

ผลของอุณหภูมิและเวลาต่อความหนาและโครงสร้างชั้นเคลือบในกระบวนการ Pack-Aluminizing  
ของโลหะผสมพิเศษนิกเกิลชนิด IN 738 และ GTD 111



นางสาว สิริินญา จันท์ศักดิ์สูง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

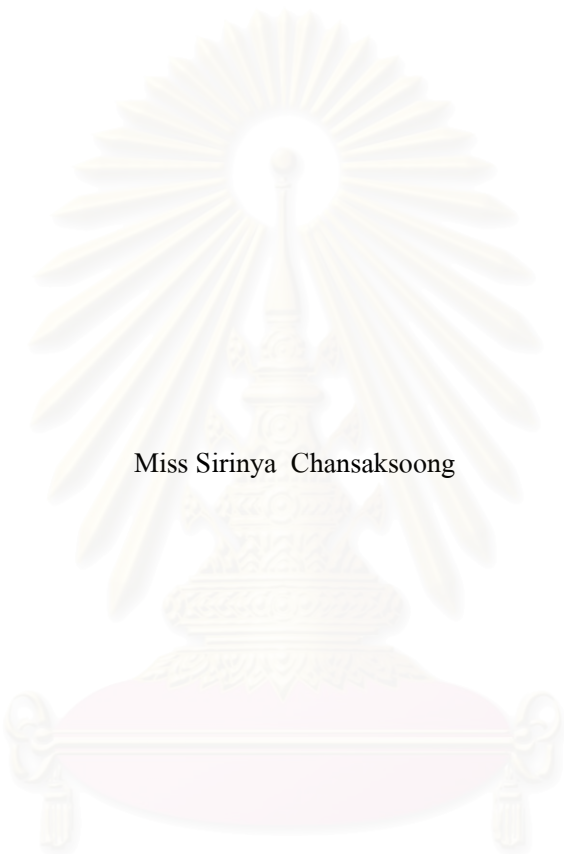
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF TEMPERATURE AND TIME ON FILM THICKNESS AND STRUCTURE OF  
PACK-ALUMINIZING OF NICKEL BASE SUPERALLOY GRADE IN 738 AND GTD 111



Miss Sirinya Chansaksoong

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

ผลของอุณหภูมิและเวลาต่อความหนาและ โครงสร้างชั้นเคลือบใน  
กระบวนการ Pack-Aluminizing ของโลหะผสมพิเศษนิกเกิล  
ชนิด IN 738 และ GTD 111

โดย

นางสาวสิรินญา จันทร์ศักดิ์สูง

สาขาวิชา

วิศวกรรมโลหการ

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ ดร.ปฐมมา วิสุทธิพิทักษ์กุล

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

อาจารย์ ดร.ปัญญาวัชร วัชยาว

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

.....  
(อาจารย์ ดร.ปฐมมา วิสุทธิพิทักษ์กุล)

.....  
(อาจารย์ ดร.ปัญญาวัชร วัชยาว)

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

สิรินญา จันทร์ศักดิ์สูง : ผลของอุณหภูมิและเวลาต่อความหนาและโครงสร้างชั้นเคลือบในกระบวนการ Pack-Aluminizing ของโลหะผสมพิเศษนิกเกิลชนิด IN 738 และ GTD 111 (EFFECTS OF TEMPERATURE AND TIME ON FILM THICKNESS AND STRUCTURE OF PACK-ALUMINIZING OF NICKEL BASE SUPERALLOY GRADE IN 738 AND GTD 111)  
 อ.ที่ปรึกษา อ.ดร.ปฐม วิสุทธิพิทักษ์กุล และ อ.ที่ปรึกษาร่วม อ.ดร.ปัญญาวัชร วัชยาว : 131 หน้า

กระบวนการทำ Aluminizing เป็นวิธีอย่างง่ายที่นิยมใช้ในการปรับปรุงความต้านทานการเกิดออกซิเดชันของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล ซึ่งในการศึกษาวิทยานิพนธ์นี้จะทำการศึกษาผลของการทำ Aluminizing ด้วยวิธี Pack-Aluminizing ของโลหะผสมพิเศษนิกเกิลชนิด IN 738 และ GTD 111 ที่อุณหภูมิ 800, 900 และ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง ที่มีต่อโครงสร้างและความหนาของชั้นเคลือบ และทำการศึกษาผลของการทำอบอ่อนของโลหะผสมพิเศษนิกเกิลชนิด IN 738 และ GTD 111 ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6, 10, 14 และ 20 ชั่วโมง ที่มีต่อโครงสร้างและความหนาของชั้นเคลือบ ตรวจสอบความต้านทานการเกิดออกซิเดชันของชั้นเคลือบที่เกิดจากกระบวนการต่างๆ ตรวจสอบความหนาชั้นเคลือบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงและกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด วิเคราะห์ชั้นเคลือบด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน

พบว่าชั้นเคลือบจะประกอบไปด้วยเฟส  $Ni_2Al_3$  และ  $NiAl$ , ขณะที่ความหนาชั้นเคลือบจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบ โดยค่าความหนายกกำลังสองจะมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับเวลาในการเคลือบ และชั้นเคลือบภายหลังการทำอบอ่อนจะเปลี่ยนแปลงเป็นเฟส  $NiAl$  ความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชันของชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวดีขึ้น



ภาควิชา.....วิศวกรรมโลหการ..... ลายมือชื่อนิสิต..... สิรินญา จันทร์ศักดิ์สูง  
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมโลหการ..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... อ.ดร.ปฐม วิสุทธิพิทักษ์กุล  
 ปีการศึกษา..... 2550..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม..... อ.ดร.ปัญญาวัชร วัชยาว

## 4870519821 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEY WORD: ALUMINIZING/ NICKEL BASE SUPERALLOY/ INCONEL 738/ GTD 111

SIRINYA CHANSAKSOONG: EFFECTS OF TEMPERATURE AND TIME ON FILM THICKNESS AND STRUCTURE OF PACK-ALUMINIZING OF NICKEL BASE SUPERALLOY GRADE IN 738 AND GTD 111. THESIS ADVISOR: PATAMA VISUTIPITUKUL, Ph.D. AND THESIS CO-ADVISOR: PANYAWAT WANGYAO, Ph.D. 131 pp.

Aluminizing process is a simple method to improve oxidation resistance of cast nickel base superalloys. In the present study, nickel base superalloys grade IN 738 and GTD 111 were surface coated by aluminide compounds, using pack aluminizing process at the temperature of 800 °C, 900 °C and 1000 °C for 1 to 6.25 hours. In addition, annealing process to homogenize coating surface was subsequently carried out at 1000 °C for 6, 10, 14 and 20 hours. The microstructure and thickness of coating layer was analyzed by x-ray diffractometer.

It was found that the coating layer consists of Ni<sub>2</sub>Al<sub>3</sub> and NiAl<sub>3</sub> compounds. The thickness of coating layer increases with aluminizing time and temperature. The square of thickness values increased linearly with soaking time. After annealing, the Ni<sub>2</sub>Al<sub>3</sub> compound transformed to NiAl compound. This results in a better oxidation resistance of nickel base superalloys grade IN 738 and GTD 111.



Department:.....Metallurgical Engineering. Student's Signature :.....Siri.nya.....Chansaksoong.  
Field of Study:..Metallurgical Engineering.. Advisor's Signature:.....Patama.v.  
Academic Year: .....2007..... Co-Advisor's Signature:.....Panyawat

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากความช่วยเหลือจากหลายๆฝ่าย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร. ปฐมา วิสุทธิพิทักษ์กุล ที่ได้กรุณาให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำแนวทางที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัยนี้ ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม อาจารย์ ดร.ปัญญาวัชร วัชยาว ที่ได้กรุณาให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย รองศาสตราจารย์ ดร.กอบบุญ หล่อทองคำ ที่ให้ความรู้ คำแนะนำและข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย ขอขอบพระคุณคณาจารย์ตลอดจนเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่านที่ให้การสนับสนุนผู้วิจัยในทุกด้านด้วยดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ ขอขอบพระคุณศูนย์วิจัยเครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือทดสอบตลอดมาจนเสร็จสิ้นงานวิจัยด้วยดี

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา และ ญาติ ของข้าพเจ้า ที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้กับข้าพเจ้าตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา ขอกราบขอบพระคุณคุณครูและอาจารย์ทุกท่านที่อบรมสั่งสอนข้าพเจ้ามาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน และขอขอบคุณพี่ เพื่อน และน้องนิสิตทุกท่าน โดยเฉพาะกลุ่มวิจัยทางด้านวิศวกรรมพื้นผิว ที่ให้คำแนะนำ ช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจให้กับผู้วิจัยด้วยดีเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง .....	ฎ
สารบัญภาพ .....	ฐ
บทที่	
1 บทนำ .....	1
1.1 ความสำคัญของงานวิจัย .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ .....	1
1.3 ขอบเขตการศึกษา .....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	2
2 ปรีทรีตเมนต์ .....	3
2.1 โลหะผสมพิเศษ (Superalloys).....	3
2.2 คุณสมบัติโดยทั่วไปของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล.....	4
2.2.1 โครงสร้างจุลภาคและเฟสในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล.....	4
2.2.2 คุณสมบัติเชิงกลโดยทั่วไปของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล.....	6
2.3 โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล ชนิด Inconel 738.....	7
2.4 โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล ชนิด GTD 111.....	8
2.5 คุณสมบัติของ NiAl.....	9
2.6 กระบวนการเคลือบผิว.....	11
2.6.1 Overlay coating processes.....	12
2.6.2 Diffusion coating processes.....	12
2.7 กลไกของขั้นตอนการทำ Aluminizing.....	14
2.7.1. Low Aluminium contents.....	14
2.7.2. High Aluminium contents.....	14

บทที่	หน้า
2.8 การทำอบอ่อน (Heat treat) ภายหลังกการทำ Aluminizing.....	16
2.9 ความต้านทานการเกิดออกซิเดชัน หลังการทำ Pack Cementation.....	17
3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการทดลอง.....	19
3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	19
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง.....	19
3.3 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน.....	19
3.4 ขั้นตอนการเคลือบผิว.....	20
3.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์ชิ้นงาน.....	21
3.6 ขั้นตอนการทดสอบการกัดกร่อนแบบออกซิเดชัน.....	22
4 ผลการทดลอง.....	23
4.1 ผลการวิเคราะห์รูปร่างและลักษณะพื้นผิวของชิ้นเคลือบก่อนทำการอบอ่อน.....	23
4.1.1 ผลของอุณหภูมิต่อรูปร่างและลักษณะพื้นผิวชั้นเคลือบ.....	23
4.1.2 ผลของเวลาต่อรูปร่างและลักษณะพื้นผิวชั้นเคลือบ.....	25
4.2 ผลการตรวจสอบเชิงคุณภาพโดย XRD ของชั้นเคลือบก่อนทำการอบอ่อน.....	26
4.2.1 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบบนโลหะผสมพิเศษเนื้อฟีนิกิลชนิด IN 738.....	26
4.2.2 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบบนโลหะผสมพิเศษเนื้อฟีนิกิลชนิด GTD 111...	29
4.3 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวางของชั้นเคลือบก่อนทำการอบอ่อน.....	30
4.3.1 โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบบนโลหะผสมพิเศษเนื้อฟีนิกิลชนิด IN 738...30	
4.3.2 โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบบนโลหะผสมพิเศษเนื้อฟีนิกิลชนิด GTD 111...37	
4.4 ผลการตรวจสอบความหนาชั้นเคลือบก่อนทำการอบอ่อน.....	38
4.4.1 ความหนาชั้นเคลือบบนโลหะผสมพิเศษเนื้อฟีนิกิลชนิด IN 738.....	38
4.4.2 ความหนาชั้นเคลือบบนโลหะผสมพิเศษเนื้อฟีนิกิลชนิด GTD 111.....	43
4.5 ผลการตรวจสอบเชิงคุณภาพของชั้นเคลือบภายหลังกการทำอบอ่อน.....	45
4.5.1 ผลการตรวจสอบโดย XRD.....	45
4.5.1.1 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบบนโลหะผสมพิเศษเนื้อฟีนิกิลชนิด IN 738.....	45



บทที่	หน้า
4.5.1.2 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบบน โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล ชนิด GTD 111.....	45
4.5.2 ผลการตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวางของชั้นเคลือบ ภายหลังทำการอบอ่อน.....	48
4.5.2.1 โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบบน โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล ชนิด Inconel 738.....	48
4.5.2.2 โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบบน โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล ชนิด GTD 111.....	50
4.6 ผลการตรวจสอบความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชัน.....	52
4.6.1 ผลการตรวจสอบน้ำหนัก.....	52
4.6.1.1 ผลการตรวจสอบน้ำหนักของ โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล ชนิด IN 738.....	52
4.6.1.2 ผลการตรวจสอบน้ำหนักของ โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล ชนิด GTD 111.....	53
4.6.2 ผลการตรวจสอบน้ำหนัก.....	54
4.6.2.1 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบภายหลังการทำการทดสอบออกซิเดชัน ของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลชนิด IN 738.....	54
4.6.2.2 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบภายหลังการทำการทดสอบออกซิเดชัน ของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลชนิด GTD 111.....	55
5 สรุปผลการทดลอง.....	57
รายการอ้างอิง .....	59
ภาคผนวก.....	60
ภาคผนวก ก.....	61
ภาคผนวก ข.....	66
ภาคผนวก ค.....	67

บทที่	หน้า
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	75



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติเชิงกล โดยทั่วไปของโลหะผสมพิเศษเนื้อฟีนิกเกิด.....	6
2.2 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมพิเศษเนื้อฟีนิกเกิดชนิด IN 738.....	8
2.3 ผลของธาตุผสมต่างๆ ต่อสมบัติของโลหะผสมพิเศษเนื้อฟีนิกเกิดชนิด IN 738.....	8
2.4 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมพิเศษเนื้อฟีนิกเกิดชนิด GTD 111.....	9
2.5 ผลของธาตุผสมต่างๆ ต่อสมบัติของโลหะผสมพิเศษเนื้อฟีนิกเกิดชนิด GTD 111.....	9
2.6 สารประกอบเชิงโลหะชนิดต่างๆ ระหว่างนิกเกิลและอะลูมิเนียม.....	10
3.1 อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเผาด้วยเตาท่อ.....	21
3.2 อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบเป็นเนื้อเดียว.....	21
4.1 ความหนาชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบน IN 738 ที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง.....	38
4.2 ความหนาชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบน IN 738 ที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง.....	39
4.3 ความหนาชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบน IN 738 ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 1, 2.25 และ 4 ชั่วโมง.....	40
4.4 ความหนาชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบน GTD 111 ที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง.....	44
ก.1 ความหนาชั้นเคลือบโลหะผสมพิเศษเนื้อฟีนิกเกิดชนิด IN 738 ที่ผ่านการเคลือบผิว ด้วยวิธี Pack-Aluminizing ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง (หน่วยเป็นไมครอน) .....	61
ก.2 ความหนาชั้นเคลือบโลหะผสมพิเศษเนื้อฟีนิกเกิดชนิด IN 738 ที่ผ่านการเคลือบผิว ด้วยวิธี Pack-Aluminizing ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง (หน่วยเป็นไมครอน) .....	62
ก.3 ความหนาชั้นเคลือบโลหะผสมพิเศษเนื้อฟีนิกเกิดชนิด IN 738 ที่ผ่านการเคลือบผิว ด้วยวิธี Pack-Aluminizing ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25 และ 4 ชั่วโมง (หน่วยเป็น ไมครอน) .....	63
ก.4 ความหนาชั้นเคลือบโลหะผสมพิเศษเนื้อฟีนิกเกิดชนิด GTD 111 ที่ผ่านการเคลือบผิว ด้วยวิธี Pack-Aluminizing ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง (หน่วยเป็นไมครอน) .....	64

ตารางที่

ก.5 อัตราส่วนน้ำหนักต่อพื้นที่ผิวเมื่อทำการทดสอบออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลาต่างๆ ของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิลชนิด IN 738 และ GTD 111 ที่ผ่านไม่ทำการเคลือบผิว, เคลือบผิวที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และ เคลือบผิวที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วนำไปอบเป็นเนื้อเดียว ที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง (หน่วยเป็นกรัมต่อตารางเซนติเมตร).....	65
ค.1 Reference pattern: Nickel Aluminum (Ni <sub>2</sub> Al <sub>3</sub> ) .....	67
ค.2 Reference pattern: Nickel Aluminum (NiAl <sub>3</sub> ) .....	68
ค.3 Reference pattern: Nickel Aluminum (NiAl) .....	69
ค.4 Reference pattern: Chromium Oxide (Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) .....	70
ค.5 Reference pattern: Nickel Oxide (Ni <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) .....	71
ค.6 Reference pattern: Nickel Oxide (NiO <sub>2</sub> ) .....	72
ค.7 Reference pattern: Nickel Oxide (NiO) .....	73
ค.8 Reference pattern: Aluminum Oxide (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) .....	74

