) พบปริมาณของ Al ที่มากใน

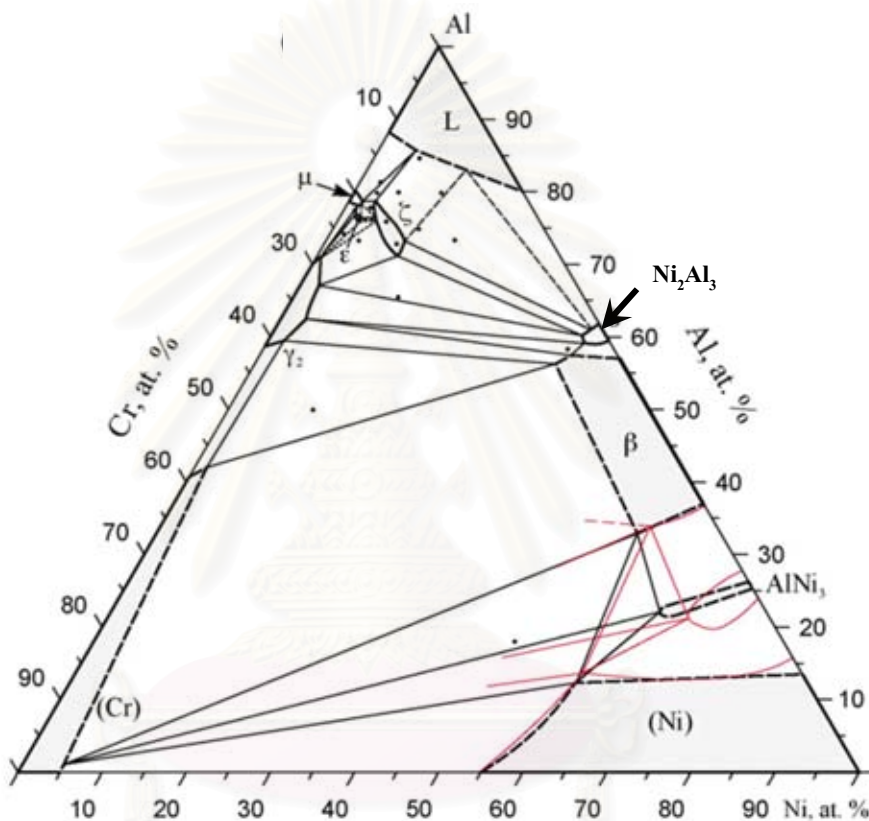
บริเวณส่วนที่ 2 และลดลงในส่วนที่ 1 ซึ่งตรงข้ามกับ Ni ที่ในส่วนที่ 1 จะมีปริมาณมากกว่าส่วนที่ 2 และมากที่สุดที่บริเวณเนื้อพื้น ส่วนปริมาณ Cr นั้นพบมากในส่วนที่ 2 และพบน้อยในปริมาณค่อนข้างคงที่ในส่วนที่ 1 นั้นแสดงให้เห็นว่าเฟสสืเทาเข้มเป็นเฟสที่มี Al มาก และมี Ni น้อย และจะลดลงเมื่อระยะความลึกจากผิวมากขึ้น ส่วนเฟสสืเทาเป็นเฟสที่มี Ni สูงกว่า และเมื่อพิจารณา XRD แบบ GIXD ที่มุมตกกระทบ  $5^{\circ}$  ตามความลึกผิว พบว่าที่ผิวบนสุดของชั้นเคลือบมีฟีด  $\text{NiAl}_3$  เป็นฟีดหลัก โดยมี  $\text{AlCr}_2$  ปนอยู่ดังจะเห็นได้จากที่ความลึกจากผิวไม่เกิน  $100 \mu\text{m}$  จะพบฟีดของสารประกอบ  $\text{NiAl}_3$ ,  $\text{AlCr}_2$  และ  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  เมื่อตรวจสอบความลึกผิวที่  $250 \mu\text{m}$  หรือคือบริเวณชั้นเคลือบส่วนที่ 2 ใกล้เคียงเนื้อพื้น พบสารประกอบ  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  มีปริมาณเพิ่มขึ้น เห็นได้จาก ความเข้มสัมพัทธ์ของฟีด  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  ที่เพิ่มขึ้นดังรูป 4.25 จากผลที่กล่าวมาทั้งหมด ทำให้ทราบว่าเฟสสืเทาในรูป 5.3 ซึ่งพบมากในชั้นเคลือบส่วนที่ 1 คือ  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$



รูปที่ 5.3 ภาพถ่ายชั้นเคลือบของชิ้นงาน IN 738 ผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิง ที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมง อัตราส่วนผสม 10:0 ด้วย SEM

ลักษณะการเกิดโครงสร้างจุลภาคเช่นนี้มีผลมาจากเมื่อ นิกเกิลละลายเข้าไปในอะลูมิเนียมเหลวจนกระทั่งปริมาณของนิกเกิลที่ละลายออกมาจากเนื้อพื้นมีปริมาณมากจนเริ่มมีการตกผลึกของเฟส  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  ซึ่งเมื่อชั้นสารประกอบ  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  เกิดขึ้นแล้ว นิกเกิลที่จะเข้าสู่อะลูมิเนียมเหลวที่เหลือจะยากกว่าเนื่องจากต้องผ่านชั้น  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  ทำให้ปริมาณนิกเกิลที่ผิวจะมีน้อยกว่าบริเวณใกล้เคียงเนื้อพื้น และเนื่องจากสารประกอบ  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  มีความสามารถละลายโครเมียมได้น้อยกว่า 4% โดยน้ำหนัก ดังเห็นได้จาก Ternary phases diagram ของ Ni-Al-Cr ตัด Isothermal ที่  $1000^{\circ}\text{C}$  (รูปที่ 5.4) ดังนั้นโครเมียมที่ละลายเข้ามาพร้อมกับนิกเกิลจะถูกผลักออกมาสู่บริเวณที่อะลูมิเนียมยังหลอมอยู่ เพราะอะลูมิเนียมเหลวมีความสามารถ

ในการละลายโครเมียมได้สูงกว่าสารประกอบนิกเกิลอะลูมิเนียมไนต์ ทำให้ปริมาณโครเมียมสูงขึ้น ในบริเวณที่อะลูมิเนียมยังคงหลอมเหลว ซึ่งคือบริเวณชั้นเคลือบส่วนที่ 2 โกล์ผิวของชิ้นงาน เมื่อสิ้นสุดการทดลองอะลูมิเนียมเหลวที่เหลืออยู่บริเวณโกล์ผิวซึ่งมีปริมาณโครเมียมสูง จะค่อยๆเย็นตัวลง ทำให้เกิดเป็นเฟสของ  $Ni_2Al_3$  และ  $AlCr_2$  ซึ่งสอดคล้องกับผลการตรวจสอบ XRD และ โครงสร้างจุลภาค ที่พบว่าบริเวณผิวมี  $NiAl_3$  และ  $AlCr_2$  มาก

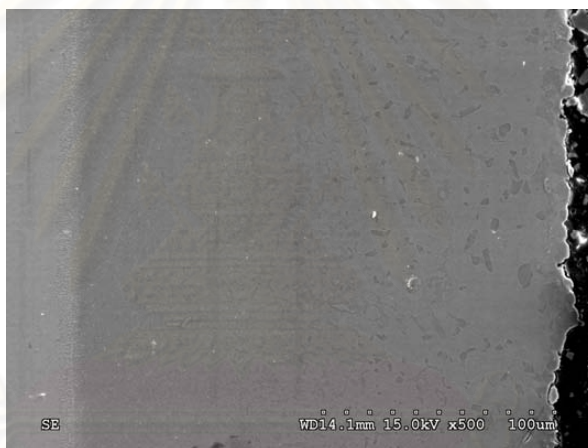


รูปที่ 5.4 Ternary phases diagram ของ Ni-Al-Cr ตัด Isothermal ที่ 1000°C [11]

สำหรับชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมไนซิงบน โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด IN 738 ที่ 1000°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยอัตราส่วนผสม  $Al:Al_2O_3$  เป็น 7:3 และ 5:5 จะมีปริมาณอะลูมิเนียมลดลง ทำให้อะลูมิเนียมเหลวที่เหลือมีปริมาณน้อยลง ชั้นเคลือบส่วนที่ 2 จึงแคบลง ดังรูป 4.12 ข.) และ ค.) จนกระทั่งไม่มีอะลูมิเนียมเหลวเหลืออยู่ในสัดส่วน 3:7 ซึ่งไม่พบชั้นเคลือบส่วนที่ 2 ในโครงสร้างจุลภาคตัดขวาง ดังรูป 4.12 ง.)