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิต่อความต้านทานการเกิดออกซิเดชัน ของ Alloy ชนิดต่างๆ.....	3
2.2 อนุภาค Gamma Prime ขนาดต่างๆของ โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล ชนิด IN 738.....	5
2.3 ลักษณะคาร์ไบด์ของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล.....	6
2.4 ชนิดของ Nickel base superalloy ที่ใช้เป็นส่วนประกอบของ Turbine Rotating Part.....	7
2.5 แผนภูมิสมดุลของนิกเกิลและอะลูมิเนียม.....	10
2.6 โครงสร้างผลึกแบบ B2 ของ NiAl.....	11
2.7 ขั้นตอนการทำ Aluminizing ของกระบวนการเคลือบผิวแบบ.....	12
2.8 ขั้นตอนการทำ Heat Treat ของกระบวนการเคลือบผิวแบบ Pack Cementation.....	12
2.9 บริเวณที่เกิดขึ้นจากการเคลือบผิวด้วยกระบวนการ Pack Cementation.....	14
2.10 แสดงโครงสร้างที่เกิดจาก ก.) Inward diffusion ข.) outward diffusion.....	15
2.11 พื้นผิวที่ดูด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบกวาดของ โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล ที่เวลา 5 ชั่วโมง.....	15
2.12 ปริมาณของอะลูมิเนียมและนิกเกิล ที่ตำแหน่งต่างๆ ของชั้นเคลือบ.....	16
2.13 แสดงโครงสร้างของ Nickel foam ที่ผ่านการอบ ที่เวลา ก.) 0 ชั่วโมง ข.) 8 ชั่วโมง ค.) 24 ชั่วโมง.....	17
2.14 การเกิดออกซิเดชันของ cast alloy และ alloy ที่ผ่านการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C.....	18
2.15 ผล XRD ของ cast alloy และ alloy ที่ผ่านการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C.....	18
3.1 ลักษณะการพันลวดสเตนเลสรอบด้วยอะลูมินา.....	20
4.1 ชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบน IN 738 ที่ ก.)800 ข.)900 และ ค.)1000°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง.....	23
4.2 ภาพถ่ายชิ้นงานที่ผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบน IN 738 ที่ ก.)800 ข.)900 และ ค.)1000°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยกล้อง SEM.....	24
4.3 ภาพถ่ายชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบน IN 738 ที่ 900°C เป็นเวลา ก.)1 และ ข.) 6.25 ชั่วโมง.....	25
4.4 ภาพถ่ายชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบน GTD 111 ที่ 900°C เป็นเวลา ก.)1 และ ข.) 6.25 ชั่วโมง.....	25

ภาพที่	หน้า
4.5 ผลการเปรียบเทียบการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในซีงบน IN 738 ที่ 800°C เป็นเวลา 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง ด้วยวิธี GIXD.....	26
4.6 ผลการเปรียบเทียบการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในซีงบน IN 738 ที่ 900°C เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง ด้วยวิธี GIXD.....	27
4.7 ผลการเปรียบเทียบการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในซีงบน IN 738 ที่ 1000°C เป็นเวลา 1, 2.25 และ 4 ชั่วโมง ด้วยวิธี GIXD.....	27
4.8 แผนภูมิสมมูลของนิกเกิลและอะลูมิเนียม.....	28
4.9 ผลการเปรียบเทียบการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในซีงบน GTD 111 ที่ 900°C เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6 ชั่วโมง ด้วยวิธี GIXD .....	29
4.10 ภาพถ่ายโครงสร้างบริเวณกลางชิ้นงาน โลหะผสมพิเศษเนื้อพ่นนิกเกิลชนิด IN 738 ที่ทำการเคลือบผิวที่ 800°C เป็นเวลา ก.) 1 ข.) 2.25 ค.) 4 และ ง.) 6.25 ชั่วโมง.....	30
4.11 ภาพถ่ายโครงสร้างบริเวณกลางชิ้นงาน โลหะผสมพิเศษเนื้อพ่นนิกเกิลชนิด IN 738 ที่ทำการเคลือบผิวที่ 900°C เป็นเวลา ก.) 1 ข.) 2.25 ค.) 4 และ ง.) 6.25 ชั่วโมง.....	31
4.12 ภาพถ่ายโครงสร้างบริเวณกลางชิ้นงาน โลหะผสมพิเศษเนื้อพ่นนิกเกิลชนิด IN 738 ที่ทำการเคลือบผิวที่ 1000°C เป็นเวลา ก.) 1 ข.) 2.25 และ ค.) 4 ชั่วโมง.....	32
4.13 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานชนิด IN 738 ที่ทำการเคลือบผิวที่ 1000°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยวิธี Mapping EDS ก.) Secondary electron, ข.) นิกเกิล, ค.) โครเมียม, ง.) อะลูมิเนียม.....	33
4.14 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในซีงบน โลหะนิกเกิลชนิด IN 738 ที่ 1000°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยวิธี EDS แบบ Linescan.....	34
4.15 ภาพถ่ายโครงสร้างบริเวณขอบชิ้นงาน โลหะผสมพิเศษเนื้อพ่นนิกเกิลชนิด IN 738 ที่ทำการเคลือบผิวที่ 800°C เป็นเวลา 2.25 ชั่วโมง.....	35
4.16 ภาพแสดงทิศทางการแพร่ของอะลูมิเนียมเข้าสู่ชิ้นงาน.....	35
4.17 ภาพถ่ายโครงสร้างบริเวณขอบชิ้นงาน โลหะผสมพิเศษเนื้อพ่นนิกเกิลชนิด IN 738 ที่ทำการเคลือบผิวที่ 900°C เป็นเวลา 2.25 ชั่วโมง.....	36
4.18 ภาพถ่ายโครงสร้างบริเวณขอบชิ้นงาน โลหะผสมพิเศษเนื้อพ่นนิกเกิลชนิด IN 738 ที่ทำการเคลือบผิวที่ 1000°C เป็นเวลา 2.25 ชั่วโมง.....	36
4.19 ภาพถ่ายโครงสร้างบริเวณกลางชิ้นงาน โลหะผสมพิเศษเนื้อพ่นนิกเกิลชนิด GTD 111 ที่ทำการเคลือบผิวที่ 900°C เป็นเวลา ก.) 1 ข.) 2.25 ค.) 4 และ ง.) 6.25 ชั่วโมง .....	37

ภาพที่	หน้า
4.20 ภาพถ่ายโครงสร้างบริเวณขอบชิ้นงาน โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลชนิด GTD 111 ที่ทำการเคลือบผิวที่ 900°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง.....	37
4.21 กราฟแสดงความหนาชั้นเคลือบต่อเวลาของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิงบน IN 738 ที่อุณหภูมิ 800°C.....	39
4.22 กราฟแสดงความหนาชั้นเคลือบต่อเวลาของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิงบน IN 738 ที่อุณหภูมิ 900°C.....	40
4.23 กราฟแสดงความหนาชั้นเคลือบต่อเวลาของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิงบน IN 738 ที่อุณหภูมิ 1000°C.....	41
4.24 กราฟแท่งแสดงความหนาชั้นเคลือบต่ออุณหภูมิในการทำการเคลือบผิวของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลชนิด IN 738.....	42
4.25 กราฟแสดงความหนาชั้นเคลือบต่อเวลาของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิงบน GTD 111 ที่อุณหภูมิ 900°C.....	44
4.26 ผลการเปรียบเทียบการตรวจสอบชั้นเคลือบหลังทำการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1000°C ที่เวลา 0, 6, 10, 14 และ 20 ชั่วโมง ของชิ้นงานที่ผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิงบน IN 738 ที่ 900°C เวลา 4 ชั่วโมง ด้วยวิธี GIXD.....	46
4.27 ผลการเปรียบเทียบการตรวจสอบชั้นเคลือบหลังทำการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1000°C ที่เวลา 0, 6 และ 10 ชั่วโมง ของชิ้นงานที่ผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิงบน GTD 111 ที่ 900°C เวลา 4 ชั่วโมง ด้วยวิธี GIXD.....	47
4.28 ภาพถ่ายโครงสร้างโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลชนิด IN 738 ที่เคลือบผิว 900°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วทำการอบอ่อนเป็นเวลา ก.) 0 ข.) 6 ค.) 10 ง.) 14 และ จ.) 20 ชั่วโมง.....	49
4.29 ภาพถ่ายโครงสร้างโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลชนิด IN 738 ที่เคลือบผิว 900°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วทำการอบอ่อนเป็นเวลา ก.) 10 และ ข.) 20 ชั่วโมง ด้วยกล้อง SEM.....	50
4.30 ภาพถ่ายโครงสร้างโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลชนิด GTD 111 ที่เคลือบผิว 900°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วทำการอบอ่อนเป็นเวลา ก.) 6 และ ข.) 10 ชั่วโมง.....	51
4.31 ภาพถ่ายโครงสร้างโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลชนิด GTD 111 ที่เคลือบผิว 900°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วทำการอบอ่อนเป็นเวลา ก.) 6 และ ข.) 10 ชั่วโมง ด้วยกล้อง SEM.....	52

ภาพที่	
4.32 การเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1000 °C ของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลชนิด IN 738 และ GTD 111.....	53
4.33 ผลการเปรียบเทียบการตรวจสอบชั้นเคลือบหลังทำการทดสอบออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 15 ชั่วโมง ของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลชนิด IN 738 ด้วยวิธี GIXD.....	55
4.34 ผลการเปรียบเทียบการตรวจสอบชั้นเคลือบหลังทำการทดสอบออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 15 ชั่วโมง ของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลชนิด GTD 111 ด้วยวิธีGIXD.....	56



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1. ความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันได้มีการนำโลหะผสมพิเศษ (Superalloys) มาใช้ที่อุณหภูมิสูงในงานอุตสาหกรรมที่พบเห็นบ่อยครั้ง คือ โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล (Nickel base Superalloys) ซึ่งมักนำมาใช้งานโดยถูกผลิตเป็นส่วนหนึ่งของเครื่องยนต์เครื่องบิน, การผลิตใบพัดของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ, อุปกรณ์ในระบบเตาปฏิกรณ์ปรมาณูและชิ้นส่วนในงานอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เนื่องจากโลหะประเภทนี้มีค่าความแข็งแรงสูงที่อุณหภูมิสูง, มีความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชันและการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูงที่ดี

สำหรับประเทศไทยได้มีการนำโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลมาใช้เป็นส่วนหนึ่งของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ (Gas turbine engine) ในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยนำมาใช้เป็นใบพัดของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ (Gas turbine blades) ซึ่งเป็นการใช้งานอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิสูงในบรรยากาศที่ประกอบด้วยออกซิเจนรวมทั้งก๊าซอื่นๆ ทำให้ใบพัดของเครื่องยนต์กังหันก๊าซเกิดความเสียหายเนื่องจากการกัดกร่อนและการสึกหรอ เป็นผลให้มีอายุการใช้งานที่สั้นลง

เนื่องจากโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลในปัจจุบันมีราคาสูง เมื่ออายุการใช้งานสั้นลงจึงทำให้ค่าใช้จ่ายในการซื้อใหม่หรือแม้กระทั่งการซ่อมแซมและบำรุงรักษาเครื่องยนต์กังหันก๊าซมีจำนวนมาก นอกจากนี้ยังทำให้สิ้นเปลืองเวลาในการดูแลซ่อมแซมรักษา ดังนั้นจึงได้มีการแนวความคิดในการทำการวิจัยเกี่ยวกับการเคลือบผิวด้วยวิธี Pack-Aluminizing โดยทำการศึกษาถึงตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการเคลือบผิว ที่จะส่งผลต่อคุณสมบัติต่างๆ ของพื้นผิวโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล ชนิด IN 738 และชนิด GTD 111 แล้วทำการเปรียบเทียบผลที่ได้ของชั้นเคลือบของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลทั้ง 2 ชนิด

### 1.2. วัตถุประสงค์

1. ศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิในกระบวนการ Pack-Aluminizing ต่อความหนาของชั้นเคลือบและชนิดชั้นสารประกอบที่เกิดขึ้นบนโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 และชนิด GTD 111

2. ศึกษาถึงผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบเป็นเนื้อเดียวต่อชนิดและโครงสร้างของชั้นเคลือบบนโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 และชนิด GTD 111

### 1.3. ขอบเขตของการศึกษา

1. ศึกษาอุณหภูมิในการทำ Pack-Aluminizing ในช่วง 800 ถึง 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ถึง 8 ชั่วโมง ต่อความหนาของชั้นเคลือบและชนิดชั้นสารประกอบที่เกิดขึ้นบนโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล ชนิด IN 738 และชนิด GTD 111

2. ศึกษาอุณหภูมิการอบเป็นเนื้อเดียว ในช่วง 800 ถึง 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0 ถึง 24 ชั่วโมง ต่อชนิดชั้นสารประกอบและโครงสร้างของชั้นเคลือบบนโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล ชนิด IN 738 และชนิด GTD 111

### 1.4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงผลของอุณหภูมิและเวลาในการทำ Pack-Aluminizing ต่อความหนาของชั้นเคลือบและชนิดชั้นสารประกอบที่เกิดขึ้นบนโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล ชนิด IN 738 และชนิด GTD 111

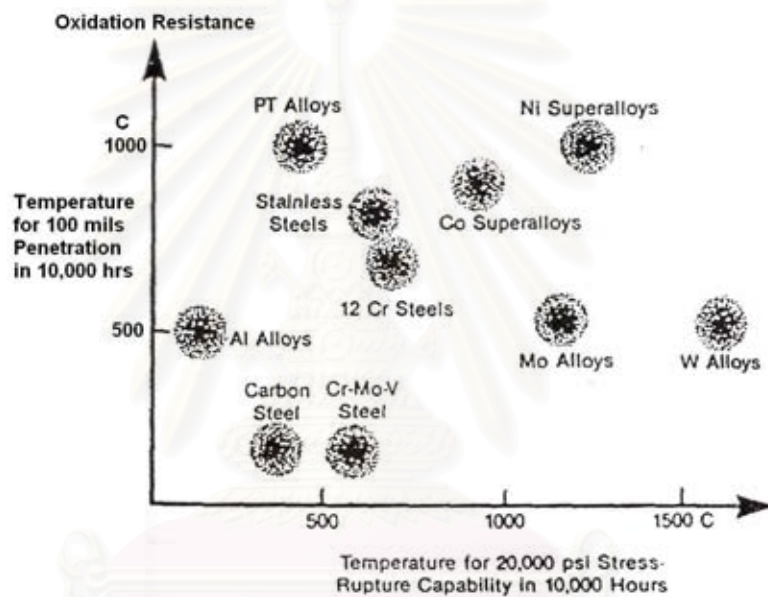
2. ทราบถึงผลของอุณหภูมิและเวลาในการอบเป็นเนื้อเดียว ต่อชนิดและโครงสร้างของชั้นเคลือบบนโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล ชนิด IN 738 และชนิด GTD 111

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2 ปรีทรศน์วรรณกรรม

### 2.1 โลหะผสมพิเศษ (Superalloys)

โลหะผสมพิเศษมีคุณสมบัติที่น่าสนใจคือ มีความแข็งแรงสูงที่อุณหภูมิสูง, สามารถต้านทานการเกิดออกซิเดชันและการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูงที่ดี จึงเป็นสาเหตุให้โลหะผสมพิเศษถูกเลือกเพื่อนำไปใช้งานที่อุณหภูมิสูง [1] ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โลหะผสมพิเศษเนื้อฟีนิกเกิลและโลหะผสมพิเศษเนื้อฟีนโคบอลต์มีความสามารถต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูงได้ดี



รูปที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิต่อความต้านทานการเกิดออกซิเดชันของ Alloy ชนิดต่างๆ [2]

โดยทั่วไปโลหะผสมพิเศษสามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ [3] คือ

กลุ่มที่ 1 Nickel-Iron base Superalloys มีส่วนผสมทางเคมี คือ Ni 25-60 % โดยน้ำหนัก และ Fe 15-60 % โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังมี Ti, Al, Nb, Cr, Mo โลหะผสมพิเศษกลุ่มนี้จะมีราคาสูง เนื่องจาก มีส่วนผสมทางเคมีที่เป็นเหล็กมาเพิ่มแทนนิกเกิล แต่จะใช้งานที่อุณหภูมิไม่สูงมากนัก

กลุ่มที่ 2 Nickel base Superalloys มีส่วนผสมทางเคมี คือ Ni, Cr, Ti, Al, Mo, Co, Nb, Zr, B, Fe เป็นต้น มักนิยมนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องยนต์เครื่องบิน, การผลิตใบพัดของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ, อุปกรณ์ทางนิวเคลียร์และเครื่องมือในงานอุตสาหกรรมปิโตรเคมี โลหะผสมพิเศษกลุ่มนี้จะมีควมต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูงได้ดีมาก

กลุ่มที่ 3 Cobalt base Superalloys มีส่วนผสมทางเคมีหลักๆ คือ Co 50 % โดยน้ำหนัก, Cr 25 % โดยน้ำหนัก และธาตุอื่นๆอีกเล็กน้อย เนื่องจากมีปริมาณ Cr ที่สูง ดังนั้นจึงมีคุณสมบัติในด้านการต้านทานการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูงได้ดีมาก แต่จะมีความแข็งแรงที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ลดต่ำกว่าโลหะผสมพิเศษในกลุ่มที่ 2 โลหะผสมพิเศษกลุ่มนี้เหมาะกับงานประเภท Non-Rotating

## 2.2 คุณสมบัติโดยทั่วไปของโลหะผสมพิเศษเนื้อพินิกเกิด

### 2.2.1 โครงสร้างจุลภาคและเฟสในโลหะผสมพิเศษเนื้อพินิกเกิด [2,4]

โลหะผสมพิเศษเนื้อพินิกเกิด มีโครงสร้างหลัก 3 ประเภท คือ

ประเภทที่ 1 Gamma Matrix ( $\gamma$ ) เป็นเนื้อพินที่มีโครงสร้างแบบ FCC ของโลหะผสมพิเศษเนื้อพินิกเกิด มักจะมี solid-solution elements ผสมอยู่ เช่น Co, Cr, Mo และ W ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ในเครื่องยนต์กังหันก๊าซ เพราะเนื้อพินแกมมาสามารถใช้งานที่อุณหภูมิได้สูงถึง  $0.9T_M$  (melting point) และเวลาใช้งานสูงถึง 100,000 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิต่ำ จึงช่วยลดความเสียหายและมีอายุการใช้งานยาวนาน