เมื่อเพิ่มเวลาในการทำอะลูมิเนียมไนซิง จะพบว่านิกเกิลจะสามารถละลายเข้าสู่อะลูมิเนียม และ เกิดเป็นชั้นสารประกอบ  $Ni_2Al_3$  ที่หนาขึ้น จนไม่มีอะลูมิเนียมหลอมเหลวเหลืออยู่ ทำให้พบเพียงชั้นเคลือบส่วนที่ 1 ซึ่งเมื่อทำการตรวจสอบด้วย EDS แบบ Mapping และ Linescan พบว่าชั้นเคลือบที่ได้ มีปริมาณ Ni, Al และ Cr ที่ค่อนข้างสม่ำเสมอตลอดชั้นเคลือบ (ดังรูปที่ 4.37

และ 4.38 ตามลำดับ) ซึ่งเมื่อพิจารณาภาพโครงสร้างจุลภาคตัดขวางชิ้นงานด้วย SEM (รูปที่ 5.5) พบเฟสที่เกิดผสมกันประกอบด้วยเฟสที่ 1 สีเทาเข้ม เฟสที่ 2 มีสีเทาอ่อน และเฟสที่ 3 มีสีขาว พบเป็นแถบอยู่บริเวณชั้นเคลือบที่ติดกับเนื้อพื้น โดยเฟสที่เกิดขึ้นในชั้นเคลือบสามารถแสดงด้วยผล XRD แบบ GIXD ที่มุมตกกระทบ  $5^{\circ}$  พบว่าประกอบด้วยฟิสิก  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$ ,  $\text{NiAl}_3$  และ  $\text{AlCr}_2$  ทำการตรวจสอบต่อด้วย EPMA ซึ่งผลที่ได้ทำให้ทราบว่า เฟสที่ 1 ซึ่งสีเทาเข้มคือเฟสของ  $\text{NiAl}_3$  ส่วนเฟสที่ 2 ซึ่งมีสีเทาอ่อนคือเฟสของ  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  และแถบของเฟสสีขาวเฟสที่ 3 คือ  $\text{AlCr}_2$  โดยเฟสสีขาวที่พบมากบริเวณรอยต่อของเนื้อพื้นและชั้นเคลือบนี้เกิดจากการที่เมื่อนิกเกิลแพร่เข้าสู่อะลูมิเนียมเหลวเกิดเป็นสารประกอบ  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  จนหมด แต่ยังคงให้อุณหภูมิที่สูงแก่ชิ้นงาน ทำให้อะลูมิเนียมเริ่มแพร่เข้าสู่บริเวณเนื้อพื้นที่มีนิกเกิลอยู่มาก แล้วผลึกโครเมียมออกมาเกิดเป็นสารประกอบ  $\text{AlCr}_2$

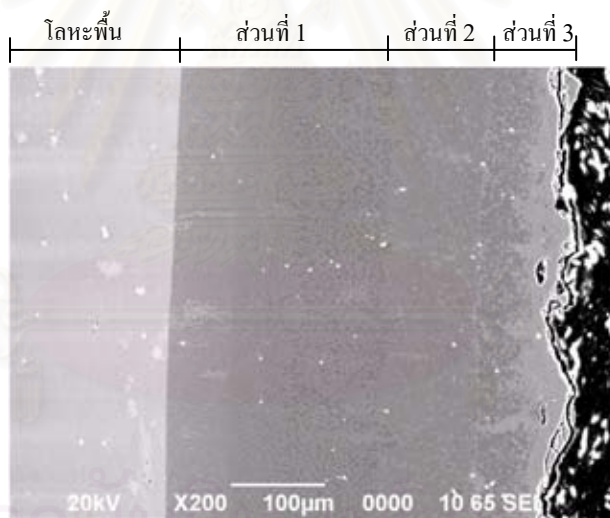


รูปที่ 5.5 ภาพถ่ายชั้นเคลือบของชิ้นงาน IN 738 ผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิง ที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2.25 ชั่วโมง อัตราส่วนผสม 7:3 ด้วย SEM

แถบสีขาวของเฟส  $\text{AlCr}_2$  นี้จะไม่เกิดขึ้นในกรณีที่ยังคงมีอะลูมิเนียมหลอมเหลืออยู่ (ดังรูปที่ 4.12 ก.-ค.) เพราะอะลูมิเนียมยังแพร่เข้าไปในนิกเกิลไม่มากพอ แต่หากปริมาณอะลูมิเนียมที่หยดลงบนผิวมีน้อย เมื่อเกิดเป็นชั้น  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  ทั้งชั้น ทำให้ไม่มีอะลูมิเนียมหลอมเหลือ แต่ยังคงอุณหภูมิสูงไว้ ( $1000^{\circ}\text{C}$ ) จะเกิดการแพร่ของอะลูมิเนียมในชั้นเคลือบเข้าสู่นิกเกิลเกิดเป็นสารประกอบนิกเกิลอะลูมิเนียมใน  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  ที่มีความสามารถในการละลายโครเมียมต่ำ ดังนั้นโครเมียมที่ถูกผลักออกมาจาก  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  จะทำให้เกิดแถบ  $\text{AlCr}_2$  ที่รอยต่อระหว่างชั้นเคลือบกับเนื้อพื้น ดังที่อธิบายไว้ก่อนหน้า โดยจะสามารถพบแถบ  $\text{AlCr}_2$  ลักษณะนี้ในชิ้นงานที่ใช้อัตราส่วนอะลูมิเนียมน้อยเช่นกรณีอัตราส่วน 3:7 แม้จะใช้เวลาเพียง 1 ชม. ดังรูปที่ 4.12 ง.)

### 5.2.3 วิเคราะห์เฟสในชั้นเคลือบของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด GTD 111

ชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบนโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด GTD 111 ที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยอัตราส่วนผสม  $\text{Al}:\text{Al}_2\text{O}_3$  10:0 เมื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคตัดขวางด้วย SEM พบลักษณะชั้นเคลือบแบ่งได้เป็น 3 ส่วน คือส่วนที่ 1 บริเวณด้านในติดกับเนื้อพื้นมีสีเทา และเทาเข้มสลับกัน ส่วนที่ 2 ตรงกลางชั้นเคลือบมีเทาเข้มและสีขาวสลับกัน และส่วนที่ 3 บริเวณด้านนอกของผิวเคลือบมีสีขาว ดังรูปที่ 5.6 เมื่อตรวจสอบการกระจายตัวปริมาณของธาตุต่างๆในแต่ละบริเวณ ด้วย EDS แบบ Mapping และ Linescan (จากรูป 4.47) ชั้นเคลือบส่วนที่ 3 หรือบริเวณผิวหน้าของชั้นเคลือบ พบปริมาณของ Al ที่มากและลดลงเมื่อ ความลึกผิวมากขึ้นจนกระทั่งน้อยมากในเนื้อพื้น ซึ่งตรงข้ามกับปริมาณ Ni ที่มากขึ้นเมื่อความลึกผิวมากขึ้น และมากที่สุดที่บริเวณเนื้อพื้น ส่วนปริมาณ Cr นั้นพบมากที่สุดที่เนื้อพื้น และมีน้อยในปริมาณที่ใกล้เคียงกันตลอดบริเวณชั้นเคลือบส่วนที่ 1 และส่วนที่ 2 โดยปริมาณโครเมียมจะเพิ่มขึ้น อีกครั้งที่บริเวณชั้นเคลือบส่วนที่ 3 ด้านผิวนอก



รูปที่ 5.6 ภาพถ่ายชั้นเคลือบของชิ้นงาน GTD 111 ผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิง ที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 1 ชั่วโมง อัตราส่วนผสม 10:0 ด้วย SEM

เมื่อพิจารณา XRD แบบ GIXD ที่มุมตกกระทบ  $5^{\circ}$  ตามความลึกผิวพบว่าชั้นเคลือบส่วนที่ 3 หรือที่ผิวนอกสุดของชั้นเคลือบความลึกจากผิวไม่เกิน  $80\ \mu\text{m}$  จะพบพีคของสารประกอบ  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$ ,  $\text{NiAl}_3$  และ  $\text{AlCr}_2$  โดยพีคของ  $\text{NiAl}_3$  และ  $\text{AlCr}_2$  เป็นพีคที่มีความเข้มสัมพัทธ์มากที่สุด เมื่อตรวจสอบความลึกผิวที่  $80\ \mu\text{m}$  หรือคือบริเวณชั้นเคลือบส่วนที่ 2 พบว่าสารประกอบ  $\text{NiAl}_3$  มีปริมาณเพิ่มขึ้น ซึ่งดูได้จากความเข้มสัมพัทธ์ของพีค  $\text{NiAl}_3$  ที่เพิ่มขึ้น เมื่อทดสอบลึกเข้าไปที่ชั้น

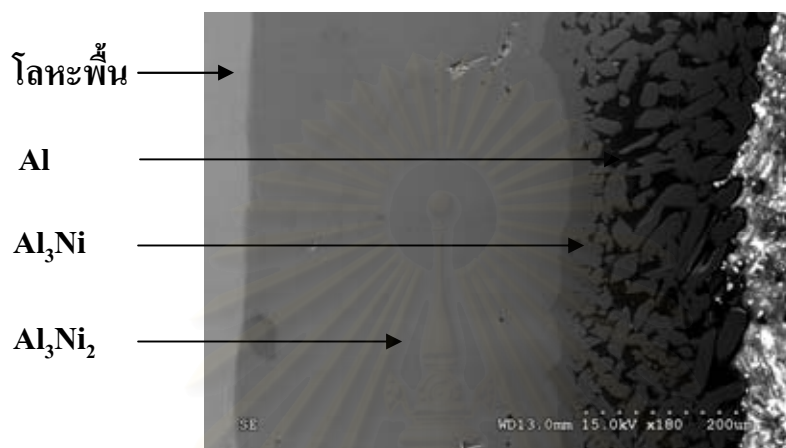
เคลือบส่วนที่ 3 ที่ความลึก 350  $\mu\text{m}$  พบเพียงฟิสิกของเฟส  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  ดังรูป 4.30 ซึ่งจากผลที่กล่าวมาทั้งหมดทำให้ทราบว่าเฟสสีขาวในบริเวณส่วนที่ 3 คือ  $\text{AlCr}_2$  ส่วนเฟสสีเทาเข้มที่พบมากในส่วนที่ 2 คือ  $\text{NiAl}_3$  และเฟสสีเทาในรูป 5.6 ก. ซึ่งพบมากในชั้นเคลือบส่วนที่ 1 คือ  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$