ประเภทที่ 2 Gamma Prime ( $\gamma'$ ) เป็นสารประกอบระหว่างโลหะ มีโครงสร้างผลึกเป็น FCC สูตรทางเคมีคือ  $A_3B$  ได้แก่  $Ni_3(Al, Ti)$  และ  $(Ni, Co)_3(Al, Ti)$  เป็นโครงสร้างที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรง ด้วยกลไกการขัดขวางการเคลื่อนที่ของ Dislocation และการเคลื่อนที่ของอนุภาคผ่านระหว่าง gamma และ gamma prime อีกทั้งพบว่าความแข็งแรงของ gamma prime จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น นอกจากนี้ความสามารถในการยืดหยุ่น (Ductility) ของ gamma prime จะช่วยป้องกันการเกิดการแตกหัก (Fracture) ได้

ในส่วนของคุณสมบัติด้านต่างๆก็มีผลเกี่ยวข้องกับ gamma prime เช่นกัน เช่น ความต้านทานการเกิดคืบ (Creep) จะมีค่าลดลงขณะที่ปริมาณ gamma prime มีค่าเพิ่มขึ้น ลักษณะของ gamma prime ในโลหะผสมพิเศษเนื้อพินิกเกิด ชนิด IN 738 แสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.2 แสดงอนุภาค Gamma Prime ขนาดต่างๆของ โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลชนิด  
IN 738 [2]

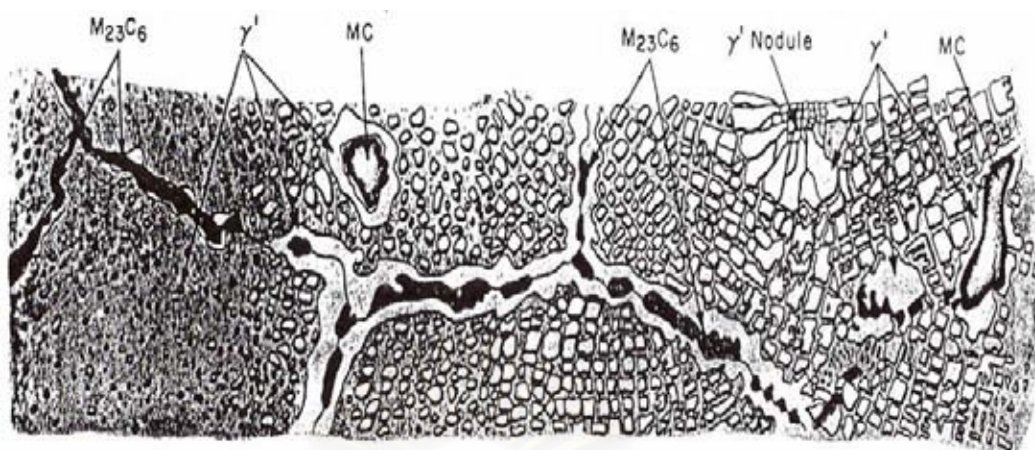
ประเภทที่ 3 Carbide เป็น โครงสร้างที่มีความแข็งและเปราะ คาร์ไบด์นั้นสามารถแบ่งย่อยตามส่วนผสมทางเคมีได้หลายประเภท คือ

- MC เกิดในช่วงแรกของการแข็งตัว มีความเสถียรภาพสูง โลหะที่มักเกิดเป็นคาร์ไบด์ ได้แก่ Ti, Ta, Co, W

- $M_{23}C_6$  เกิดระหว่างการทำกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ หรือการใช้งานที่ 760-980 องศาเซลเซียส หรืออาจเกิดจากการสลายตัวของ MC ก็ได้ มักเกิดที่ขอบเกรน โลหะที่มักเกิดเป็นคาร์ไบด์ ได้แก่ Cr, Fe, Mo, W

- $M_6C$  เกิดที่อุณหภูมิ 815-980 องศาเซลเซียส จะเกิดได้เมื่อปริมาณของทั้งสแตนและ โมลิบดีนัมมากกว่า 6-8%

คาร์ไบด์ของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลจะมีการกระจายตัวอยู่ตามขอบเกรน โดยหากอนุภาคคาร์ไบด์มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอจะทำให้โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลมีความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงเป็นอย่างมาก แต่หากคาร์ไบด์มีการเกาะตัวต่อเนื่องเป็นแนวตามขอบเกรนหรืออยู่ในลักษณะแบบฟิล์มจะทำให้เกิดการแตกได้ง่าย ลักษณะของคาร์ไบด์จะแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 2.3



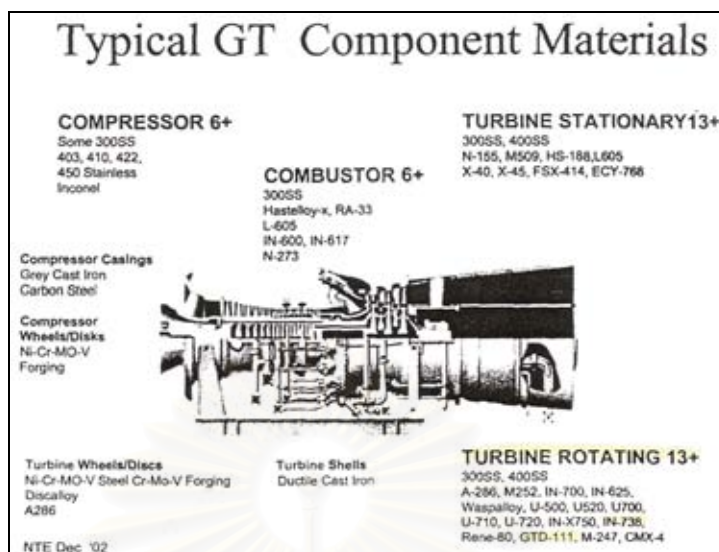
รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะการไบต์ของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล [4]

### 2.2.2 คุณสมบัติเชิงกลโดยทั่วไปของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล [3]

โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลเป็นโลหะที่มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีหลายๆด้าน เช่น มีความเสถียรที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากมีธาตุ Co ที่ช่วยปรับปรุงความสามารถในการใช้งานที่อุณหภูมิสูงให้ดีขึ้น, มีความทนทานต่อการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากมีการเติม Cr, Al และ Ti ทำให้เกิดเป็น  $Cr_2O_3$ ,  $Al_2O_3$  และ  $Ni_3(Ti, Al)$  ซึ่งช่วยเพิ่มความต้านทานการเกิดออกซิเดชัน, การกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูงและเพิ่มความแข็งแรง อีกทั้งยังมีค่าการนำความร้อนที่สูง นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ทำให้มีการเลือกเอาโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลมาใช้เป็นเครื่องยนต์กังหันก๊าซ (Turbine Engine) ดังแสดงในรูปที่ 2.4

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติเชิงกลโดยทั่วไปของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล [3]

ความหนาแน่นโดยทั่วไป	7.9-8.5 g/cm <sup>2</sup>
Yield strength	800-1200 MPa
Tensile strength	1250-1450 MPa
อุณหภูมิการใช้งานโดยทั่วไป	650 - 1100 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.4 แสดงชนิดของ Nickel base superalloy ที่ใช้เป็นส่วนประกอบของ  
Turbine Rotating Part [1]

## 2.3 โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล ชนิด IN 738 [5]

โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล ชนิด IN 738 ถูกพัฒนาขึ้น โดยสถาบันวิจัย Paul D. Merica มีจุดมุ่งหมายเพื่อให้เกิดโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลที่มีเสถียรภาพในโครงสร้าง ได้มีการนำไปใช้งานต่างๆ โดยเฉพาะการนำไปหล่อเป็นชิ้นส่วนต่างๆ โดยส่วนใหญ่จะมักนำโลหะผสมพิเศษชนิดนี้ไปทำการหล่อด้วยวิธีการ Vacuum melted และ Vacuum-investment cast

ทั่วไปแล้วจะสามารถแบ่งโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล ชนิด IN 738 ได้เป็น 2 กลุ่มโดยใช้ส่วนผสมทางเคมีเป็นเกณฑ์ คือ

- แบบคาร์บอนสูง โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลในกลุ่มนี้จะมีปริมาณคาร์บอนประมาณ 0.15-0.20% โดยน้ำหนัก เรียก Inconel ในกลุ่มนี้ว่า IN 738C

- แบบคาร์บอนต่ำ จะมีปริมาณคาร์บอนที่ผสมอยู่ประมาณ 0.09-0.13% โดยน้ำหนัก เรียก Inconel ในกลุ่มนี้ว่า IN 738LC

นอกจากนี้ยังได้มีการผสมธาตุอื่นๆลงไปในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล ชนิด IN 738 เช่น Cr, Al, Ti โดยมีปริมาณส่วนผสมทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 2.2 ธาตุที่ผสมลงไปแต่ละชนิดนั้นจะส่งผลต่อคุณสมบัติแตกต่างกันไป ซึ่งผลของธาตุที่ผสมลงไปต่อคุณสมบัติได้แสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.2 แสดงส่วนผสมทางเคมีของ โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 [6]

	Ni	Cr	Co	Ti	Al	W	Mo	Ta	C	Fe	B
IN 738	Bal.	16.0	8.3	3.38	3.4	2.6	1.70	1.7	0.09-0.2	-	0.01

ตารางที่ 2.3 แสดงผลของธาตุผสมต่างๆ ต่อสมบัติของ โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล ชนิด IN 738 [5]

ธาตุผสม	ผล
Cr	เกิดฟิล์ม $Cr_2O_3$ ด้านทานการเกิดออกซิเดชัน และการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูง
Co	ปรับปรุงความสามารถในการใช้งานที่อุณหภูมิสูง
Ti	เกิด $Ni_3(Ti, Al)$ เพิ่มความแข็งแรง
Al	เกิด $Ni_3(Ti, Al)$ เพิ่มความแข็งแรง
Mo	เพิ่มความแข็งแรงด้วยกลไก Solid Solution Strengthening
W	เพิ่มความแข็งแรงด้วยกลไก Solid Solution Strengthening
Ta	เพิ่มความแข็งแรงด้วยกลไก Solid Solution Strengthening
C	เป็นส่วนประกอบของคาร์ไบด์

#### 2.4 โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล ชนิด GTD 111 [6]

โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล ชนิด GTD 111 มีการพัฒนามาจากโลหะผสมพิเศษ Rene 80 และ IN 738 LC ซึ่งจากการศึกษาของ Sajjadi ในการเปรียบเทียบสมบัติด้านต่างๆ ระหว่างโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิล ชนิด GTD 111 และ ชนิด IN 738 LC ดังต่อไปนี้

- ความต้านทานต่อการคืบของ GTD 111 ดีกว่าของ IN 738 LC อยู่ 20 องศาเซลเซียส
- การเกิดออกซิเดชันและความต้านทานการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูงของ GTD 111 มีสมบัติคล้ายกับของ IN 738 LC
- ค่า Yield Strength ของ GTD 111 มากกว่า IN 738 LC ในช่วงอุณหภูมิ 25-900 องศาเซลเซียส
- ค่า Tensile Ductility ของ GTD 111 น้อยกว่า IN 738 LC
- ค่า Stress Rupture Strength ของ GTD 111 มากกว่า IN 738 LC
- โครงสร้างของ GTD 111 เหมาะสมที่จะใช้ที่อุณหภูมิสูงมากกว่า IN 738 LC



สำหรับโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล ชนิด GTD 111 จะมีส่วนผสมทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 2.4 ซึ่งธาตุต่างๆ ที่ผสมอยู่ในโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล ชนิด GTD 111 จะส่งผลต่อสมบัติของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล ชนิด GTD 111 ดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.4 แสดงส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล ชนิด GTD 111 [6]

	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

ตารางที่ 2.5 แสดงผลของธาตุต่างๆ ต่อสมบัติของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล ชนิด GTD 111[5]

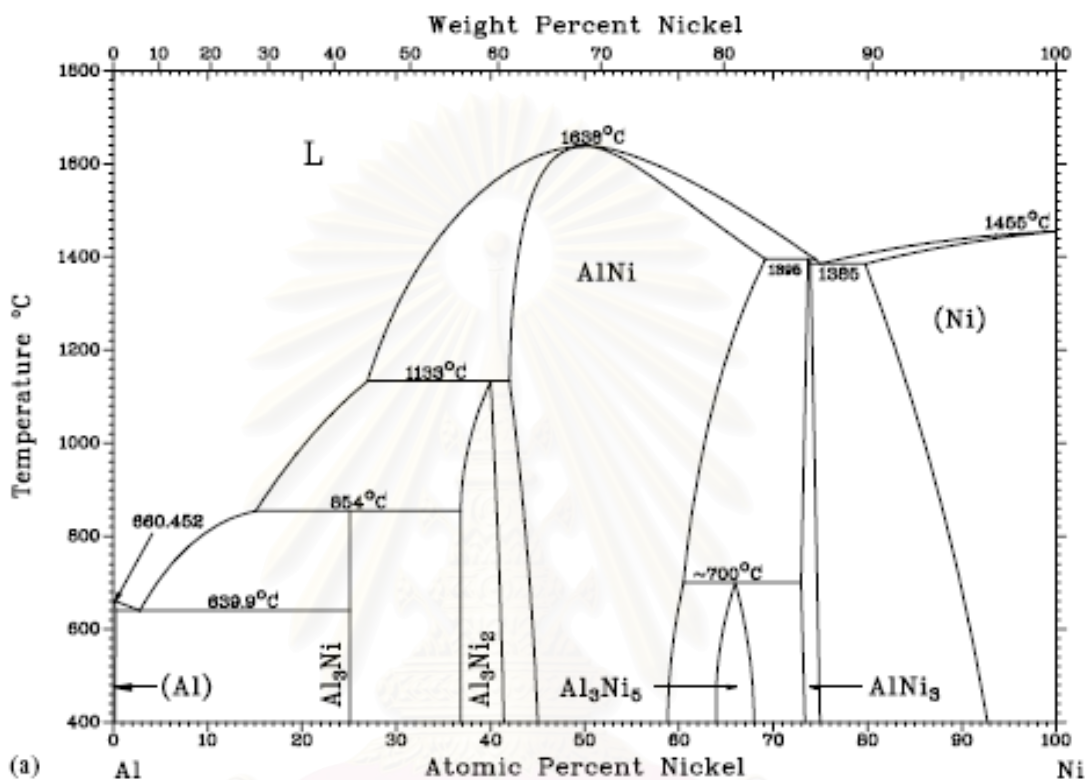
ธาตุ	ผล
Cr	เกิดฟิล์ม $Cr_2O_3$ ด้านทานการเกิดออกซิเดชันและการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูง, เพิ่มความแข็งแรงด้วยกลไก Solid Solution Strengthening
Co	ปรับปรุงความสามารถในการใช้งานที่อุณหภูมิสูง
Ti	เพิ่มความต้านทานการเกิดการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูง
Al	เกิดฟิล์ม $Al_2O_3$ เพิ่มความต้านทานการเกิดออกซิเดชัน หากมีมากเกินไปจะทำให้ขึ้นรูปได้ยาก
Mo	เพิ่มความแข็งแรงด้วยกลไกการเกิด Solid Solution Strengthening
Fe	เป็นส่วนประกอบของโครงสร้างเนื้อพื้่น
B	ช่วยปรับปรุง Rupture Life ได้
C	เป็นส่วนประกอบของคาร์ไบด์

จากสมบัติที่กล่าวมาของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล ชนิด GTD 111 นี้ ทำให้โลหะผสมพิเศษดังกล่าวได้ถูกนำมาใช้งานทดแทนโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล ชนิด IN 738LC มากขึ้นเรื่อยๆ โดยในปัจจุบันนี้ก็ยังมีการใช้งานโลหะผสมพิเศษทั้งสองชนิดอย่างกว้างขวาง

## 2.5 คุณสมบัติของ NiAl

สำหรับนิกเกิลหากทำการเติมอะลูมิเนียมลงไป จะเกิดเป็นสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic compound) หลายชนิด คือ  $Al_3Ni$ ,  $Al_3Ni_2$ ,  $AlNi$ ,  $Al_3Ni_5$  และ  $AlNi_3$  ดังแสดงใน

แผนภูมิสมมูลรูปที่ 2.5 ซึ่งสารประกอบเชิงโลหะแต่ละชนิดจะมีโครงสร้างและส่วนผสมทางเคมีแตกต่างกัน แสดงให้เห็นด้วยตารางที่ 2.6 สารประกอบเชิงโลหะเหล่านี้จะมีสมบัติเด่นแตกต่างกันตามส่วนผสมทางเคมีและโครงสร้าง



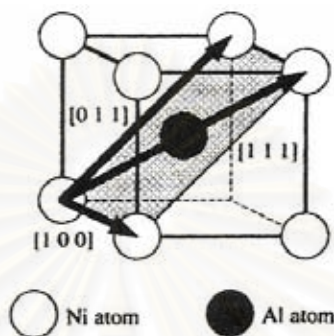
รูปที่ 2.5 แสดงแผนภูมิสมมูลของนิกเกิลและอะลูมิเนียม [7]

ตารางที่ 2.6 แสดงสารประกอบเชิงโลหะชนิดต่างๆ ระหว่างนิกเกิลและอะลูมิเนียม [8]