ซึ่งลักษณะการเกิดชั้นเคลือบส่วนที่ 1 ของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบนโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด GTD 111 นี้จะเกิดขึ้นในลักษณะเดียวกันกับชั้นเคลือบส่วนที่ 1 ของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบนโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด IN 738 คือเมื่ออะลูมิเนียมหลอมเหลวเกิดจะละลายเข้าไปในอะลูมิเนียม จนนิกเกิลในอะลูมิเนียมเหลวมีปริมาณมากพอจะเกิดเป็นสารประกอบ  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  เมื่อเกิดชั้นสารประกอบ  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  ทำให้เกิดแพรร์เข้าสู่อะลูมิเนียมเหลวที่เหลือได้ยากกว่า เนื่องจากต้องผ่านชั้น  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  เมื่อสิ้นสุดการทดลองอะลูมิเนียมเหลวที่เหลืออยู่จะค่อยๆเย็นตัวลง ทำให้เกิดเป็นเฟสของ  $\text{NiAl}_3$  ซึ่งมีความสามารถในการละลายโครเมียมได้น้อย ทำให้โครเมียมถูกผลักออกมาที่อะลูมิเนียมเหลวและเกิดเป็นชั้นเคลือบส่วนที่ 3 ซึ่งเป็นสารประกอบ  $\text{AlCr}_2$  ในลักษณะเช่นเดียวกันกับที่พบในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล IN 738 แต่เนื่องจากโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล GTD 111 มีธาตุผสมที่มากกว่าโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล IN 738 ซึ่งอัตราส่วนระหว่างโครเมียมต่อนิกเกิลในอะลูมิเนียมเหลวที่เหลือใน GTD 111 มีมากกว่า IN 738 ด้วย ทำให้พบชั้นเคลือบส่วนที่ 3 ที่เป็นเฟสของ  $\text{AlCr}_2$  ปริมาณมากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างจุลภาคและผล EDS ทั้งแบบ Mapping และ Linescan ที่พบว่าที่ผิวมี  $\text{AlCr}_2$  มาก

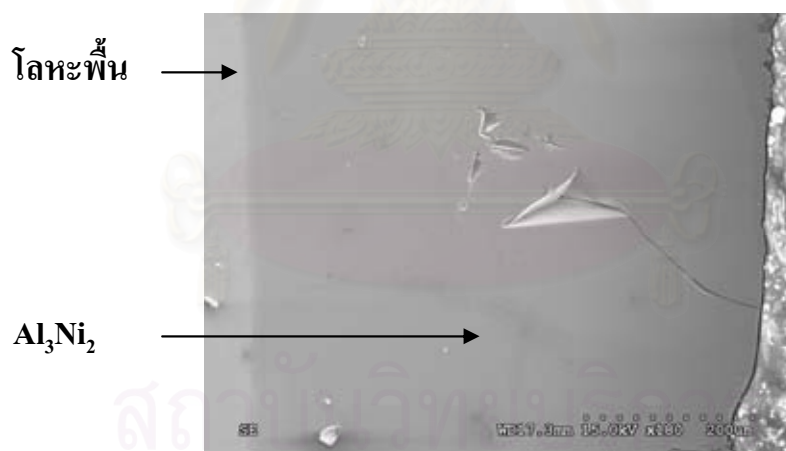
เมื่อเพิ่มเวลาในการทำอะลูมิเนียมในเชิงพบว่านิกเกิลจะสามารถละลายเข้าสู่อะลูมิเนียมได้มากขึ้น เกิดเป็นชั้นสารประกอบ  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  ที่หนาขึ้น จนไม่มีอะลูมิเนียมหลอมเหลืออยู่ ทำให้พบเพียงชั้นเคลือบส่วนที่ 1 และจะพบแถบสีขาวของเฟส  $\text{AlCr}_2$  ที่บริเวณรอยต่อของโลหะพื้นกับชั้นเคลือบลักษณะเดียวกับที่พบใน ชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด IN 738 ผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงเนื่องจากชั้นเคลือบกลายเป็นนิกเกิลอะลูมิเนียมในดีทั้งหมด ทำให้อะลูมิเนียมแพรร์จากชั้นเคลือบเข้าสู่ชิ้นงานและเกิดเป็น  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  พร้อมกับ  $\text{AlCr}_2$  ที่รอยต่อระหว่างโลหะพื้นกับชั้นเคลือบ ดังที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 5.2.2 แถบสีขาวของเฟส  $\text{AlCr}_2$  นี้จะไม่เกิดขึ้นในกรณีที่ยังคงมีอะลูมิเนียมหลอมเหลืออยู่ (ดังรูปที่ 4.15 ก. และ ข.) แต่หากปริมาณอะลูมิเนียมที่หยดลงบนโลหะพื้นมีน้อยเมื่อเกิดเป็นชั้น  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  ทั้งชั้น ทำให้ไม่มีอะลูมิเนียมหลอมเหลือ แต่ยังคงอุณหภูมิสูงไว้ ( $1000^\circ\text{C}$ ) จะเกิดการแพรร์ของอะลูมิเนียมในชั้นเคลือบเข้าสู่พื้นนิกเกิลทำให้เกิดแถบ  $\text{AlCr}_2$  ที่รอยต่อเช่นกัน

### 5.3 ผลการวิเคราะห์อัตราพลาของเวลาต่อลักษณะ และความหนาชั้นเคลือบ

ลักษณะชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบนโลหะนิกเกิลแบ่งได้ 2 กลุ่มคือ กลุ่ม 1 ชั้นเคลือบมี 2 ส่วนประกอบด้วย 3 เฟส คือ ส่วนที่ 1 เป็นเฟสของ  $Ni_2Al_3$  ที่มีสีเทา และส่วนที่ 2 ซึ่งอยู่ติดกับผิวด้านนอก ประกอบด้วย เฟส  $NiAl_3$  มีสีขาว และเฟส Al มีสีเทาเข้ม (ดังรูปที่ 5.7) และกลุ่มที่ 2 ชั้นเคลือบมีเฟสของ  $Ni_2Al_3$  เพียงส่วนเดียว (ดังรูปที่ 5.8)



รูปที่ 5.7 ลักษณะชั้นเคลือบกลุ่มที่ 1 ที่เกิดบนโลหะนิกเกิล



รูปที่ 5.8 ลักษณะชั้นเคลือบกลุ่มที่ 2 ที่เกิดบนโลหะนิกเกิล

เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นลักษณะชั้นเคลือบจะมีแนวโน้มเป็นแบบกลุ่มที่ 2 เพราะเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ปริมาณของนิกเกิลจากเนื้อพื้นที่จะแพร่เข้าสู่อะลูมิเนียมเหลวได้มากพอที่จะกลายเป็นสารประกอบ  $Ni_2Al_3$  จนหมด ดังกลไกการเกิดชั้นเคลือบที่แสดงไว้ในรูปที่ 5.9 โดยจะพบว่าเวลาไม่มีผลต่อความหนาโดยรวมของชั้นเคลือบ แต่มีผลต่อการเกิดชั้นสารประกอบในบริเวณส่วนที่ 1 เท่านั้น เมื่อพิจารณาความหนาของส่วนที่ 1 พบว่าความหนาจะเพิ่มตามเวลาที่มากขึ้น และความสม่ำเสมอมากขึ้น ซึ่งเห็นได้จากค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ 5.1 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานความหนาของชั้นเคลือบส่วนที่ 1 ในชิ้นงานนิกเกิล

อัตราส่วนAl:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10:0		7:3	
เวลา (hr.)	2.25	4	2.25	4
SD	58.74	42.9	15.14	13.8

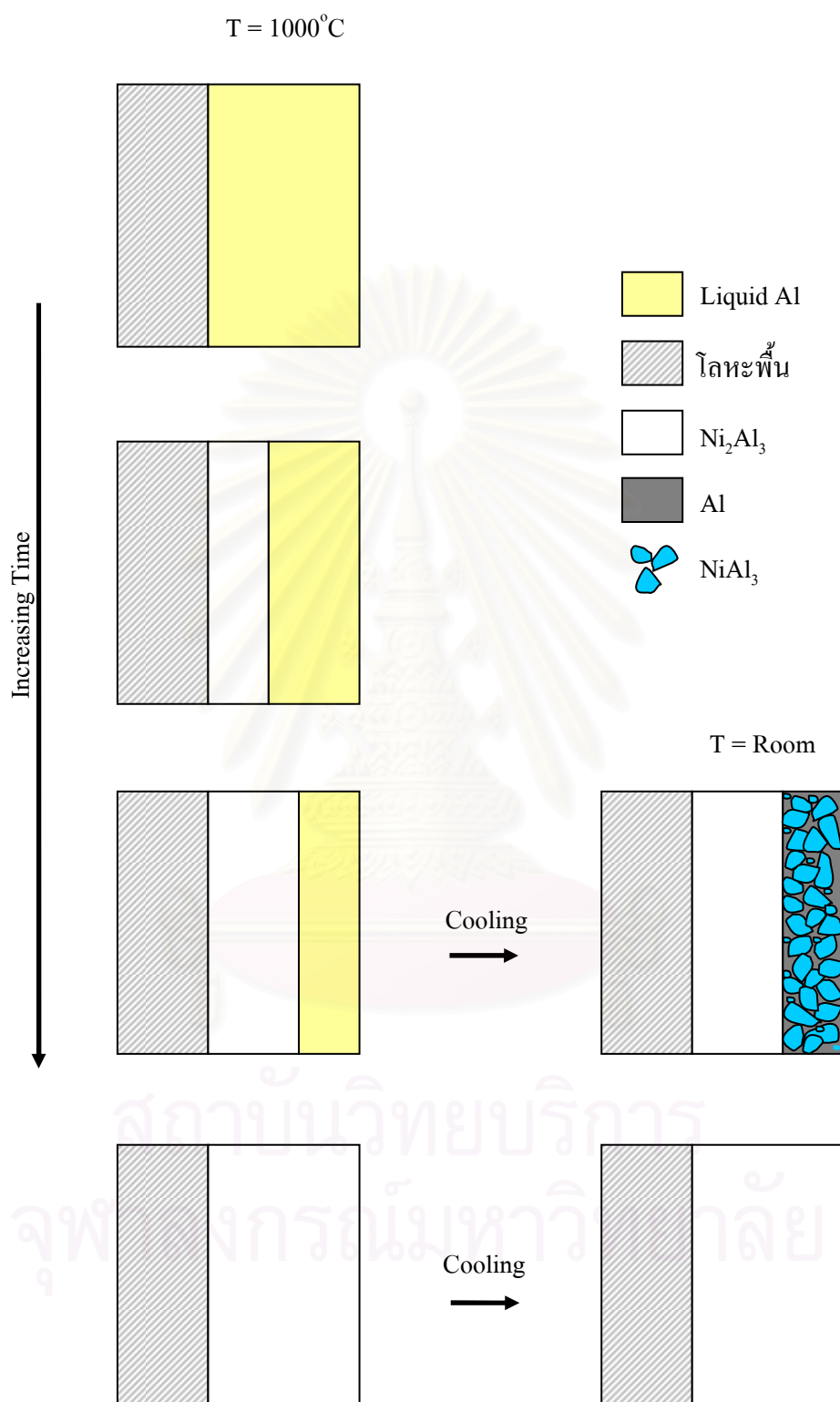
ลักษณะชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบนโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลทั้ง IN 738 และ GTD 111 มีความแตกต่างกันเล็กน้อยเนื่องจากธาตุผสม แต่กลไกการเกิดจะมีลักษณะเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 5.10 และ 5.11 ตามลำดับ ลักษณะชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบนโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลทั้ง IN 738 และ GTD 111 แบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 ชั้นเคลือบที่มีเฟสของ NiAl<sub>3</sub> และ AlCr<sub>2</sub> อยู่ที่บริเวณด้านนอก และ และกลุ่มที่ 2 ชั้นเคลือบมีส่วนเดียว โดยบริเวณรอยต่อชั้นเคลือบและเนื้อพื้นจะมีแถบสีขาวของเฟส AlCr<sub>2</sub> เกิดขึ้น

เมื่อเวลาน้อยลักษณะชั้นเคลือบที่พบจะมีลักษณะเป็นกลุ่มที่ 1 เนื่องจากเวลาที่ไมเพียงพอให้ปริมาณของนิกเกิลละลายออกมาในอะลูมิเนียมเหลว และเกิดสารประกอบ Ni<sub>2</sub>Al<sub>3</sub> จนหมดได้ เมื่อหยุดการทดลองอะลูมิเนียมเหลวที่เหลือแข็งตัว ทำให้ชั้นเคลือบไม่สามารถเปลี่ยนเป็นกลุ่มที่ 2 ได้ทันที แต่เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ลักษณะชั้นเคลือบ จะมีแนวโน้มเป็นแบบกลุ่มที่ 2 เพราะเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น โอกาสที่ปริมาณของนิกเกิลจากเนื้อพื้น ที่จะละลายเข้าสู่อะลูมิเนียมเหลว จนหมดมีมากขึ้น โดยจะพบว่าเวลาไม่มีผลต่อความหนาโดยรวมของชั้นเคลือบแต่มีผลต่อการเกิดชั้นสารประกอบในบริเวณส่วนที่ 1 เท่านั้น เมื่อพิจารณาความหนาของส่วนที่ 1 พบว่าความหนาจะเพิ่มตามเวลาที่มากขึ้น

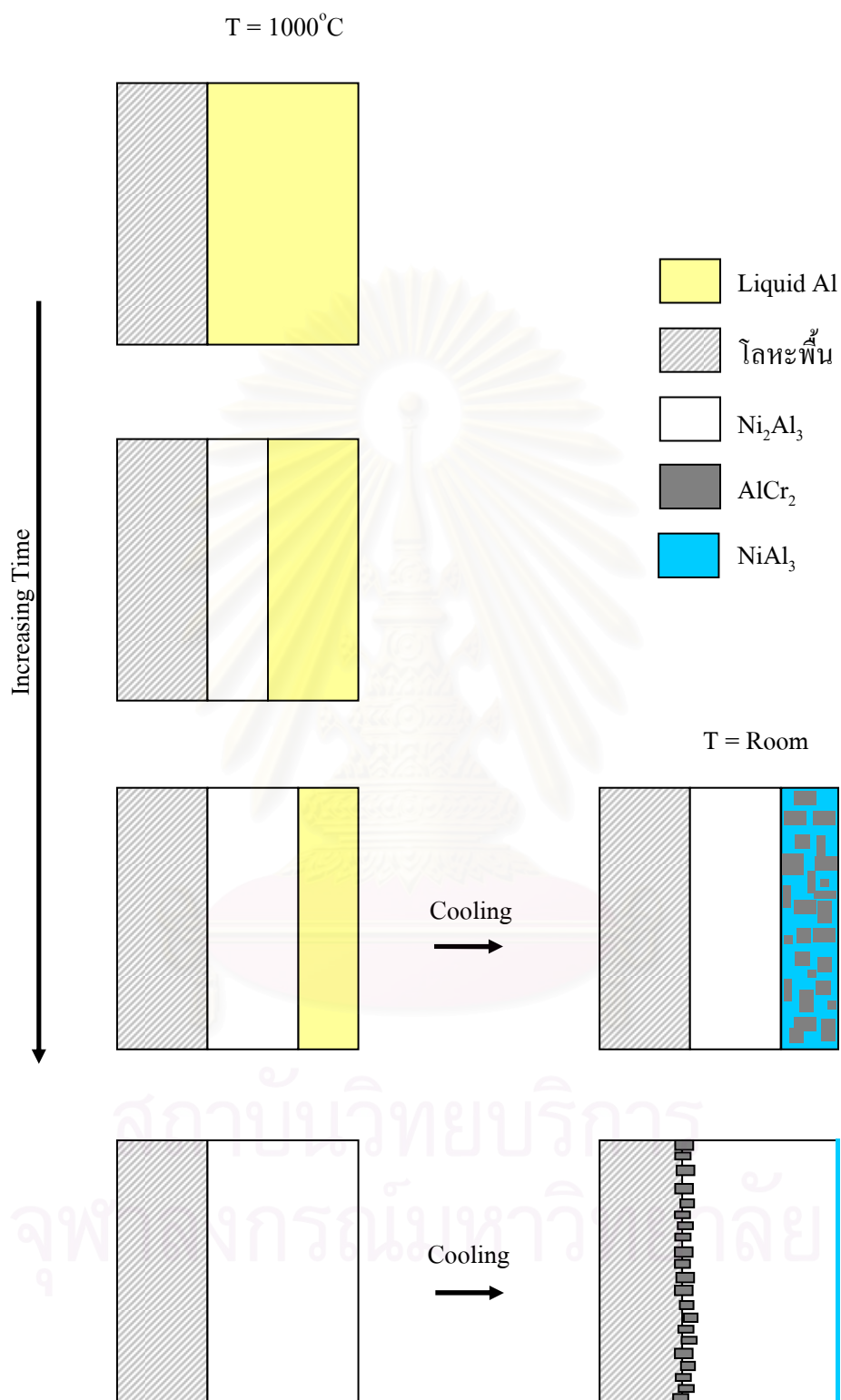
แต่สำหรับชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบนโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด IN 738 ทั้งที่เวลา 2.25 และ 4 ชม. พบว่าความหนาของชั้นเคลือบส่วนที่ 1 ไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน ทั้งนี้เนื่องมาจากปริมาณของอะลูมิเนียมมีน้อยเกินไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