Phase	Composition, wt% Ni	Pearson symbol	Space group
Al	0 to 0.24	cF4	$Fm\bar{3}m$
$Al_3Ni$	42.0	$\sigma P16$	Pnma
$Al_3Ni_2$	55.9 to 60.7	hP5	$P\bar{3}m1$
AlNi	61.0 to 83.0	cP2	$Pm\bar{3}m$
$Al_3Ni_5$	79.0 to 82.0	...	Cmmm
$AlNi_3$	85.0 to 87.0	cP4	$Pm\bar{3}m$
Ni	89.0 to 100	cF4	$Fm\bar{3}m$

สารประกอบเชิงโลหะของนิกเกิลและอะลูมิเนียมชนิดหนึ่งที่น่าสนใจ คือนิกเกิลอะลูมิเนียมไนด์ (NiAl) ซึ่งมีสมบัติ ดังต่อไปนี้ [7]

- มีโครงสร้างผลึกเป็น B2 หรือเรียกว่า  $\beta$ -phase ลักษณะโครงสร้างสามารถแสดงได้ตามรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างผลึกแบบ B2 ของ NiAl [7]

- มีจุดหลอมเหลวที่สูงมาก โดยในกรณีที่มีสัดส่วนของนิกเกิลต่ออะลูมิเนียมเป็น 1 ต่อ 1 (Stoichiometric) จะมีจุดหลอมเหลวที่สูงประมาณ 1638 องศาเซลเซียส แต่หากสัดส่วนของนิกเกิลและอะลูมิเนียมไม่เท่ากับ 1 ต่อ 1 (Nonstoichiometric) จะมีจุดหลอมเหลวที่ต่ำกว่าเล็กน้อย

- มีความหนาแน่นต่ำ โดยในกรณีที่ส่วนผสมเป็น Nonstoichiometric พบว่า NiAl จะมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง  $5.35 \text{ g/cm}^3$  (Al-rich boundary ของเฟส NiAl) ถึง  $6.50 \text{ g/cm}^3$  (Ni-rich boundary) และในกรณีที่ส่วนผสมเป็น Stoichiometric ของ binary NiAl มีความหนาแน่น ประมาณ  $5.85 \text{ g/cm}^3$

- มีคุณสมบัติต้านทานออกซิเดชันและการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูงได้ดี

จากคุณสมบัติเหล่านี้ทำให้สารประกอบชนิดนี้ได้นำมาใช้ในการเคลือบผิวโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลต่างๆ เพื่อเพิ่มความต้านทานการเกิดออกซิเดชันและความต้านทานการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูง โดยปัจจุบันนี้มีการเคลือบผิวได้หลายวิธี เช่น ใช้ผงโลหะอะลูมิเนียม, ใช้การเคลือบไอ และอื่นๆ

## 2.6 กระบวนการเคลือบผิว [2]

เนื่องจากโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลมีราคาสูง จึงทำให้ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมและบำรุงรักษามีจำนวนมาก จึงได้มีการคิดค้นกระบวนการเคลือบผิวโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลด้วยวัสดุอื่น อันจะส่งผลให้คุณสมบัติของพื้นผิวของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลดีขึ้น โดยทั่วไปสามารถแบ่งการเคลือบผิวออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

**2.6.1 Overlay coating processes** เป็นกระบวนการที่โลหะพื้นถูกเคลือบด้วยอนุภาคโลหะในปริมาณเล็กน้อย ทำให้เกิดชั้น interdiffusion ขึ้น ซึ่งแตกต่างจาก Diffusion coating processes ตรงที่อนุภาคที่ใช้ในการเคลือบนั้นไม่ใช่อนุภาคที่มีสมบัติป้องกันพื้นผิวโดยตรง แต่อนุภาคโลหะนี้จะไปจับตัวกับสารในโลหะพื้นทำให้เกิดสารประกอบใหม่บริเวณ interdiffusion เกิดเป็นผิวเคลือบที่เหมาะสม

วิธีที่พบเห็นและนิยมใช้ในปัจจุบัน ได้แก่ Electron Beam-Physical Vapor Deposition (EBPVD), Plasma Spraying

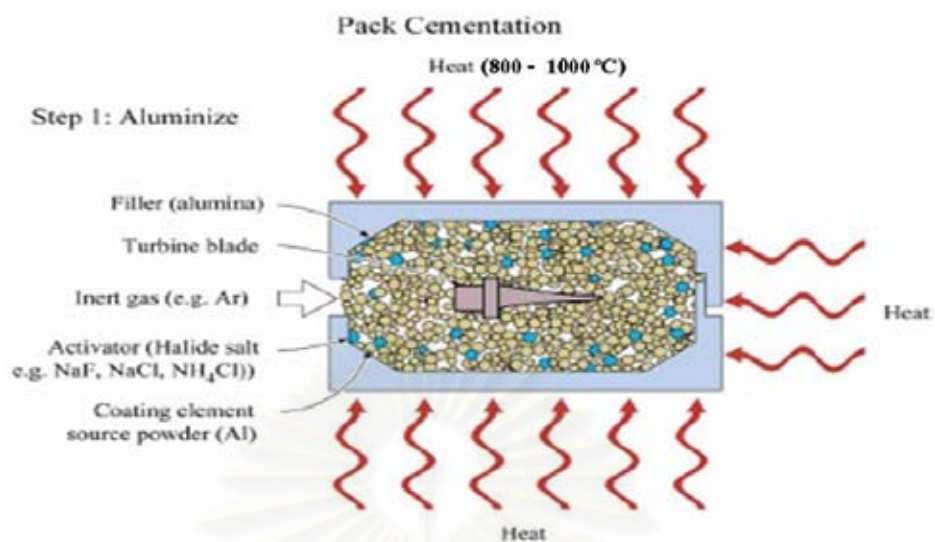
**2.6.2 Diffusion coating processes** เป็นกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงของชั้นภายนอกโลหะพื้นอันเนื่องมาจากบริเวณภายนอกโลหะพื้นมีการสัมผัสและเกิดปฏิกิริยากับสารเคมี โดยทั่วไปนิยมใช้อะลูมิเนียมแพร่เข้าสู่พื้นเนื้อในผิวเกิดเป็นสารประกอบนิกเกิลอะลูมิเนียมไนด์ (Nickel aluminide, NiAl)

กระบวนการที่อะลูมิเนียมแพร่เข้าสู่พื้นผิวนั้นมีหลายวิธีและถูกใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมเครื่องยนต์กังหันก๊าซของเครื่องบิน วิธีที่น่าสนใจและนิยมใช้ในปัจจุบัน คือ Pack cementation process

Pack Cementation process นั้นจะประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก คือ โลหะพื้นที่จะทำการเคลือบผิว (Substrate) และสารตั้งต้นของปฏิกิริยา (Reactant) ผสมอยู่ในภาชนะเดียวกัน ซึ่งสารตั้งต้นของปฏิกิริยาหรือเรียกอีกอย่างว่า Pack จะประกอบไปด้วยผงอะลูมิเนียม, Halide เป็น chemical activator และสารที่ไม่เกิดปฏิกิริยา (Inert) ได้แก่ ผงอะลูมินา ( $Al_2O_3$ ) ซึ่งเติมลงไปเพื่อป้องกันผงอะลูมิเนียมเกิดการเผาไหม้

ขั้นตอนการทำการเคลือบผิวด้วยวิธี Pack Cementation นั้นจะแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอน [9]

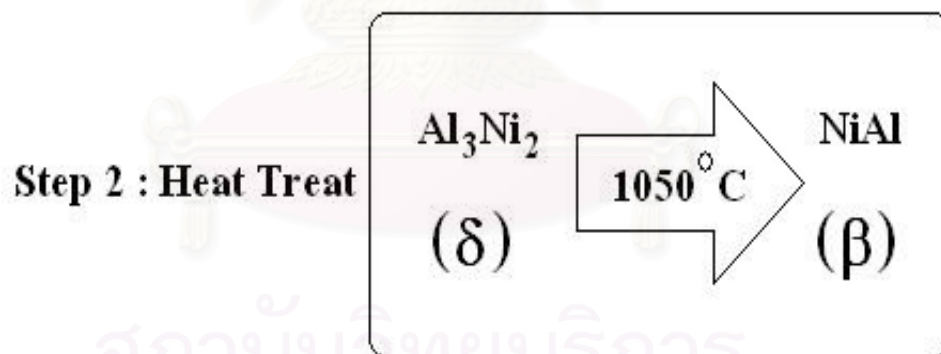
ขั้นที่ 1 เรียก Aluminizing โดยจะนำเอาสารตั้งต้นของปฏิกิริยาผสมอยู่ในภาชนะเดียวกันกับโลหะพื้น จากนั้นทำการเผาที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ แล้วทิ้งให้เย็นภายในเตา ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงขั้นตอนการทำ Aluminizing ของกระบวนการเคลือบผิวแบบ

Pack Cementation [9]

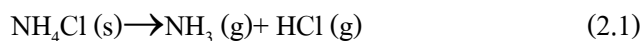
ขั้นที่ 2 เรียก การอบชุบทางความร้อน (Heat Treat) โดยจะนำเอาโลหะพื้นที่ผ่านขั้นตอนการทำอะลูมิเนียมไนซิง (Aluminizing) มาทำการอบเป็นเนื้อเดียวที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ ดังรูปที่ 2.8



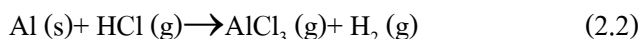
รูปที่ 2.8 แสดงขั้นตอนการทำ Heat Treat ของกระบวนการเคลือบผิวแบบ Pack Cementation [9]

ในกระบวนการทำการเคลือบผิวด้วยวิธี Pack Cementation ตามขั้นตอนที่ 1 จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมี [9] ดังนี้

เมื่อให้ความร้อนแก่โลหะพื้นและสารตั้งต้นปฏิกิริยา จะทำให้ผงแอมโมเนียมคลอไรด์ ( $NH_4Cl$ ) เกิดการสลายตัว ได้ก๊าซ  $NH_3$  และก๊าซ  $HCl$  ดังสมการ



ก๊าซ  $HCl$  ที่ได้จากสมการที่ (2.1) มาทำปฏิกิริยากับผง  $Al$  เกิดปฏิกิริยา คือ



ก๊าซ  $\text{AlCl}_3$  ที่เกิดขึ้นจะปกคลุมบริเวณผิวของโลหะพื้น แล้วเกิดปฏิกิริยาโดยก๊าซ  $\text{AlCl}_3$  จะเกิดปฏิกิริยาละลายตัว ให้ Al จากนั้น Al จะแพร่เข้าไปภายในเนื้อของโลหะพื้น ดังปฏิกิริยา

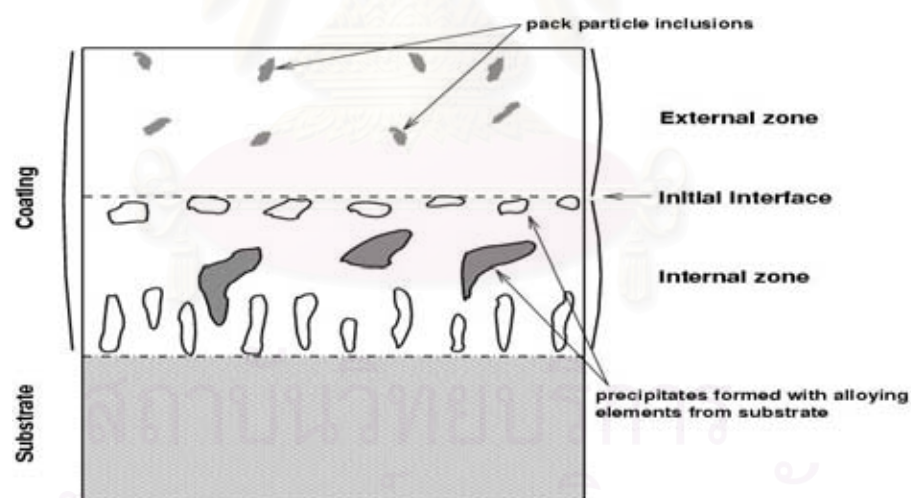


นอกจากนั้น พบว่า  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ซึ่งเป็นส่วนประกอบของสารตั้งต้นปฏิกิริยา มีหน้าที่ คือ ป้องกันการเผาผลาญของผงอะลูมิเนียม

## 2.7 กลไกของขั้นตอนการทำ Aluminizing [2,10]

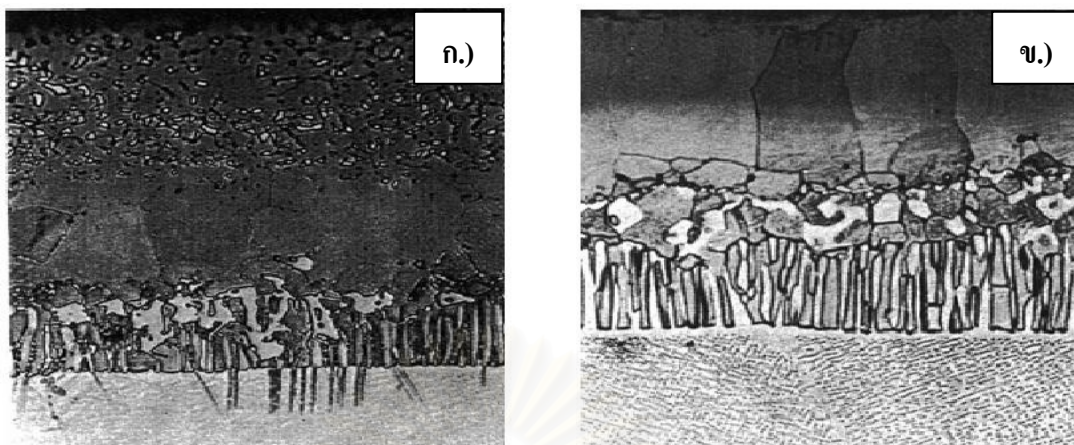
พบว่า การทำ Aluminizing จะเกิดกลไก ได้ 2 กรณี คือ

**2.7.1. Low Aluminium contents** หรือ Low Activity หรือ Outward diffusion จะเกิดการแพร่ของนิกเกิล ทำให้เกิด Ni - rich ในชั้นผิว NiAl โดยกระบวนการนี้จะต้องใช้อุณหภูมิที่สูงประมาณ 1000-1100 องศาเซลเซียส ทำให้พื้นที่ช่วง interdiffusion ถูกจำกัด และ gradient ของ Al ใน  $\beta$ -phase จะต่ำ นอกจากนี้ alloying element ในโลหะพื้นจะมีการแพร่ในผิวเคลือบ แต่จะมีค่าจำกัดขึ้นกับความสามารถในการละลายของตัวเอง ทำให้ได้โครงสร้างดังแสดงในรูป 2.10 ก.)



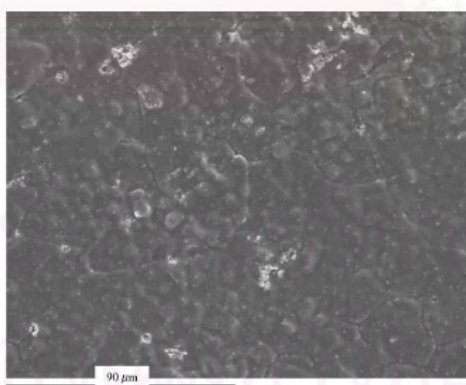
รูปที่ 2.9 แสดงบริเวณที่เกิดขึ้นจากการเคลือบผิวด้วยกระบวนการ Pack Cementation [10]

**2.7.2. High Aluminium contents** หรือ High Activity หรือ inward diffusion จะทำให้เกิดโครงสร้าง  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  และ  $\beta$ -NiAl ซึ่งกลไกนี้จะเกิดเมื่ออุณหภูมิการทำ Aluminizing ต่ำกว่ากรณีที่ 1 คือประมาณ 700-950 องศาเซลเซียส โดยจะมี gradient ของความเข้มข้นของ Al ในผิวเคลือบสูง เป็นผลให้เกิดการแพร่ขณะทำ Heat-treatment ที่ 1050-1100 องศาเซลเซียส ได้โครงสร้างเป็นชั้น  $\beta$ -NiAl ทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ข.)