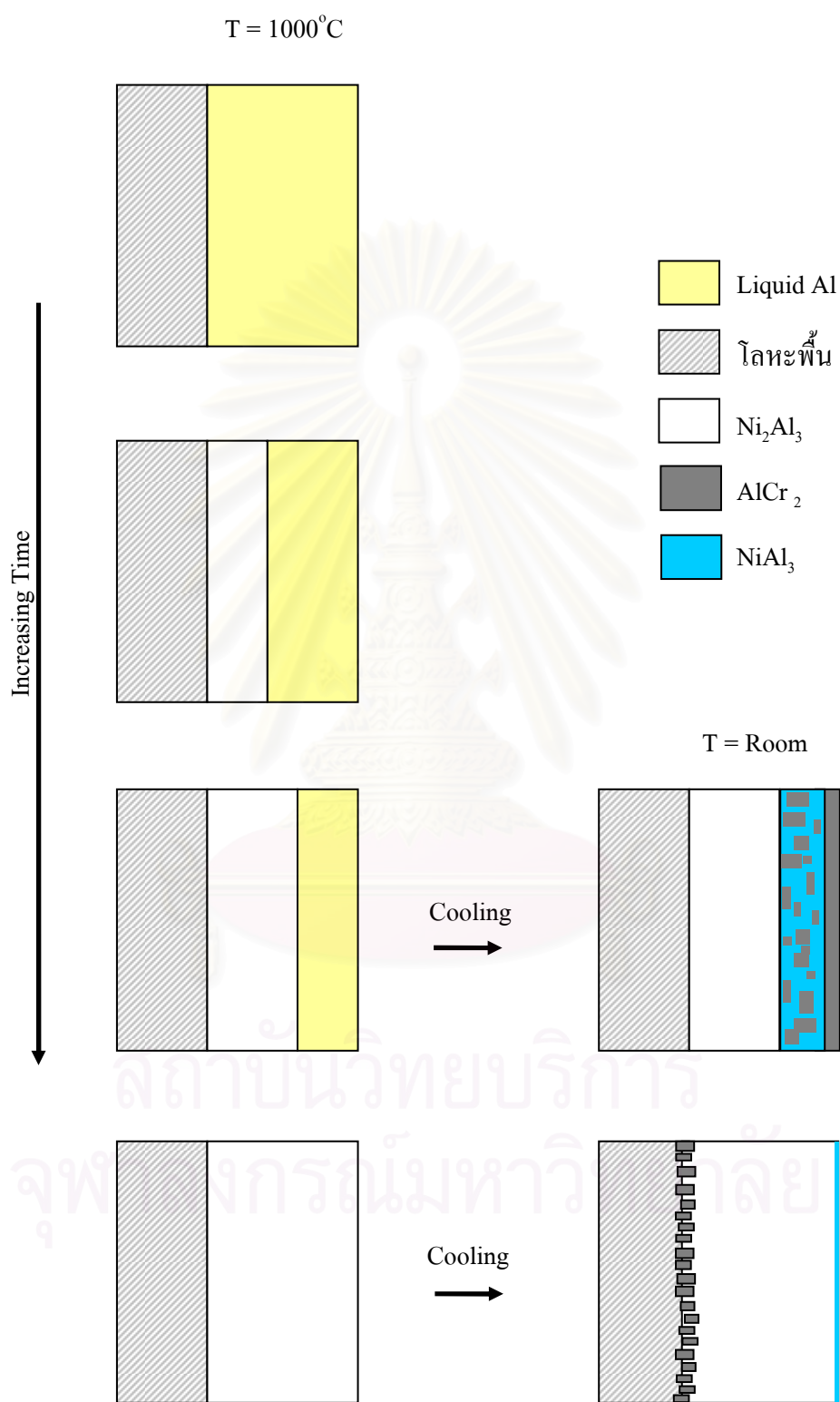




รูปที่ 5.9 กลไกการเกิดชั้นเคลือบบนโลหะนิกเกิล



รูปที่ 5.10 กลไกการเกิดชั้นเคลือบบน โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด IN 738



รูปที่ 5.11 กลไกการเกิดชั้นเคลือบบนโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้มนิกเกิลเกรด GTD 111

#### 5.4 ผลการวิเคราะห์อิทธิพลของอัตราส่วนต่อลักษณะและความหนาชั้นเคลือบ

อัตราส่วนมีอิทธิพลต่อลักษณะชั้นเคลือบทั้งบนโลหะนิกเกิล และโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด IN 738 และ GTD ไปในแนวทางเดียวกัน คือเมื่ออัตราส่วนระหว่างอะลูมิเนียมต่ออะลูมินาน้อยลง ทำให้ปริมาณอะลูมิเนียมเหลวที่เกาะบน โลหะเนื้อพื้นน้อยลง ส่งผลให้ชั้นเคลือบจะมีแนวโน้มเป็นแบบกลุ่มที่ 2 เพราะไม่มีปริมาณของอะลูมิเนียมเหลวเหลืออยู่

สำหรับชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบนโลหะนิกเกิล พบว่าเมื่ออัตราส่วนผสมของอะลูมิเนียมต่ออะลูมินาน้อยลงทำให้ปริมาณ อะลูมิเนียมเหลวที่จะเป็นสารประกอบ  $Ni_2Al_3$  ในชั้นเคลือบมีน้อยลงทำให้ความหนาของชั้นเคลือบน้อยลงไปด้วย (ดังตารางที่ 5.2) ซึ่งแนวโน้มเช่นนี้ปรากฏในชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบนโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเกรด IN 738 และ GTD 111 เช่นกัน (ดังตารางที่ 5.3-5.4 ตามลำดับ)

ตารางที่ 5.2 ค่าความหนาเฉลี่ยของชั้นเคลือบของชิ้นงานนิกเกิล

นิกเกิล		
เวลา (hr.)	อัตรา ส่วนผสม	ความหนา เฉลี่ย ( $\mu\text{m}$ )
2.25	10:0	616.85
	7:3	566.64
4	10:0	625.08
	7:3	428.59
	5:5	79.06
	3:7	25.02

ตารางที่ 5.3 ค่าความหนาเฉลี่ยของชั้นเคลือบของชิ้นงาน IN 738

IN 738								
เวลา (hr.)	อัตรา ส่วนผสม	ความหนาเฉลี่ย ( $\mu\text{m}$ )	เวลา (hr.)	อัตรา ส่วนผสม	ความหนาเฉลี่ย ( $\mu\text{m}$ )	เวลา (hr.)	อัตรา ส่วนผสม	ความหนาเฉลี่ย ( $\mu\text{m}$ )
1	10:0	288.73	2.25	10:0	208.95	4	10:0	220.98
	7:3	238.11		7:3	217.22		7:3	213.60
	5:5	168.11		5:5	161.85		5:5	234.74
	3:7	27.60		3:7	56.90		3:7	45.43

ตารางที่ 5.4 ค่าความหนาเฉลี่ยของชั้นเคลือบของชิ้นงาน GTD 111

GTD 111								
เวลา (hr.)	อัตรา ส่วนผสม	ความหนาเฉลี่ย ( $\mu\text{m}$ )	เวลา (hr.)	อัตรา ส่วนผสม	ความหนาเฉลี่ย ( $\mu\text{m}$ )	เวลา (hr.)	อัตรา ส่วนผสม	ความหนาเฉลี่ย ( $\mu\text{m}$ )
1	10:0	364.89	2.25	10:0	400.77	4	10:0	412.7
	7:3	251.06		7:3	255.33		7:3	217.3
	5:5	133.85		5:5	124.32		5:5	128.51
	3:7	29.09		3:7	48.19		3:7	30.74

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 6

### สรุปผลการทดลอง

การทดลองเคลือบผิวโลหะนิกเกิลและโลหะผสมพิเศษนิกเกิลชนิด IN 738 และ GTD 111 ด้วยวิธีอะลูมิเนียมในซิง แบบ powder liquid coating สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

6.1 สามารถเคลือบผิวโลหะนิกเกิลและโลหะผสมพิเศษนิกเกิลชนิด IN 738 และ GTD 111 ด้วยวิธีอะลูมิเนียมในซิง แบบ powder liquid coating โดยใช้อะลูมิเนียมผสมอะลูมินา มี Ethyleneglycol เป็นตัวประสาน ควบคุมบรรยากาศเตาด้วยก๊าซอาร์กอน ที่อุณหภูมิ  $1000^{\circ}\text{C}$  ได้

6.2 ชั้นเคลือบที่พบจากการทำอะลูมิเนียมในซิงแบบ powder liquid coating กับชิ้นงานโลหะนิกเกิลและโลหะผสมพิเศษนิกเกิลชนิด IN 738 และ GTD 111 จะสามารถควบคุมปัจจัยต่างๆ อันได้แก่ขนาดของผงอะลูมิเนียม สัดส่วนของผงอะลูมิเนียมต่อผงอะลูมินา และระยะเวลาในการทำอะลูมิเนียมในซิง

6.3 สารประกอบที่เกิดขึ้นจากการทำอะลูมิเนียมในซิงบนชิ้นงานโลหะนิกเกิล ได้แก่ สารประกอบนิกเกิลอะลูมิเนียมในรูป  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  และ  $\text{NiAl}_3$  รวมถึงพบเฟสของ Al ขึ้นที่ชั้นนอกสุดของผิวหน้าของโลหะนิกเกิลในกรณีที่ เวลาในการทำอะลูมิเนียมในซิงน้อย หรืออัตราส่วนผงอะลูมิเนียมต่อผงอะลูมินามาก

6.3 สารประกอบที่เกิดขึ้นจากการทำอะลูมิเนียมในซิงบนชิ้นงานโลหะผสมพิเศษนิกเกิลชนิด IN 738 และ GTD 111 ได้แก่ สารประกอบนิกเกิลอะลูมิเนียมในรูป  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  และ  $\text{NiAl}_3$  และสารประกอบ  $\text{AlCr}_2$

6.4 สัดส่วนของผงอะลูมิเนียมและเวลาในการทำอะลูมิเนียมในซิงมีผลต่อลักษณะชั้นเคลือบ โดยในกรณีชิ้นงานโลหะนิกเกิลผ่านการอะลูมิเนียมในซิงที่อุณหภูมิ  $1000^{\circ}\text{C}$  ที่อัตราส่วนอะลูมิเนียมต่ออะลูมินาเป็น 10:0 และ 7:3 สำหรับเวลา 2.25 ชั่วโมง และอัตราส่วน 10:0 สำหรับเวลา 4 ชั่วโมง พบชั้นเคลือบ 2 ส่วน 3 เฟส โดยส่วนที่ 1 ซึ่งอยู่ติดกับเนื้อพื้นนิกเกิล มีลักษณะเป็นเฟสเดี่ยว คือ เฟสซีเทา และส่วนที่ 2 ซึ่งอยู่ติดกับผิวด้านนอก ที่ประกอบไปด้วย 2 เฟส คือ เฟสสีขาว และเฟสซีเทาเข้ม ในขณะที่ ชิ้นงานโลหะนิกเกิลผ่านการอะลูมิเนียมในซิงที่อุณหภูมิ  $1000^{\circ}\text{C}$  ที่อัตราส่วน

อะลูมิเนียมต่ออะลูมินาเป็น 7:3, 5:5 และ 3:7 สำหรับเวลา 4 ชั่วโมง จะพบชั้นเคลือบส่วนที่ 1 เพียงส่วนเดียว