รูปที่ 2.10 แสดงโครงสร้างที่เกิดจาก ก.) Inward diffusion และ ข.) outward diffusion [10]

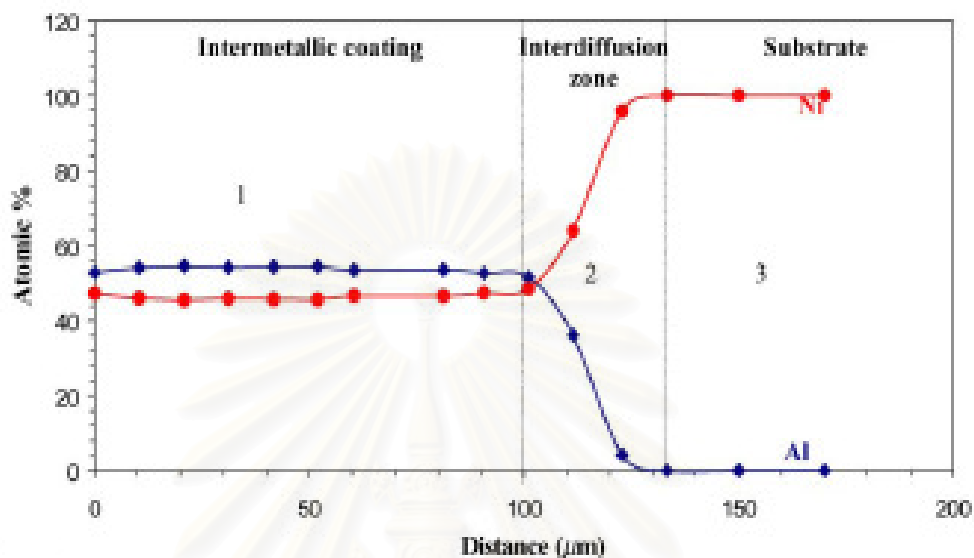
จากการศึกษาของ C.Houngninou [11] ซึ่งได้ทำการเคลือบผิวของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลด้วยสารประกอบเชิงโลหะนิกเกิลอะลูมิเนียม (NiAl) ด้วยกระบวนการ Pack Cementation Process ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 และ 5 ชั่วโมงตามลำดับ โดยใช้อัตราส่วนแอมโมเนียมคลอไรด์ต่ออะลูมิเนียมต่ออะลูมินาต่อเป็น 3:15:82 โดยน้ำหนัก ภายใต้บรรยากาศที่ปกคลุมไปด้วยก๊าซอาร์กอน (Ar) พบว่า พื้นผิวของชิ้นงานหลังจากผ่านการทำอบชุบ เมื่อตรวจดูด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบกวาด (SEM) จะมีลักษณะเรียบ ดังรูปที่ 2.11 และเมื่อตรวจชั้นผิวเคลือบจะเห็นว่าชั้นเคลือบจะแบ่งออกเป็น 2 ชั้น (layer) และเกรนมีขนาดเล็กอย่างสม่ำเสมอ



รูปที่ 2.11 พื้นผิวที่ดูด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบกวาดของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลที่เวลา 5 ชั่วโมง [11]

จากนั้นเมื่อนำไปตรวจสอบด้วย EDX ได้ว่าชั้นเคลือบจะประกอบไปด้วยนิกเกิล 45% และอะลูมิเนียม 55% ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ซึ่งปริมาณนิกเกิลและอะลูมิเนียมดังกล่าวสามารถเกิดเป็นสารประกอบเชิงโลหะได้ 2 ชนิด คือ NiAl และ  $Ni_2Al_3$  แต่จากการตรวจสอบด้วย XRD พบว่าที่ชั้น

เคลือบภายนอกที่มีปริมาณอะลูมิเนียมสูงจะมีโครงสร้าง  $Ni_2Al_3$  เพียงชนิดเดียว ในส่วนของชั้นเคลือบภายในจะมีโครงสร้างเป็น  $NiAl$



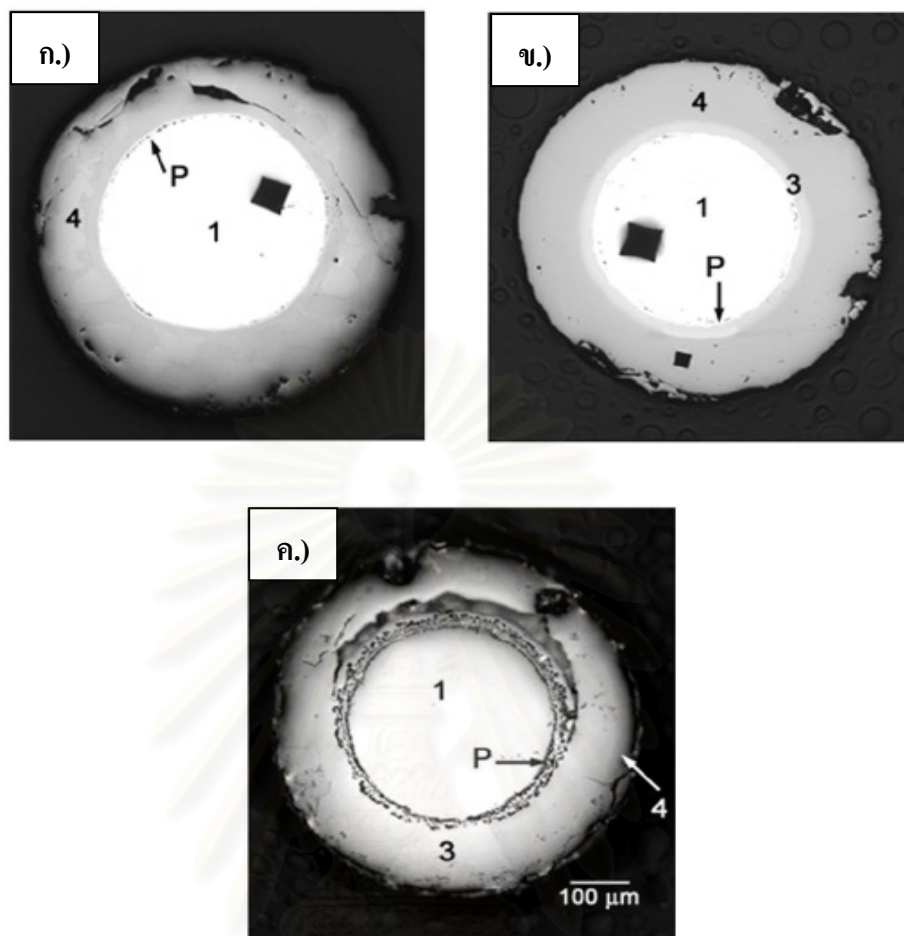
รูปที่ 2.12 แสดงปริมาณของอะลูมิเนียมและนิกเกิล ที่ตำแหน่งต่างๆ ของชั้นเคลือบ [11]

## 2.8 การทำอบเป็นเนื้อเดียว (Heat treat) ภายหลังการทำ Aluminizing

หลังจากการทำอะลูมิไนซิง (Aluminizing) แล้ว ชั้นเคลือบที่ได้จะมีโครงสร้างที่ไม่เป็น  $NiAl$  ทั้งหมด จึงต้องนำไปทำการอบให้เกิดการแพร่ของ  $Ni$  และ  $Al$  เนื่องจากกรรมวิธีนี้เกี่ยวข้องกับ การแพร่ของ  $Ni$  และ  $Al$  ในชั้นเคลือบทำให้ต้องเลือกอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบให้เหมาะสม

จากการศึกษาของ A.M. Hodge [12] โดยศึกษาโครงสร้าง nickel-aluminide ที่เกิดจากการทำ pack cementation process แบบ high activity ด้วย nickel foam ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ด้วยเวลา 4 ชั่วโมง โดยมีอัตราส่วนผง pack ระหว่าง  $NH_4Cl:Al:Al_2O_3$  เป็น 3:15:82 โดยน้ำหนัก แล้วทำการอบเป็นเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0, 8 และ 24 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดโครงสร้างที่สม่ำเสมอ (Homogenized structure) พบว่าโครงสร้าง nickel-aluminide ที่ผ่านการทำ pack cementation หากไม่ได้อบเป็นเนื้อเดียวจะมีโครงสร้าง 2 ชนิด คือ  $Ni_2Al_3$  ซึ่งอยู่บริเวณผิวนอก และชั้นด้านในเป็น  $Ni$  ดังรูปที่ 2.13 ก.) เมื่อทำการอบเป็นเนื้อเดียวที่ 8 ชั่วโมง พบว่าจะเกิดชั้น  $NiAl$  อยู่ระหว่างชั้น  $Ni_2Al_3$  และ  $Ni$  โดยชั้นโครงสร้าง  $NiAl$  จะหนาเพิ่มขึ้นเมื่อทำการอบเป็นเนื้อเดียวที่เวลา 24 ชั่วโมง ดังรูปที่ 2.13 ข.) และ 2.13 ค.) ตามลำดับ



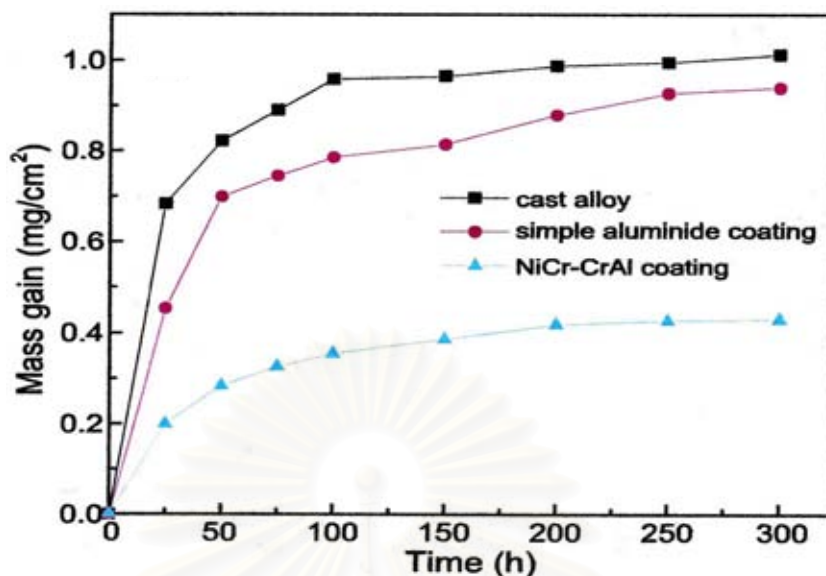


รูปที่ 2.13 แสดง โครงสร้างของ Nickel foam ที่ผ่านการอบที่เวลา ก.) 0 ชั่วโมง, ข.) 8 ชั่วโมง และ ค.) 24 ชั่วโมง [12]

## 2.9 ความต้านทานการเกิดออกซิเดชัน หลังการทำ Pack Cementation

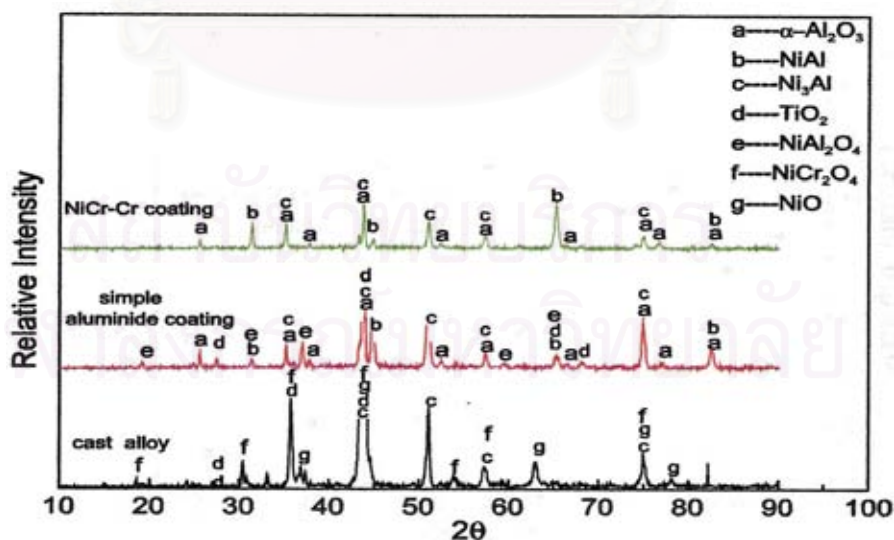
จากการศึกษาของ Xin Ren [13] โดยศึกษาการเคลือบอะลูมิเนียมที่ผิวของโลหะผสมพิเศษ เนื้อพื้มนิกเกิล พบว่าที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้มนิกเกิลที่ผ่านการเคลือบนั้นจะมีความต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่ดี ดังรูปที่ 2.14

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.14 แสดงการเกิดออกซิเดชันของ cast alloy และ alloy ที่ผ่านการเคลือบผิว ที่อุณหภูมิ 1000°C [13]

จากนั้นหากนำไปตรวจสอบด้วย XRD จะได้ว่า cast alloy ที่ผ่านการทำออกซิเดชัน จะมีออกไซด์เกิดขึ้น และมีปริมาณออกไซด์มากกว่า alloy ที่ผ่านการเคลือบผิว ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ซึ่งจากการตรวจสอบแสดงให้เห็นว่า cast alloy เมื่อทำการเคลือบอะลูมิเนียมที่ผิวจะสามารถช่วยเพิ่มความต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูงได้



รูปที่ 2.15 แสดงผล XRD ของ cast alloy และ alloy ที่ผ่านการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000°C

## บทที่ 3

### ขั้นตอนและวิธีดำเนินการทดลอง

#### 3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 3.1.1 ผงอะลูมิเนียม (Al)
- 3.1.2 ผงอะลูมินา ( $Al_2O_3$ )
- 3.1.3 ผงแอมโมเนียมคลอไรด์ ( $NH_4Cl$ )
- 3.1.4 Resin
- 3.1.5 Acetone
- 3.1.6 Alcohol
- 3.1.7 Argon Gas
- 3.1.8 โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล ชนิด IN 738
- 3.1.9 โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล ชนิด GTD 111
- 3.1.10 กระดาษทรายเบอร์ 80, 220, 400, 600, 800, 1200, 2500, 4000

#### 3.2 เครื่องมือการทดลอง

- 3.2.1 เครื่องตัด Discotom
- 3.2.2 เครื่องขัด
- 3.2.3 เครื่องชั่ง Digital
- 3.2.4 ถ้วยอะลูมินา
- 3.2.5 เตาท่อ
- 3.2.6 กล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope OM)
- 3.2.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกาว (Scanning Electron Microscope SEM)
- 3.2.8 เครื่อง X-ray diffractometer (XRD)
- 3.2.9 เครื่อง Grazing Incidence Angle X-Ray Diffraction (GIXD)

#### 3.3 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน

- 3.3.1 ตัดชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล ชนิด IN 738 และ โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล ชนิด GTD 111
- 3.3.2 ขัดผิวชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ 80, 220, 400, 600, 800, 1200, 2500, 4000 ตามลำดับ

3.3.3 ล้างชิ้นงานด้วยน้ำเปล่า และแอลกอฮอล์ ตามลำดับ

3.3.4 เป่าชิ้นงานให้แห้ง แล้วนำไปเก็บในภาชนะที่ปิดมิดชิดและไม่มีความชื้น

### 3.4 ขั้นตอนการเคลือบผิว

3.4.1 ผสมผงแอมโมเนียมคลอไรด์, ผงอะลูมิเนียม และผงอะลูมินา ด้วยอัตราส่วน  $\text{NH}_4\text{Cl} : \text{Al} : \text{Al}_2\text{O}_3$  เป็น 5 : 15 : 80 โดยน้ำหนัก เป็นปริมาณ 20 กรัม

3.4.2 นำชิ้นงานที่เตรียมไว้มาทำการล้างด้วย Acetone เพื่อทำความสะอาดพื้นผิว

3.4.3 เทผงที่ได้จาก 3.4.1 ลงไปในถ้วยอะลูมินาประมาณ 1 ใน 3 ถ้วย อัดผงให้แน่น

3.4.4 วางชิ้นงาน โดยหันด้านที่ต้องการเคลือบผิวคว่ำลงบนผงที่อัดแน่น

3.4.5 เทผงผสมที่เหลือลงในถ้วย แล้วอัดผงผสมให้แน่น

3.4.6 เทผงอะลูมินาทับอีกชั้น แล้วอัดผงอะลูมินาให้แน่น เพื่อลดปริมาณออกซิเจนที่เหลือค้างในถ้วยอะลูมินา

3.4.7 ปิดฝาอะลูมินาแล้วใช้ลวดสแตนเลสพันรอบถ้วย ดังรูปที่ 3.1 เพื่อป้องกันไม่ให้ก๊าซที่ได้จากปฏิกิริยาดันฝาถ้วยอะลูมินาเปิดออก



รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะการพันลวดสแตนเลสรอบถ้วยอะลูมินา

3.4.8 นำไปเผาด้วยเตาท่อ ด้วยอุณหภูมิและเวลา ดังตาราง 3.1 โดยใช้ Heating rate 30 องศาเซลเซียส ต่อ 1 นาที และควบคุมบรรยากาศด้วยก๊าซอาร์กอน

3.4.9 ทิ้งชิ้นงานให้เย็นภายในเตา นำชิ้นงานไปวิเคราะห์

3.4.10 เลือกชิ้นงานที่มีความหนาชั้นเคลือบเหมาะกับการใช้งาน แล้วนำไปทำการอบเป็นเนื้อเดียวด้วยอุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลาต่างๆ ดังตารางที่ 3.2 จากนั้นนำชิ้นงานไปวิเคราะห์

ตารางที่ 3.1 แสดงอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเผาด้วยเตาฟอส

Condition	Temperature (°C)	Time (Hours)
1	800	1
2	800	2.25
3	800	4
4	800	6.25
5	900	1
6	900	2.25
7	900	4
8	900	6.25
9	1000	1
10	1000	2.25
11	1000	4
12	1000	6.25

ตารางที่ 3.2 แสดงอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบเป็นเนื้อเดียว

Condition	Temperature (°C)	Time (Hours)
1	1000	6
2	1000	10
3	1000	14
4	1000	20

### 3.5 ขั้นตอนการวิเคราะห์ชิ้นงาน

3.5.1 วิเคราะห์ผิวชิ้นงานด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD), GIXD

3.5.2 นำชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวมาขัดผิวด้านข้างด้วยกระดาษทรายเบอร์ 80, 220, 400, 600, 800, 1200, 2500, 4000 ตามลำดับ

3.5.3 นำชิ้นงานมาขัดผิวด้วยผงอะลูมินาขนาด 0.3  $\mu\text{m}$

3.5.4 ถ่ายรูปและวัดความหนาชั้นเคลือบด้วยโปรแกรม AxioVision 3.0

3.5.5 นำชิ้นงานตัวอย่างมาตรวจสอบชั้นเคลือบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบแสง (Optical Microscope)

3.5.6 นำชิ้นงานตัวอย่างมาตรวจสอบชั้นเคลือบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง  
กวาด (scanning electron microscope SEM)

3.5.7 วิเคราะห์กลไกและอัตราการโตขึ้นของชั้นเคลือบ

### 3.6 ขั้นตอนการทดสอบการกัดกร่อนแบบออกซิเดชัน

3.6.1 นำชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวมาทำการวัดหาปริมาณพื้นที่ทั้งหมดด้วยโปรแกรม  
Motic Images Plus 2.0 พร้อมทั้งชั่งน้ำหนักชิ้นงาน และจดบันทึกไว้