6.5 สัดส่วนของผงอะลูมิเนียมและเวลาในการทำอะลูมิเนียมในซึ่งมีผลต่อลักษณะชั้นเคลือบในกรณีชิ้นงานโลหะผสมพิเศษนิกเกิลชนิด IN 738 ผ่านการอะลูมิเนียมในซึ่งที่อุณหภูมิ 1000°C ที่อัตราส่วนอะลูมิเนียมต่ออะลูมินา เป็น 10:0, 7:3 และ 5:5 ที่เวลา 1 ชั่วโมง พบชั้นเคลือบ 2 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 บริเวณใกล้เนื้อพื้นมีสีเทาสลับขาว และส่วนที่ 2 เป็นสีขาวอยู่บริเวณผิวนอก ในขณะที่ชิ้นงานโลหะนิกเกิลผ่านการอะลูมิเนียมในซึ่งที่อุณหภูมิ 1000°C ที่อัตราส่วนอะลูมิเนียมต่ออะลูมินาเป็น 3:7 สำหรับเวลา 1 ชั่วโมง และที่ทุกๆอัตราส่วน สำหรับเวลา 4 ชั่วโมง จะพบชั้นเคลือบส่วนที่ 1 เพียงส่วนเดียว แต่จะพบแถบสีขาว ที่บริเวณรอยต่อของผิวเคลือบ กับเนื้อพื้น

6.6 สัดส่วนของผงอะลูมิเนียมและเวลาในการทำอะลูมิเนียมในซึ่งมีผลต่อลักษณะชั้นเคลือบในกรณีชิ้นงานโลหะผสมพิเศษนิกเกิลชนิด GTD 111 ผ่านการอะลูมิเนียมในซึ่งที่อุณหภูมิ 1000°C ที่อัตราส่วนอะลูมิเนียมต่ออะลูมินา เป็น 10:0 และ 7:3 ทั้งที่เวลา 1 และ 2.25 ชั่วโมง และอัตราส่วน 10:0 สำหรับเวลา 4 ชั่วโมงพบชั้นเคลือบ 3 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 บริเวณด้านในติดกับเนื้อพื้นมีสีเทาเข้ม ส่วนที่ 2 ตรงกลางชั้นเคลือบมีสีเทาอ่อนและเทาเข้มสลับกัน และส่วนที่ 3 บริเวณด้านนอกของผิวเคลือบมีสีขาวในขณะที่ชิ้นงานโลหะนิกเกิลผ่านการอะลูมิเนียมในซึ่งที่อุณหภูมิ 1000°C ที่อัตราส่วนอะลูมิเนียมต่ออะลูมินาเป็น 5:5 และ 3:7 ทั้งที่เวลา 1 และ 2.25 ชั่วโมง และอัตราส่วน 7:3, 5:5 และ 3:7 สำหรับเวลา 4 ชั่วโมง จะพบชั้นเคลือบส่วนที่ 1 เพียงส่วนเดียว แต่จะพบแถบสีขาว ที่บริเวณรอยต่อของผิวเคลือบ กับเนื้อพื้น

6.7 เวลาในการทำอะลูมิเนียมในซึ่งมีผลต่อความหนาชั้นเคลือบของโลหะทั้งสามชนิดเหมือนกันคือ เวลาที่มากขึ้นทำให้ชั้นเคลือบส่วนที่ 1 หนาขึ้น

6.8 สัดส่วนของผงอะลูมิเนียมในการทำอะลูมิเนียมในซึ่งมีผลต่อความหนาชั้นเคลือบของโลหะทั้งสามชนิด เหมือนกันคือ อัตราส่วนระหว่างอะลูมิเนียมที่น้อยลง ทำให้ชั้นเคลือบส่วนที่ 1 บางลง

## รายการอ้างอิง

- [1] H. K. D. H. Bhadeshia. Nickel Based Superalloys. Available from :  
<http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2003/Superalloys/superalloys.html> [2006, May 12 ]
- [2] T. Sourmail. Coatings for Turbine Blades. Available from :  
<http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2003/Superalloys/coatings/index.html> [2006, May 12 ]
- [3] ดร.ปัญญาวัชร วัชยาว. เอกสารประกอบการสอน. วิชา High temperature Materials. ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, (2548)
- [4] S.A. Sajjadi, S. Nategh. A High Temperature deformation mechanism map for the high performance Ni-base superalloy GTD-111. Materials Science and Engineering A307. (2001) : 158-164
- [5] N. S. Cheruvu. Oxidation and Gamma prime particle coarsening. Proceeding of 2000 International Joint Power Generation Conference. Miami Beach, Florida, (2000). IJPGC2000-15068
- [6] L. Levin, A. Ginzburg, L. Klinger, T. Werber, A. Katsman and P. Schaaf. Controlled formation of surface layers by pack aluminization. Surface and Coating Technology 106. (1998) : 209-213
- [7] C. Houngninou, S. Chevalier and J.P. Larpin. Synthesis and characterisation of pack cemented aluminide coatings on metals. Applied Surface Science 236. (2004) : 256-269.
- [8] A.M. Hodge and D.C. Dunand. Synthesis of nickel-aluminide forms by pack-aluminization of nickel foams. Intermetallics 9. (2001) : 581-589.
- [9] Y. Tsuchida, S. Kirihara and Y. Tomota. Functionally Graded Coating for Steels by Reaction Diffusion. ISIJ International, vol. 40 ,No. 2. (2000) : 1029-1034.
- [10] Koji Murakami, Norihide Nishida, Kozo Osamura and Yo Tomata. Aluminization of high purity iron by powder liquid coating. Acta Materialia 52. (2004) : 1271-1281.
- [11] S.W.Ip, R. Sridhar, J.M. Toguri, T.F. Stephenson and A.E.M. Warner. Wettability of nickel coated graphite by aluminum. Materials Science and Engineering A244. (1998) : 31-38
- [12] B. Grushko, W. Kowalski, D. Pavlyuchkov, B. Przepi'orzy'nski and M. Surowiec. A contribution to the Al-Ni-Cr phase diagram. Journal of Alloys and Compound. (ARTICLE IN PRESS)



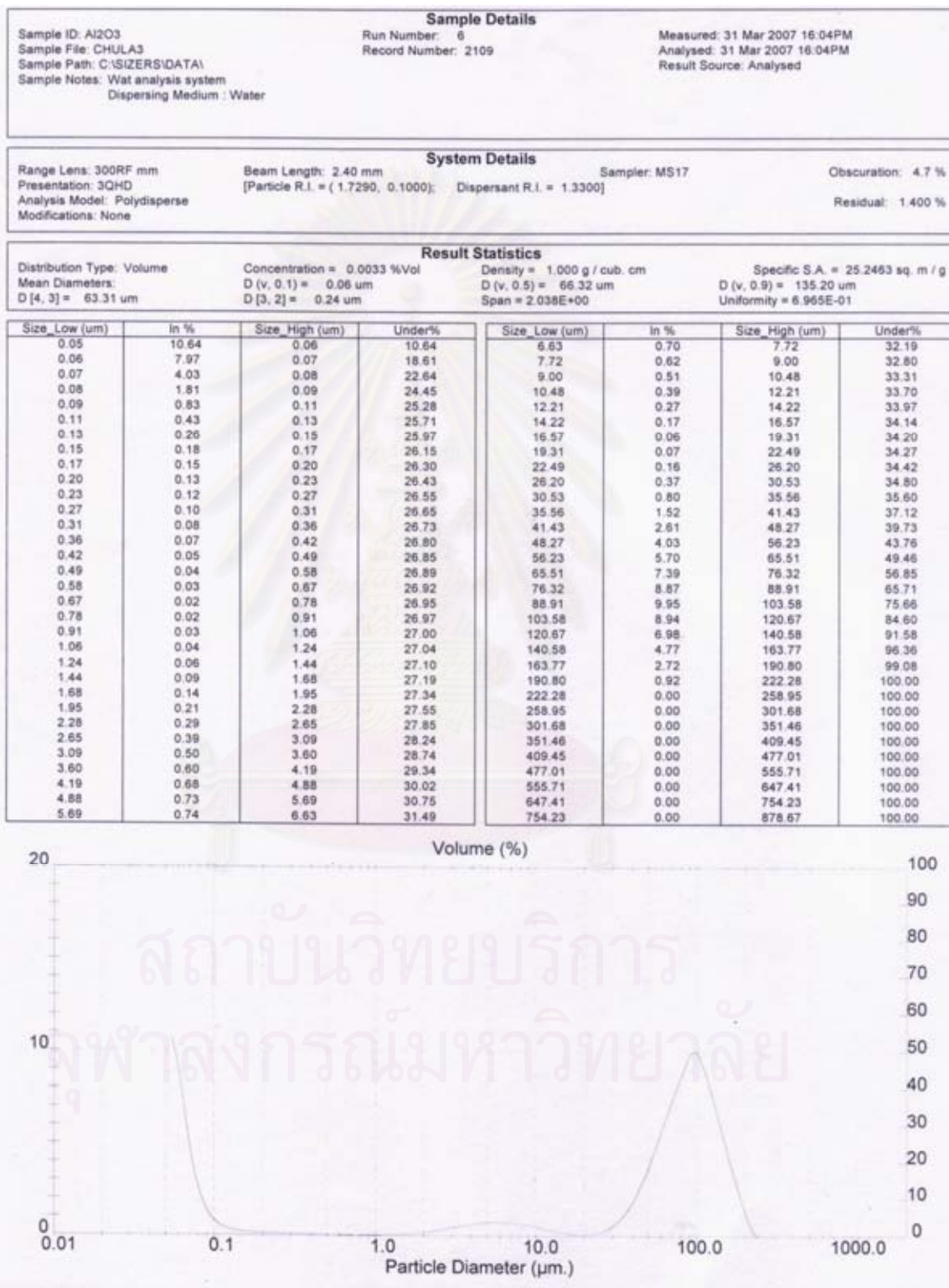


ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก.1 ผลการตรวจวิเคราะห์ขนาดอนุภาคอะลูมินา ด้วย laser particle analyzer ครั้งที่ 1