3.6.2 นำไปเข้าเตาเพื่อทำการทดสอบการกัดกร่อนแบบออกซิเดชัน

3.6.3 จดบันทึกน้ำหนักของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไป

3.6.4 เปรียบเทียบความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชัน



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

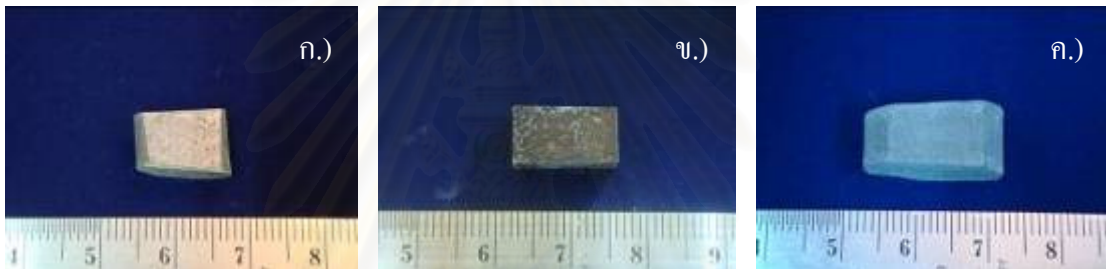
## บทที่ 4

### ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์รูปร่างและลักษณะพื้นผิวของชั้นเคลือบก่อนทำการอบเป็นเนื้อเดียว

##### 4.1.1 ผลของอุณหภูมิต่อรูปร่างและลักษณะพื้นผิวชั้นเคลือบ

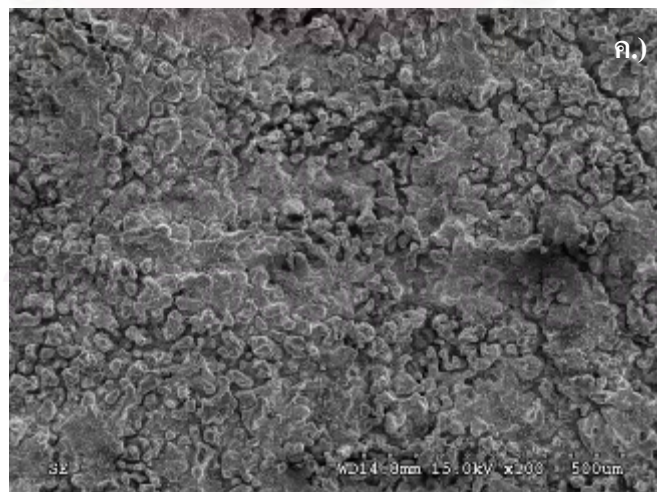
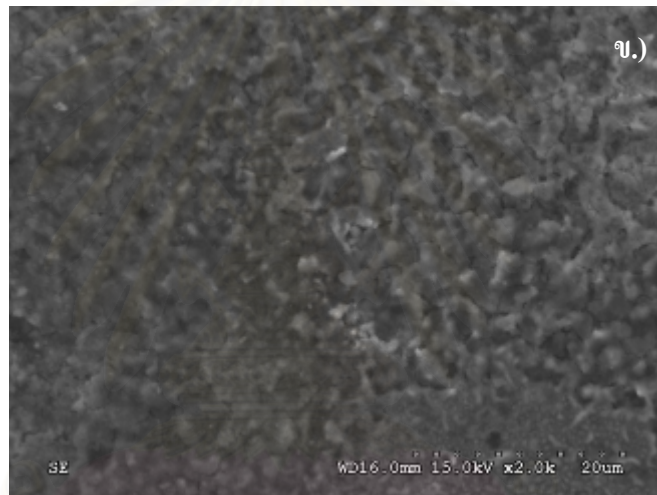
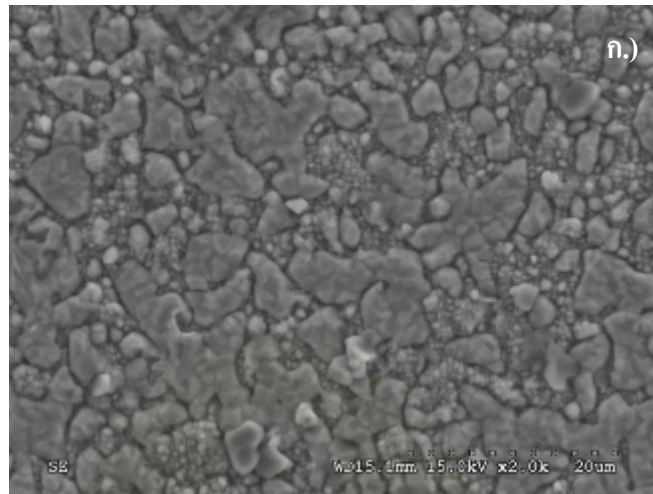
จากการทำการเคลือบผิวโลหะผสมพิเศษเนื้อพ่นนิกเกิลชนิด IN 738 ที่อุณหภูมิ 800, 900 และ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่าชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงขนาด ดังรูปที่ 4.1 ก.) และ 4.1 ข.) แต่เมื่อตรวจสอบผิวหน้าของชิ้นงานด้วยกล้อง SEM พบว่าชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส มีลักษณะผิวหน้าที่คล้ายกันคือผิวหยาบขึ้น ดังรูปที่ 4.2 ก.) และ 4.2 ข.)



รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงป่น IN 738 ที่ ก.)800 ข.)900 และ ค.)1000°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

แต่เมื่อตรวจสอบชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส พบว่า ชิ้นงานมีชั้นเคลือบที่หนามากจนทำให้ขนาดของชิ้นงานเปลี่ยนแปลงไป ดังรูปที่ 4.1 ค.) และชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นมีการแตกและหลุดร่อนได้ง่าย เมื่อทำการตรวจสอบผิวหน้าด้วยกล้อง SEM จะพบว่าผิวหน้าจะมีลักษณะที่หยาบ และมีรูพรุนเป็นจำนวนมาก

เพราะฉะนั้นการเคลือบผิวด้วยอุณหภูมิที่สูงขึ้น จะทำให้ความหนาชั้นเคลือบเพิ่มมากขึ้นจนทำให้ชั้นเคลือบแตกและหลุดร่อนได้ง่าย ซึ่งจากผลการตรวจสอบข้างต้นจึงได้ทำการศึกษาชั้นเคลือบของโลหะผสมพิเศษเนื้อพ่นนิกเกิลชนิด GTD 111 ที่อุณหภูมิเดียวกันคือ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลาต่างๆ

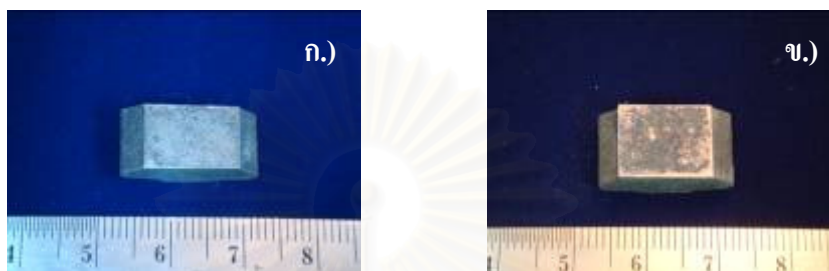


รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายชิ้นงานที่ผ่านการทำอะลูมิเนียมไนซิงบน IN 738 ที่ ก.)800 ข.)900 และ ค.)1000°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยกล้อง SEM

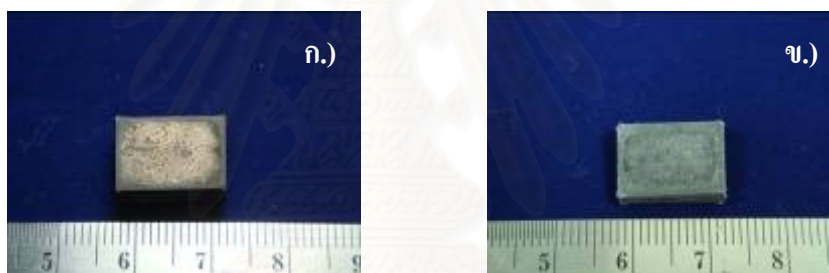


#### 4.1.2 ผลของเวลาต่อรูปร่างและลักษณะพื้นผิวชั้นเคลือบ

พิจารณาโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 ที่ผ่านการเคลือบผิว ด้วยอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง ผลที่ได้มีลักษณะคล้ายกัน คือ ขนาดของชิ้นงานจะไม่มีเปลี่ยนแปลง และ ผิวหน้ามีลักษณะหยาบ ดังตัวอย่างในรูปที่ 4.3 ก.) และ 4.3 ข.)



รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายชิ้นงานผ่านการทำอะโนดิมในซิงบน IN 738 ที่ 900 °C เป็นเวลา ก.) 1 และ ข.) 6.25 ชั่วโมง

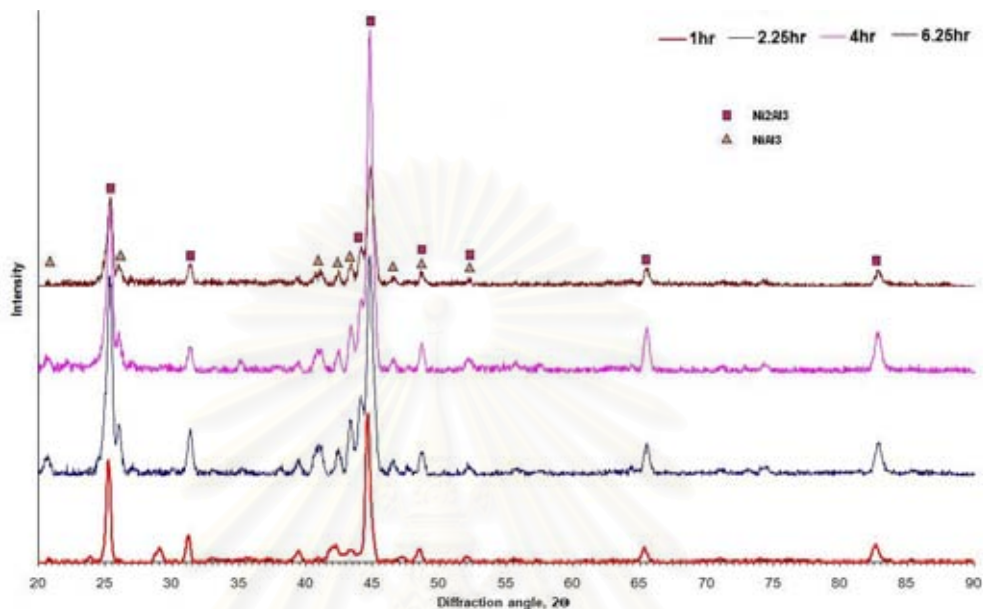


รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายชิ้นงานผ่านการทำอะโนดิมในซิงบน GTD 111 ที่ 900 °C เป็นเวลา ก.) 1 และ ข.) 6.25 ชั่วโมง

ในส่วน of โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด GTD 111 ที่ทำการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง พิจารณารูปที่ 4.4 ก.) และ 4.4 ข.) พบว่า ไม่มีเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นงาน และ ผิวหน้ามีลักษณะหยาบเช่นเดียวกับโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 ดังนั้นการเพิ่มเวลาในการเคลือบผิวจะไม่ส่งผลต่อขนาดและลักษณะผิวของชิ้นงานหลังจากผ่านการเคลือบผิวด้วยวิธีอะโนดิมในซิงแบบผงเมื่อใช้อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสและต่ำกว่า

## 4.2 ผลการตรวจสอบเชิงคุณภาพโดย XRD ของชั้นเคลือบก่อนทำการอบเป็นเนื้อเดียว

### 4.2.1 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบบนโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738

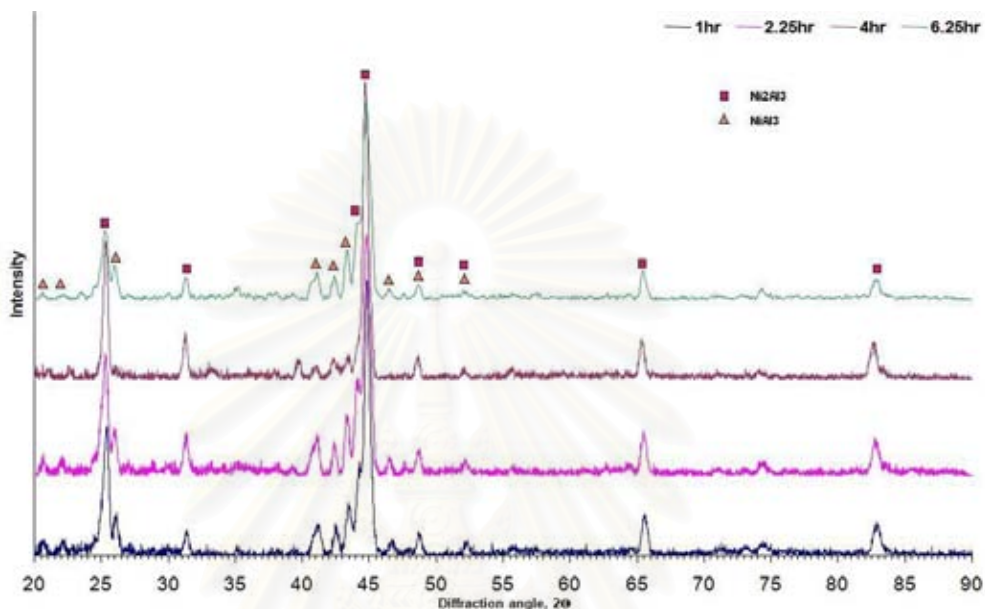


รูปที่ 4.5 ผลการเปรียบเทียบการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะโนดิมในเชิงบน IN 738 ที่ 800°C เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง ด้วยวิธี GIXD

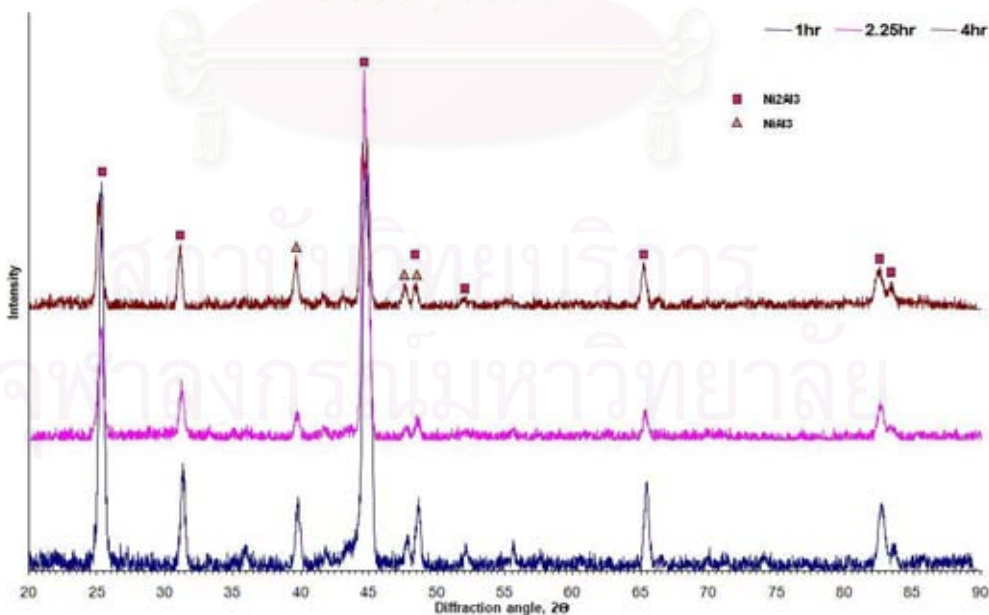
จากรูปที่ 4.5 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลด้วย XRD แบบ GIXD ที่มุม 5 องศา เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง พบว่าชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะเกิดพีคของเฟส 2 เฟส คือ เฟส  $Ni_2Al_3$  และ  $NiAl_3$  (JCPDS No. 03-1052 และ 02-0416) โดยพีคที่มีความเข้มสัมพัทธ์สูงสุดเป็นพีคของเฟส  $Ni_2Al_3$  จากนั้นเมื่อเพิ่มเวลาของการเคลือบผิวจะเห็นว่าพีคที่เกิดขึ้นมีลักษณะที่เหมือนกัน และมีพีคที่มีความเข้มสัมพัทธ์สูงสุดเป็นพีคของเฟส  $Ni_2Al_3$  เช่นเดียวกัน นั่นแสดงให้เห็นว่าเฟสหลักที่เกิดขึ้นบริเวณผิวชั้นเคลือบเมื่อทำการเคลือบผิวด้วยอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ที่เวลาต่างๆ เป็นเฟส  $Ni_2Al_3$

และเมื่อทำการตรวจสอบชั้นเคลือบของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 ที่ผ่านการเคลือบผิวที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง ด้วย XRD แบบ GIXD ที่มุม 5 องศา (รูปที่ 4.6) พบว่าพีคที่เกิดขึ้นของชิ้นงานทั้ง 4 เวลา จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับพีคของชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวที่ 800 องศาเซลเซียส โดยจะเกิดพีคของเฟส 2 เฟส คือ เฟส  $Ni_2Al_3$  และ  $NiAl_3$  (JCPDS No. 03-1052 และ 02-0416) ซึ่งพีคของเฟส  $Ni_2Al_3$  จะมีค่าความเข้มสัมพัทธ์สูงสุดที่สูงสุด นั่นแสดงให้เห็นว่าเฟสหลักที่เกิดขึ้นบริเวณผิวชั้นเคลือบเมื่อทำการเคลือบผิวด้วยอุณหภูมิ 900

องศาเซลเซียส ที่เวลาต่างๆ เป็นเฟส  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  เช่นเดียวกัน ซึ่งหากพิจารณาผลการตรวจสอบชั้นเคลือบของทั้งสองอุณหภูมิ จะพบว่าแม้เวลาในการเคลือบผิวเพิ่มขึ้น ลักษณะของพีคที่ได้ก็จะไม่แตกต่างกัน โดยเฟสที่เกิดขึ้นจะมี  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  เป็นเฟสหลักและมี  $\text{NiAl}_3$  เป็นเฟสรอง

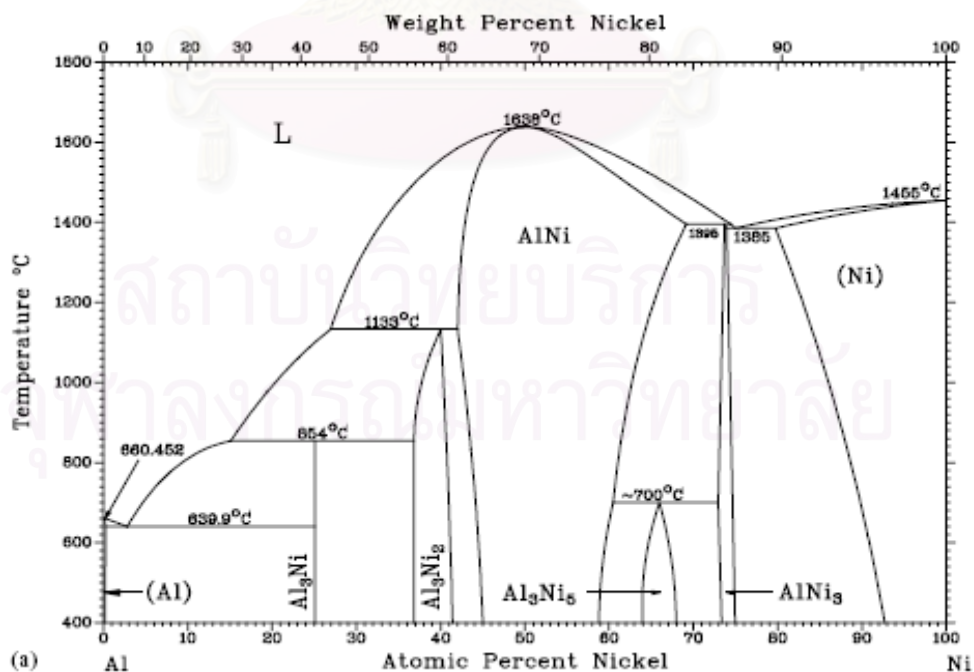


รูปที่ 4.6 ผลการเปรียบเทียบการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในซีงบน IN 738 ที่ 900°C เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง ด้วยวิธี GIXD



รูปที่ 4.7 ผลการเปรียบเทียบการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในซีงบน IN 738 ที่ 1000°C เป็นเวลา 1, 2.25 และ 4 ชั่วโมง ด้วยวิธี GIXD

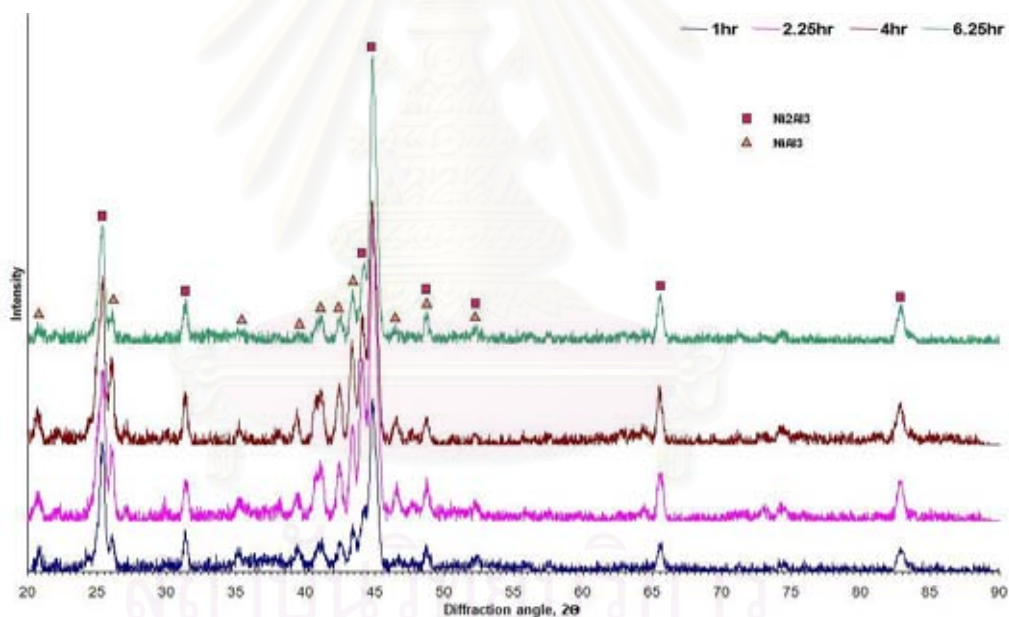
ในส่วนของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 ที่ผ่านการเคลือบผิวที่ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25 และ 4 ชั่วโมง เมื่อนำมาทำการตรวจสอบด้วย XRD แบบ GIXD ที่มุม 5 องศา จะเกิดพีคของเฟส 2 ชนิด คือเฟส  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  และเฟส  $\text{NiAl}_3$  โดยพีคที่มีความเข้มสัมพัทธ์สูงสุดจะเป็นพีคของเฟส  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  เช่นกัน (รูปที่ 4.7) แต่เมื่อพิจารณาลักษณะของพีคที่เกิดขึ้น โดยเปรียบเทียบกับพีคของชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวที่ 800 และ 900 องศาเซลเซียส พบว่า พีคของเฟส  $\text{NiAl}_3$  บางพีคหายไป รวมทั้งค่าความเข้มสัมพัทธ์ของพีคของเฟส  $\text{NiAl}_3$  ลดลง แสดงให้เห็นว่าเฟสหลักที่เกิดขึ้นในชั้นเคลือบหลังจากผ่านการเคลือบผิวด้วยวิธีอะลูมิเนียมในเชิงแบบผงที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส คือ  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  และมีปริมาณของเฟส  $\text{NiAl}_3$  ลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งหากพิจารณาแผนภูมิสมดุลของนิกเกิลและอะลูมิเนียมในรูปที่ 4.8 จะเห็นว่าเฟส  $\text{NiAl}_3$  จะไม่เสถียรที่อุณหภูมิสูงกว่า 854 องศาเซลเซียส ดังนั้นเมื่อทำการเคลือบผิวชิ้นงานที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ทำให้มีเฟส  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  เป็นหลัก และพบเฟส  $\text{NiAl}_3$  เล็กน้อย ดังจะเห็นได้จากความเข้มสัมพัทธ์ของเฟส  $\text{NiAl}_3$  มีค่าลดลงมากเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวที่ 800 และ 900 องศาเซลเซียส จึงกล่าวได้ว่าสารประกอบ  $\text{NiAl}_3$  จึงมีปริมาณลดลงเมื่อใช้อุณหภูมิสูงขึ้น โดยเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 854 องศาเซลเซียสจึงไม่สามารถเกิดเฟส  $\text{NiAl}_3$  ได้ อย่างไรก็ตามเฟส  $\text{NiAl}_3$  ที่พบอาจเกิดขึ้นระหว่างการเย็นตัวของชิ้นงานหลังจากการเคลือบซึ่งเย็นตัวลงอย่างช้าๆภายในเตา จึงทำให้ยังคงพบสารประกอบ  $\text{NiAl}_3$  ได้ในชิ้นงานที่ผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงแบบผงที่อุณหภูมิสูงกว่า 854 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.8 แผนภูมิสมดุลของนิกเกิลและอะลูมิเนียม

#### 4.2.2 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบบนโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้มนิกเกิลชนิด GTD 111

จากผลการตรวจสอบรูปร่างและลักษณะพื้นผิวของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้มนิกเกิลชนิด IN 738 ที่ผ่านการเคลือบผิวที่ 800, 900 และ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลาต่างๆ พบว่า ชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส จะมีลักษณะชั้นเคลือบที่หนา มีการแตกและหลุดร่อนได้ง่าย ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาชั้นเคลือบของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้มนิกเกิลชนิด GTD 111 ที่อุณหภูมิเดียว คือ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลาต่างๆ จากนั้นเมื่อนำมาตรวจสอบชั้นเคลือบด้วย XRD แบบ GIXD ที่มุม 5 องศา จะเกิดพิกัดรูปที่ 4.9 พิกัดจะมีลักษณะคล้ายกับพิกัดของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้มนิกเกิลชนิด IN 738 ที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ที่เวลาต่างๆ โดยจะเกิดพิกัดของเฟส 2 เฟส คือ เฟส  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  และ  $\text{NiAl}_3$  (JCPDS No. 03-1052 และ 02-0416) และพิกัดที่มีความเข้มสัมพัทธ์สูงที่สุดเป็นพิกัดของเฟส  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  นั่นคือ เฟสหลักที่เกิดขึ้นบริเวณผิวชั้นเคลือบเมื่อทำการเคลือบผิวด้วยอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ที่เวลาต่างๆ เป็นเฟส  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$



รูปที่ 4.9 ผลการเปรียบเทียบการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบน GTD 111 ที่ 900°C เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6 ชั่วโมง ด้วยวิธี GIXD

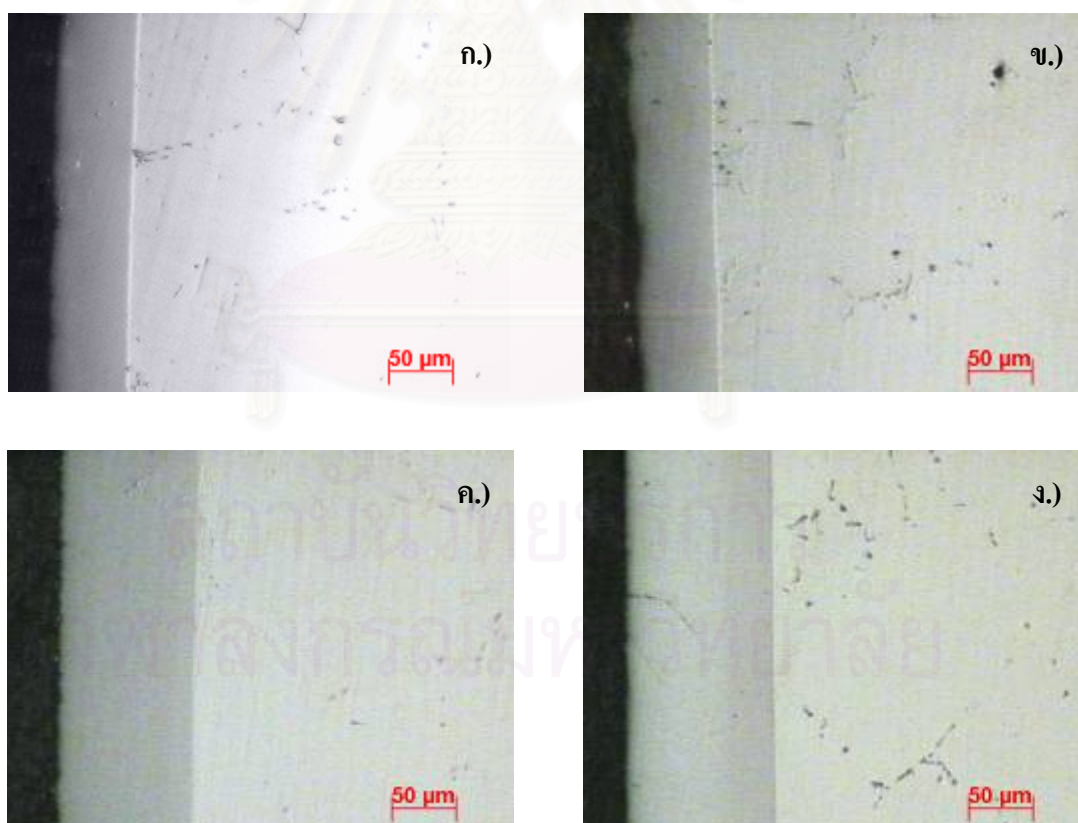
สาเหตุที่ลักษณะพิกัดที่เกิดขึ้นของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้มนิกเกิลชนิด GTD 111 มีลักษณะคล้ายกับพิกัดของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้มนิกเกิลชนิด IN 738 คือ เกิดสารประกอบเฟส  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  เป็นหลักและพบ  $\text{NiAl}_3$  เช่นเดียวกับโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้มนิกเกิลชนิด IN 738 เพราะโลหะผสมพิเศษทั้งสองชนิดมีส่วนผสมหลักคือ นิกเกิลในปริมาณที่ใกล้เคียงกันจึงเกิดเฟสนิกเกิลอะลูมิเนียมในหลักเช่นเดียวกัน และเกิดเฟส เฟส  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  เป็นหลัก เนื่องจากเฟส  $\text{NiAl}_3$  นั้นไม่เสถียรที่อุณหภูมิสูง

กว่า 854 องศาเซลเซียส แต่อาจเกิดขึ้นเฟส  $\text{NiAl}_3$  ขึ้นระหว่างการเย็นตัวเช่นเดียวกับที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.2.1 ส่วนสารประกอบอื่นที่เกิดขึ้นก็มีลักษณะไม่แตกต่างจากโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้ นิกเกิลชนิด IN 738 เนื่องจากมีธาตุผสมทางเคมีที่คล้ายกันและมีปริมาณใกล้เคียงกัน จึงทำให้เมื่อทำการเคลือบผิวที่อุณหภูมิเดียวกัน พิกที่เกิดขึ้นมีลักษณะเหมือนกัน

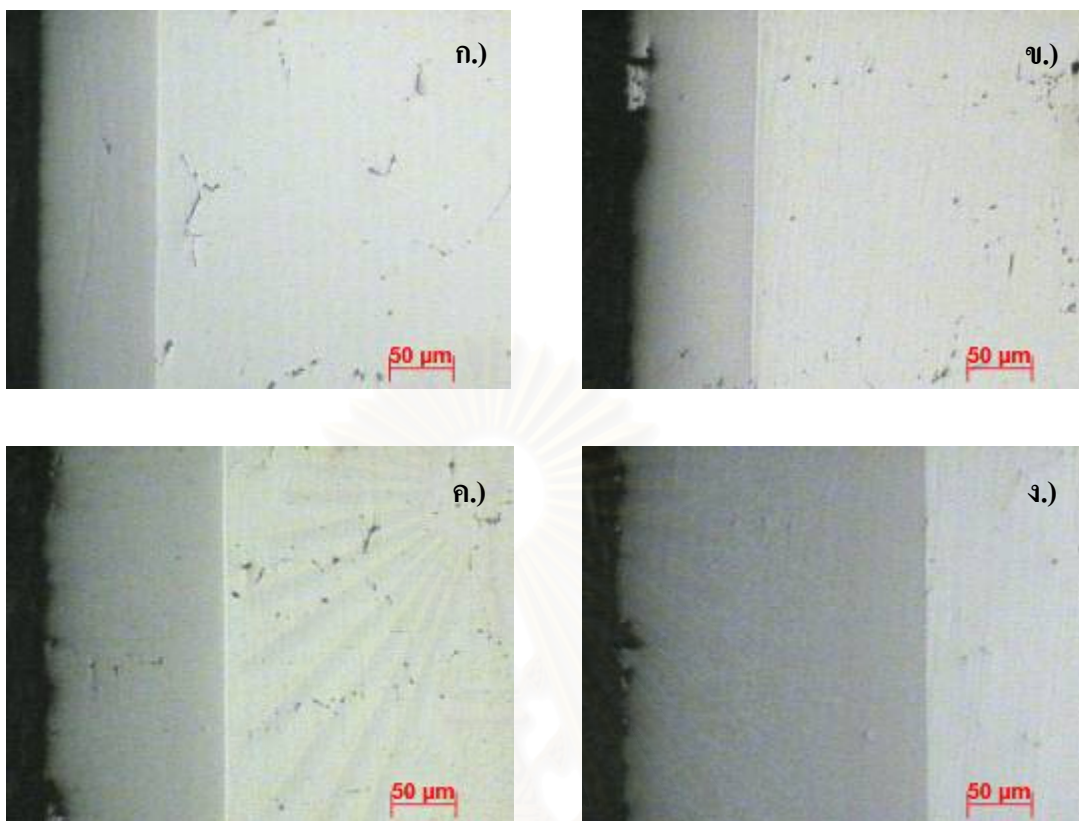
#### 4.3 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวางของชั้นเคลือบก่อนทำการอบเป็นเนื้อเดียว

##### 4.3.1 โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบบนโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้ นิกเกิลชนิด IN 738

เมื่อนำโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้ นิกเกิลชนิด IN 738 ที่ทำการเคลือบผิวด้วยอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง มาตัดขวาง จากนั้นทำการตรวจสอบชั้นเคลือบด้วยกล้อง Optical Microscope จะเห็นว่าชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวที่ 800 องศาเซลเซียส ด้วยเวลาต่างๆ ลักษณะชั้นเคลือบสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ ชั้นเคลือบด้านนอกจะมีสีเทาเข้มและสีเทาอ่อนขนาดเล็กละเอียด และชั้นเคลือบด้านในจะมีสีเทาเข้ม ดังรูปที่ 4.10



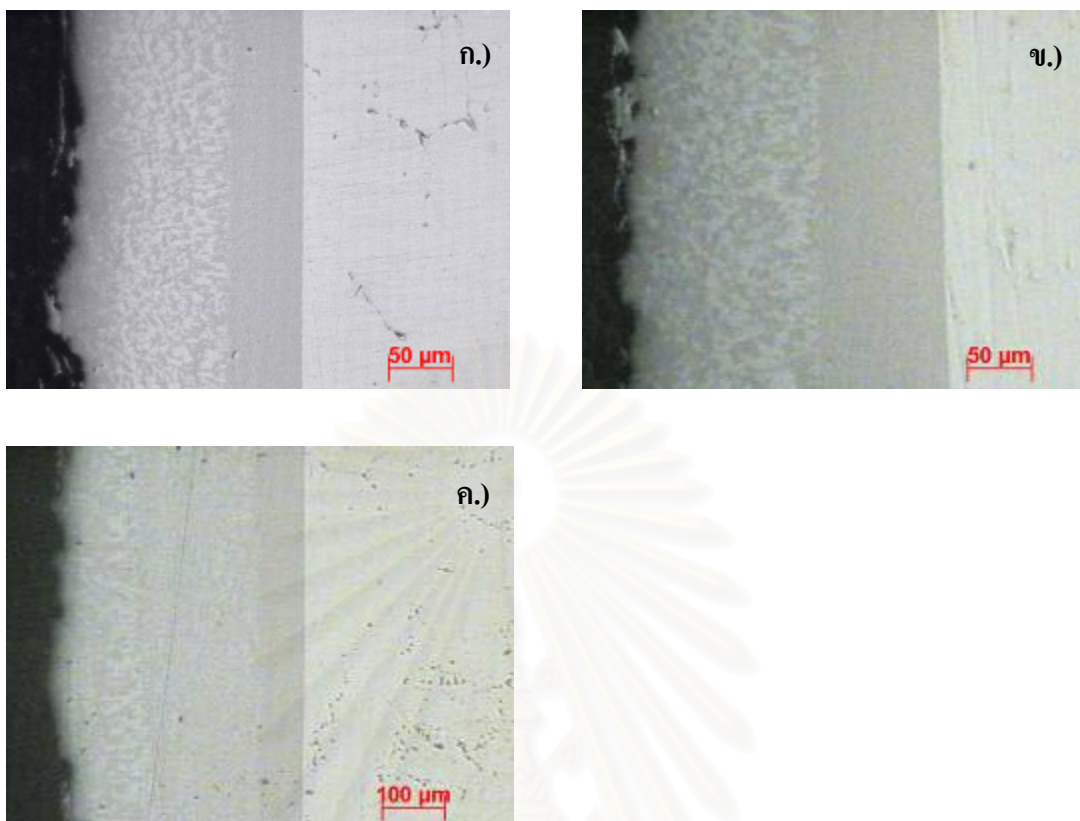
รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายโครงสร้างบริเวณกลางชิ้นงาน โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้ นิกเกิลชนิด IN 738 ที่ทำการเคลือบผิวที่ 800 °C เป็นเวลา ก.) 1 ข.) 2.25 ค.) 4 และ ง.) 6.25 ชั่วโมง



รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายโครงสร้างบริเวณกลางชิ้นงาน โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 ที่ทำการเคลือบผิวที่  $900^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา ก.) 1 ข.) 2.25 ค.) 4 และ ง.) 6.25 ชั่วโมง

ในส่วนของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 ที่ทำการเคลือบผิวด้วยอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง เมื่อนำมาตัดขวางแล้วตรวจด้วยกล้อง Optical Microscope จะเห็นว่า ชั้นเคลือบของชิ้นงานทั้ง 4 เวลา สามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วน เช่นเดียวกับชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส คือบริเวณชั้นเคลือบด้านนอกจะมีสีเทาเข้มและสีเทาอ่อนขนาดเล็กลับกัน ส่วนชั้นเคลือบด้านในจะมีสีเทาเข้ม ดังรูปที่ 4.11

ในรูปที่ 4.12 โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 ที่ทำการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25 และ 4 ชั่วโมง เมื่อนำมาตัดขวางแล้วทำการตรวจสอบ พบว่า ชั้นเคลือบที่ได้จะเปราะและหลุดร่อนเป็นแผ่น เมื่อตรวจสอบด้วยกล้อง Optical Microscope ลักษณะชั้นเคลือบของชิ้นงานทั้ง 3 เวลา สามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วน เช่นเดียวกับชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวที่ 800 และ 900 องศาเซลเซียส คือ ลักษณะชั้นเคลือบจะแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ บริเวณผิวนอกจะมีสีเทาเข้มและสีเทาอ่อนสลับกัน โดยส่วนสีเทาอ่อนจะมีปริมาณมากขึ้นและเห็นได้ชัดเจนกว่าชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวที่ 800 และ 900 องศาเซลเซียส ในส่วนของบริเวณชั้นเคลือบด้านใน จะมีสีเทาเข้มเช่นเดียวกัน และเมื่อเวลาในการเคลือบผิวเพิ่มขึ้นบริเวณที่มีสีเทาเข้มสลับสีเทาอ่อนจะเพิ่มขึ้น



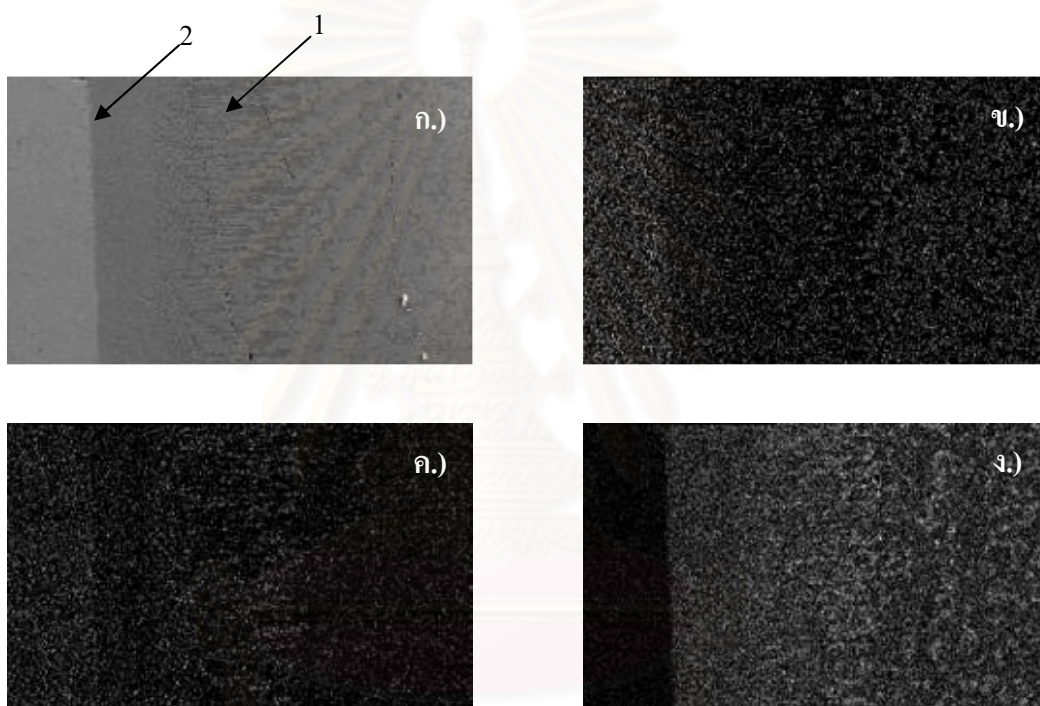
รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายโครงสร้างบริเวณกลางชิ้นงาน โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิลชนิด IN 738 ที่ทำการเคลือบผิวที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา ก.) 1 ข.) 2.25 และ ค.) 4 ชั่วโมง

จากผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคตัดขวาง พบว่า เวลาที่ใช้ในการเคลือบผิว จะไม่มีผลต่อลักษณะชั้นเคลือบมากนัก กล่าวคือ ชั้นเคลือบประกอบด้วยสองเฟส คือ เฟส  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  และ  $\text{NiAl}_3$  โดยการเพิ่มเวลาขึ้นในแต่ละอุณหภูมิยังคงได้เฟสที่พบในโครงสร้างจุลภาคไม่แตกต่างกันแต่จะให้ความหนาชั้นเคลือบที่แตกต่างกันซึ่งสอดคล้องกับผลการตรวจสอบชั้นเคลือบด้วยวิธี XRD แบบ GIXD ที่พีคของชิ้นงานที่เคลือบผิวในแต่ละอุณหภูมิมิมีลักษณะเหมือนกัน แม้เวลาในการเคลือบผิวจะแตกต่างกัน

ในขณะที่อุณหภูมิในการเคลือบผิวจะมีผลต่อลักษณะชั้นเคลือบ คือ ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ชั้นเคลือบด้านนอกจะมีโครงสร้างสี่เหลี่ยมและสี่เหลี่ยมที่มีขนาดใหญ่กว่าโครงสร้างจุลภาคที่ได้จากการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส กล่าวคือ ขนาดเกรนแต่ละเฟสมีขนาดใหญ่ขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการทำอะลูมิเนียมในซิงที่สูงขึ้น และ ช่วงการเย็นตัวจากอุณหภูมิอะลูมิเนียมในซิงถึงอุณหภูมิห้องภายในเตา ซึ่งที่อุณหภูมิอะลูมิเนียมในซิงสูงจะนานกว่าที่อุณหภูมิอะลูมิเนียมในซิงต่ำ อย่างไรก็ตามจากผลการตรวจสอบด้วย XRD แบบ GIXD ในรูปที่ 4.5-4.7 แสดงให้เห็นว่าเฟสที่เกิดขึ้นยังคงเป็นเฟส  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  และ  $\text{NiAl}_3$  ทั้งที่การเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 800, 900 และ 1000 องศาเซลเซียส จึงได้เลือกชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4

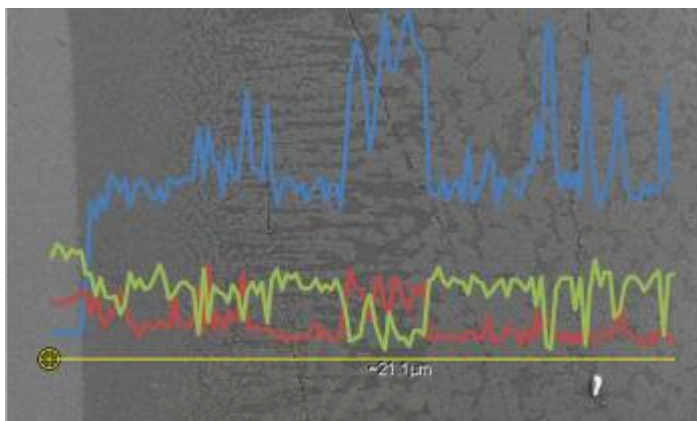


ชั่วโมง เพื่อตรวจสอบเชิงปริมาณของธาตุต่างๆในโครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบ เนื่องจากเฟสที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่ ทำให้ตรวจสอบได้แม่นยำกว่าชิ้นงานที่ชั้นเคลือบมีเกรนละเอียดของชิ้นงาน อะลูมิเนียมในซิงที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส โดยได้ทำการตรวจสอบเฟสสีเทาเข้มและสีเทาอ่อนในโครงสร้างจุลภาคตัดขวางด้วยวิธี EDS แสดงผลแบบ Mapping ในรูปที่ 4.13 จากผลการตรวจสอบพบว่า บริเวณหมายเลข 1 (สีเทาเข้ม) จะมีปริมาณของนิกเกิลน้อยกว่าบริเวณหมายเลข 2 (สีเทาอ่อน) ในขณะที่ปริมาณอะลูมิเนียมและ โครเมียมบริเวณหมายเลข 1 จะมีมากกว่าบริเวณหมายเลข 2



รูปที่ 4.13 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานชนิด IN 738 ที่ทำการเคลือบผิวที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยวิธี Mapping EDS ก.) SEM ข.) นิกเกิล ค.) โครเมียม และ ง.) อะลูมิเนียม

หลังจากนั้นทำการตรวจสอบด้วยวิธี EDS แบบ Linescan พบว่า ผลที่ได้มีลักษณะเหมือนกัน คือ ปริมาณนิกเกิลจะมีมากที่บริเวณเนื้อพื้น และมีค่าลดลงในบริเวณชั้นเคลือบหมายเลข 2 (สีเทาอ่อน) และหมายเลข 1 (สีเทาเข้ม) ตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณของอะลูมิเนียมจะมีจำนวนมากที่สุดที่บริเวณที่มีสีเทาเข้ม และจะมีปริมาณลดลงในบริเวณเทาอ่อนและเนื้อพื้นตามลำดับ และปริมาณของโครเมียมจะมีมากในบริเวณชั้นเคลือบที่มีสีเทาเข้ม (รูปที่ 4.14)



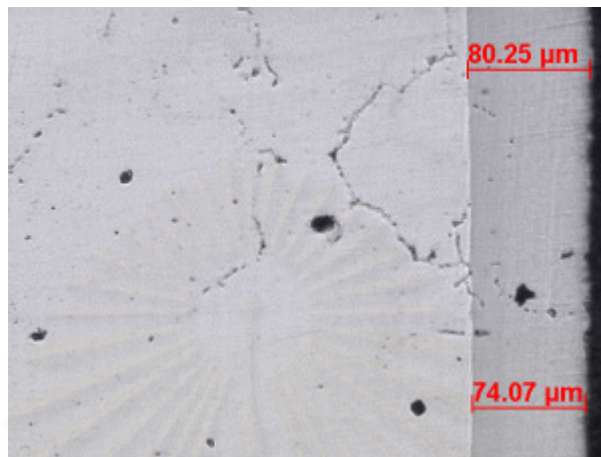
รูปที่ 4.14 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบนโลหะนิกเกิลชนิด IN 738 ที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยวิธี EDS แบบ Linescan (สีฟ้า-อะลูมิเนียม, สีเหลือง-นิกเกิล, สีแดง-โครเมียม)

จากผลของลักษณะชั้นเคลือบของชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวด้วยอุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง บริเวณชั้นเคลือบด้านนอกจะมีปริมาณของชั้นเคลือบสีเทาเข้ม (หมายเลข 1) จำนวนมาก และเมื่อตรวจสอบปริมาณนิกเกิลในชั้นเคลือบสีเทาเข้ม (หมายเลข 1) ก็พบว่าปริมาณที่น้อยกว่าชั้นเคลือบสีเทาอ่อน (หมายเลข 2) ในขณะที่ปริมาณอะลูมิเนียมในชั้นเคลือบสีเทาเข้ม (หมายเลข 1) มีปริมาณสูงกว่าชั้นเคลือบสีเทาอ่อน (หมายเลข 2) ดังนั้น บริเวณชั้นเคลือบด้านนอกจึงมีโครงสร้างเป็นเฟส  $\text{NiAl}_3$  และ ชั้นเคลือบด้านในจะมีโครงสร้างเป็นเฟส  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  ซึ่งเมื่อตรวจสอบด้วย XRD แบบ GIXD จึงพบพีคของ 2 เฟส คือ เฟส  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  และ  $\text{NiAl}_3$  นอกจากนี้การตรวจสอบในรูปที่ 4.14 พบว่าในเฟส  $\text{NiAl}_3$  มีปริมาณโครเมียมผสมอยู่ และจากผล XRD ไม่พบพีคของโครเมียมอะลูมิเนียมไนด์ จึงสรุปได้ว่าโครเมียมละลายอยู่ในเฟส  $\text{NiAl}_3$  โดยไม่ตกผลึกออกมาเป็นสารประกอบโครเมียมอะลูมิเนียมไนด์

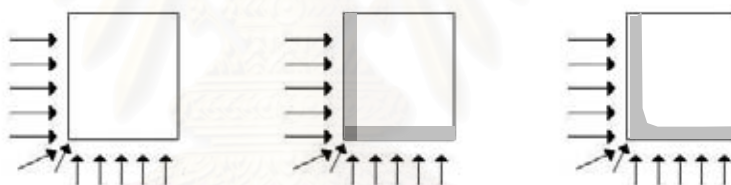
เนื่องจากลักษณะชั้นเคลือบของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 ที่ทำการเคลือบผิวด้วยอุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส มีลักษณะที่เหมือนกับลักษณะชั้นเคลือบของชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวที่ 1000 องศาเซลเซียส จึงอาจกล่าวได้ว่า บริเวณชั้นเคลือบด้านนอกจึงมีโครงสร้างเป็นเฟส  $\text{NiAl}_3$  และ ชั้นเคลือบด้านในจะมีโครงสร้างเป็นเฟส  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  ซึ่งเมื่อตรวจสอบด้วย XRD แบบ GIXD จึงพบพีคของ 2 เฟส คือ เฟส  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  และ  $\text{NiAl}_3$  เช่นเดียวกัน

จากนั้นได้ทำการตรวจสอบลักษณะความหนาของชิ้นงาน พบว่า ชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวด้วยอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ที่เวลา 2.25, 4 และ 6 ชั่วโมง จะมีความหนาบบริเวณกลางชิ้นงานสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 4.10 โดยเมื่อเพิ่มเวลาในการเคลือบผิว จะส่งผลให้ความหนาชั้นเคลือบเพิ่มขึ้น แต่บริเวณขอบชิ้นงานจะมีความหนามากกว่าบริเวณกลางชิ้นงาน (รูปที่ 4.15) ซึ่งเกิดเนื่องจากอะลูมิเนียมที่แพร่เข้าสู่ชิ้นงานบริเวณขอบจะมีการแพร่จาก 2 ทิศทาง ดังรูปที่ 4.16 ทำให้ปริมาณ

อะลูมิเนียมบริเวณขอบชิ้นงานมีมากกว่ากลางชิ้นงาน ดังนั้นชั้นเคลือบบริเวณขอบชิ้นงานจึงมีความหนามากกว่ากลางชิ้นงาน



รูปที่ 4.15 ภาพถ่ายโครงสร้างบริเวณขอบชิ้นงาน โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 ที่ทำการเคลือบผิวที่ 800 °C เป็นเวลา 2.25 ชั่วโมง