ตารางที่ ก.2 ผลการตรวจวิเคราะห์ขนาดอนุภาคอะลูมินา ด้วย laser particle analyzer ครั้งที่ 2

Sample Details							
Sample ID: AI2O3		Run Number: 8		Measured: 31 Mar 2007 16:04PM			
Sample File: CHULA3		Record Number: 2111		Analysed: 31 Mar 2007 16:04PM			
Sample Path: C:\SIZERS\DATA\				Result Source: Analysed			
Sample Notes: Wat analysis system							
Dispersing Medium : Water							
System Details							
Range Lens: 300RF mm		Beam Length: 2.40 mm		Sampler: MS17		Obscuration: 4.9 %	
Presentation: 3QHD		[Particle R.I. = (1.7290, 0.1000);		Dispersant R.I. = 1.3300]		Residual: 1.306 %	
Analysis Model: Polydisperse							
Modifications: None							
Result Statistics							
Distribution Type: Volume		Concentration = 0.0033 %Vol		Density = 1.000 g / cub. cm		Specific S.A. = 26.3774 sq. m / g	
Mean Diameters:		D (v, 0.1) = 0.06 um		D (v, 0.5) = 66.68 um		D (v, 0.9) = 139.61 um	
D [4, 3] = 64.39 um		D [3, 2] = 0.23 um		Span = 2.093E+00		Uniformity = 7.202E-01	
Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%	Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%
0.05	11.47	0.05	11.47	6.63	0.68	7.72	33.04
0.06	8.29	0.07	19.77	7.72	0.60	9.00	33.64
0.07	4.04	0.08	23.81	9.00	0.50	10.48	34.14
0.08	1.75	0.09	25.56	10.48	0.38	12.21	34.52
0.09	0.78	0.11	26.35	12.21	0.27	14.22	34.78
0.11	0.40	0.13	26.75	14.22	0.17	16.57	34.96
0.13	0.24	0.15	26.98	16.57	0.06	19.31	35.01
0.15	0.17	0.17	27.15	19.31	0.07	22.49	35.08
0.17	0.14	0.20	27.29	22.49	0.15	26.20	35.23
0.20	0.12	0.23	27.41	26.20	0.34	30.53	35.57
0.23	0.11	0.27	27.52	30.53	0.73	35.56	36.31
0.27	0.10	0.31	27.61	35.56	1.40	41.43	37.71
0.31	0.08	0.36	27.69	41.43	2.42	48.27	40.12
0.36	0.06	0.42	27.75	48.27	3.76	56.23	43.89
0.42	0.05	0.49	27.80	56.23	5.38	65.51	49.26
0.49	0.04	0.58	27.84	65.51	7.02	76.32	56.28
0.58	0.03	0.67	27.87	76.32	8.36	88.91	64.65
0.67	0.02	0.78	27.90	88.91	9.10	103.58	73.75
0.78	0.02	0.91	27.92	103.58	9.19	120.67	82.94
0.91	0.03	1.06	27.95	120.67	7.36	140.58	90.29
1.06	0.04	1.24	27.99	140.58	5.19	163.77	95.48
1.24	0.06	1.44	28.05	163.77	3.17	190.80	98.65
1.44	0.09	1.68	28.14	190.80	1.35	222.28	100.00
1.68	0.14	1.95	28.28	222.28	0.00	258.95	100.00
1.95	0.21	2.28	28.49	258.95	0.00	301.68	100.00
2.28	0.29	2.65	28.78	301.68	0.00	351.46	100.00
2.65	0.39	3.09	29.17	351.46	0.00	409.45	100.00
3.09	0.49	3.60	29.66	409.45	0.00	477.01	100.00
3.60	0.59	4.19	30.25	477.01	0.00	555.71	100.00
4.19	0.67	4.88	30.92	555.71	0.00	647.41	100.00
4.88	0.72	5.69	31.64	647.41	0.00	754.23	100.00
5.69	0.72	6.63	32.38	754.23	0.00	878.67	100.00



ตารางที่ ก.3 ผลการตรวจวิเคราะห์ขนาดอนุภาคอะลูมินา ด้วย laser particle analyzer ครั้งที่ 3

Sample Details							
Sample ID: AI2O3		Run Number: 9		Measured: 31 Mar 2007 16:04PM			
Sample File: CHULA3		Record Number: 2112		Analysed: 31 Mar 2007 16:05PM			
Sample Path: C:\SIZERS\DATA\				Result Source: Analysed			
Sample Notes: Wat analysis system Dispersing Medium : Water							

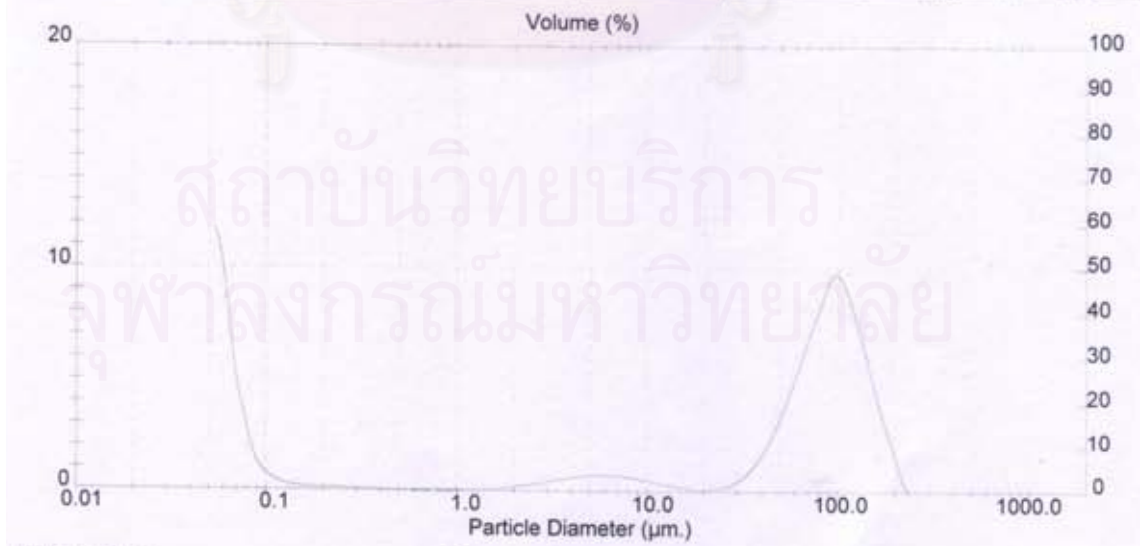
System Details			
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS17	Obscuration: 4.9 %
Presentation: 3QHD	[Particle R.I. = ( 1.7290, 0.1000);	Dispersant R.I. = 1.3300]	Residual: 1.161 %
Analysis Model: Polydisperse	Modifications: None		

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.0033 %Vol	Density = 1.000 g / cub. cm	Specific S.A. = 26.8442 sq. m / g
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 0.06 um	D (v, 0.5) = 66.12 um	D (v, 0.9) = 137.76 um
D [4. 3] = 63.37 um	D [3. 2] = 0.22 um	Span = 2.083E+00	Uniformity = 7.225E-01

Size_Low (um)	In %	Size_High (um)	Under%	Size_Low (um)	In %	Size_High (um)	Under%
0.05	11.66	0.06	11.66	6.63	0.69	7.72	33.62
0.06	8.44	0.07	20.11	7.72	0.61	9.00	34.23
0.07	4.12	0.08	24.23	9.00	0.51	10.48	34.74
0.08	1.79	0.09	26.02	10.48	0.39	12.21	35.13
0.09	0.80	0.11	26.82	12.21	0.28	14.22	35.41
0.11	0.41	0.13	27.23	14.22	0.18	16.57	35.59
0.13	0.24	0.15	27.47	16.57	0.06	19.31	35.65
0.15	0.17	0.17	27.64	19.31	0.07	22.49	35.72
0.17	0.14	0.20	27.78	22.49	0.15	26.20	35.86
0.20	0.12	0.23	27.90	26.20	0.34	30.53	36.21
0.23	0.11	0.27	28.01	30.53	0.73	35.56	36.94
0.27	0.10	0.31	28.11	35.56	1.39	41.43	38.32
0.31	0.08	0.36	28.19	41.43	2.37	48.27	40.69
0.36	0.06	0.42	28.25	48.27	3.68	56.23	44.37
0.42	0.05	0.49	28.30	56.23	5.25	65.51	49.62
0.49	0.04	0.58	28.34	65.51	6.91	76.32	56.53
0.58	0.03	0.67	28.37	76.32	8.47	88.91	65.00
0.67	0.02	0.78	28.39	88.91	9.72	103.58	74.72
0.78	0.02	0.91	28.42	103.58	8.96	120.67	83.68
0.91	0.03	1.06	28.45	120.67	7.15	140.58	90.83
1.06	0.04	1.24	28.49	140.58	4.99	163.77	95.83
1.24	0.06	1.44	28.55	163.77	2.98	190.80	98.81
1.44	0.09	1.68	28.64	190.80	1.19	222.28	100.00
1.68	0.14	1.95	28.79	222.28	0.00	258.95	100.00
1.95	0.21	2.28	29.00	258.95	0.00	301.68	100.00
2.28	0.29	2.65	29.29	301.68	0.00	351.46	100.00
2.65	0.39	3.09	29.69	351.46	0.00	409.45	100.00
3.09	0.50	3.60	30.19	409.45	0.00	477.01	100.00
3.60	0.60	4.19	30.78	477.01	0.00	555.71	100.00
4.19	0.68	4.88	31.47	555.71	0.00	647.41	100.00
4.88	0.73	5.69	32.20	647.41	0.00	754.23	100.00
5.69	0.73	6.63	32.93	754.23	0.00	878.67	100.00



## ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข.1 Reference pattern: NiAl<sub>3</sub>

02-0416						Wavelength= 1.54184	i
Al3Ni						2 $\theta$	h k l
Aluminum Nickel						22.112	40 0 1 1
						22.861	70 1 0 1
						24.185	50 0 2 0
						25.900	100 1 1 1
						29.690	60 2 1 0
Rad.. CoKa $\lambda$ . 1.790    Filter.    Beta    d-sp. 19.0						33.055	3 2 0 1
Cut off.    Int. Film    I/cor..						35.194	30 2 1 1
Ref. Bradley, Taylor, Philos. Mag., 23, 1049 (1937)						36.526	40 2 2 0
						37.473	20 0 0 2
						39.890	5 1 0 2
						41.419	70 0 3 1
Sys.. Orthorhombic    S.G.. Fmma (62)						41.821	80 1 1 2
a. 6.598    b. 7.352    c. 4.802    A. 0.8974    C. 0.6532						43.731	100 1 3 1
$\alpha$ . $\beta$ . $\gamma$ .    Z. 4    mp.						45.107	40 0 2 2
Ref. Ibid.						45.345	90 3 0 1
						46.075	70 2 3 0
						47.096	100 3 1 1
						48.418	30 2 1 2
Dx. 3.982    Dm.    SS/FOM. F <sub>20</sub> = 15(0.056 . 25)						49.540	30 0 4 0
						51.956	20 3 2 1

C Fe3 type. PSC. oP16. Nwt. 139.64. Volume[CD]. 232.94.



2001 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved  
PCPDFWIN v. 2.2

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.2 Reference pattern: Ni<sub>2</sub>Al<sub>3</sub>

03-1062						Wavelength= 1.54184				
Ni <sub>2</sub> Al <sub>3</sub>						2θ	Int	h	k	l
Nickel Aluminum						18.104	20	0	0	1
						25.449	27	1	0	0
						31.388	20	1	0	1
						45.107	100	1	1	0
						48.972	12	1	1	1
Rad.	Nokal	λ. 0.709	Filter. ZrO <sub>2</sub>	Beta	d-sp.	52.275	4	2	0	0
Cut off.	Int.			1/cor.		55.709	4	2	0	1
Ref. Dow Chemical Co., Midland, MI, USA, Private Communication						62.784	5	1	0	3
						65.763	17	2	0	2
						71.469	2	2	1	0
						74.749	3	1	1	3
Sys.. Hexagonal						78.381	1	0	0	4
S.G.. F $\bar{3}$ m1 (164)						80.757	3	2	0	3
a. 4.03	b.	c. 4.89	A.	C. 1.2134		83.301	20	2	1	2
α.	β.	γ.	Z. [1]	mp.		86.036	2	3	0	1
Ref. Ibid.						94.481	4	3	0	2
						96.915	3	2	1	3
						99.510	4	2	2	0
						117.449	5	3	1	2
Dx. 4.789						131.060	1	3	0	4
Dm.						138.645	1	4	0	2
							4	4	1	0

Al<sub>3</sub> Ni<sub>2</sub> type. PSC. hP5. Delete. see Weissmann March 1954. M=1. 198.34. Volume[CD]. 68.78.

 2001 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved  
PCPDFWIN v. 2.2

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๗.3 Reference pattern:  $\text{AlCr}_2$

29-0016		Wavelength= 1.54184				C
<b>AlCr<sub>2</sub></b>		<b>2<math>\theta</math></b>	<b>Int</b>	<b>h</b>	<b>k</b>	<b>l</b>
<b>Aluminum Chromium</b>		20.569	26	0	0	2
		31.558	6	1	0	1
		42.606	56	1	1	0
		43.554	100	1	0	3
		47.756	7	1	1	2
		61.831	14	2	0	0
		61.967	13	1	0	5
		64.762	5	0	0	6
		65.899	2	2	0	2
		78.658	20	2	1	3
		80.650	8	1	1	6
		84.991	1	1	0	7
		95.825	5	2	0	6
		108.652	4	3	1	0
		109.348	4	3	0	3
Rad.: CuK $\alpha$ $\lambda$ : 1.54056 Filter: d-sp. Calculated						
Cut off: Int.: Calculated I/Corr.:						
Ref. Technisch Physische Dienst, Delft, The Netherlands, ICDD Grant-in-Aid, (1975)						
Sys.: Tetragonal		S.G.: P4/mmm (123)				
a. 3.001	b.	c. 8.637	A.	C. 2.8780		
$\alpha$ .	$\beta$ .	$\gamma$ .	Z. 2	mp.		
Ref. Koster et al., Z. Metallkd., 54, 393 (1963)						
Dx. 5.592		Dm.		SS/POM. F <sub>15</sub> = 144(.0020 . 52)		

Peak height intensity. PSC. 1P6. To replace 2-1239. Unit cell reference. Koster et al., Z. Metallkd., 54, 393 (1963). Mwt. 130.97. Volume[CD]. 77.78.



2001 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved  
PCPDFWIN v. 2.2

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๗.4 Reference pattern: Al

85-1327		Wavelength= 1.54184				C
Al		2 $\theta$	Int	h	k	l
Aluminum		38.507	999*	1	1	1
		44.761	455	2	0	0
		65.159	233	2	2	0
Aluminum		78.309	228	3	1	1
		82.522	63	2	2	2
Rad.: CuK $\alpha$ $\lambda$ : 1.54060 Filter: d-sp. Calculated						
Cut off: 17.7 Int.: Calculated I/cor.: 4.10						
Ref. Calculated from ICSD using POWD-12++, (1997)						
Ref. Swanson, H.E., Talge, E., Natl. Bur. Stand. (U.S.), Circ. 539, 359, 1 (1953)						
Sys.: Cubic S.G.: Fm $\bar{3}m$ (225)						
a. 4.0494	b.	c.	A.	C.		
$\alpha$ .	$\beta$ .	$\gamma$ .	Z. 4	imp.		
Ref. Ibid.						
Dx. 2.699	Dm. 2.698	ICSD # . 064700				
Peak height intensity. Cu type. PSC. cF4. See PDF 4-787. No R value given. At least one IF missing. Structural reference. Swanson, H.E., Talge, E., Natl. Bur. Stand. (U.S.), Circ. 539, 359, 1 (1953). Natl. 26.98. Volume[C]. 65.40.						



2001 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved  
PCPDFWIN v. 2.2

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ๗.5 Reference pattern: Ni

88-2326		Wavelength= 1.54184				C
Ni		2 $\theta$	Int	h	k	l
Nickel		45.540	999*	1	1	1
		53.091	412	2	0	0
		78.40	157	2	2	0
<hr/>						
Rad.	CuK $\alpha$	$\lambda$ . 1.54060	Filter.	d-sp. Calculated		
Cut off.	17.7	Int.	Calculated	I/cor.. 7.34		
Ref. Calculated from ICSD using POWD-12++						
Ref. Haglund, J et al., Phys. Rev. B. Condens. Matter, 48, 11685 (1993)						
<hr/>						
Sys..	Cubic	S.G.. Fm $\bar{3}$ m (225)				
a.	3.45	b.		c.	A.	C.
$\alpha$ .		$\beta$ .		$\gamma$ .	Z. 4	imp.
Ref. Ibid.						
<hr/>						
Dx.	9.495	Dm.	8.900	ICSD # . 041508		
<hr/>						
Peak height intensity. PSC. cF4. Calc. density unusual but tolerable. No R value given. At least one TF missing. Structural reference. Haglund, J et al., Phys. Rev. B. Condens. Matter, 48, 11685 (1993) Mwt. 58.70. Volume[CB]. 41.06.						



2001 JCPDS -International Centre for Diffraction Data. All rights reserved  
PCPDFWIN v. 2.2

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ค

ตารางที่ ค.1 ค่าความหนาของชั้นเคลือบส่วนที่ 1 ในชิ้นงานนิกเกิล

เวลา (hr.)	2.25		4	
	อัตราส่วน Al:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 10:0	อัตราส่วน 7:3	อัตราส่วน 10:0	อัตราส่วน 7:3
ครั้งที่	ความหนา ( $\mu\text{m}$ )	ความหนา ( $\mu\text{m}$ )	ความหนา ( $\mu\text{m}$ )	ความหนา ( $\mu\text{m}$ )
1	497.47	335.44	501.27	422.66
2	488.61	367.90	487.34	430.39
3	351.90	340.51	507.60	425.32
4	497.48	346.80	518.99	434.27
5	450.63	336.71	578.48	449.77
6	368.36	326.58	520.52	443.63
7	394.94	336.71	540.51	423.80
8	358.23	360.76	564.56	425.40
9	508.86	348.10	508.86	427.60
10	393.67	362.03	577.00	418.99
11	427.85	354.43	501.27	403.80
12	437.98	340.51	540.00	422.27
13	367.09	369.37	554.56	410.13
14	354.43	362.49	407.63	456.00
15	365.83	320.25	499.32	434.80
ค่าเฉลี่ย	417.56	347.24	520.53	428.59
ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	58.75	15.14	42.90	13.80

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว นันทิยา ลิ้มป้วนัสพงษ์ เกิดวันพุธที่ 4 สิงหาคม พ.ศ. 2525 ที่จังหวัดตรัง เข้าศึกษาที่ปริญญาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และได้เข้าศึกษาต่อหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2547



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย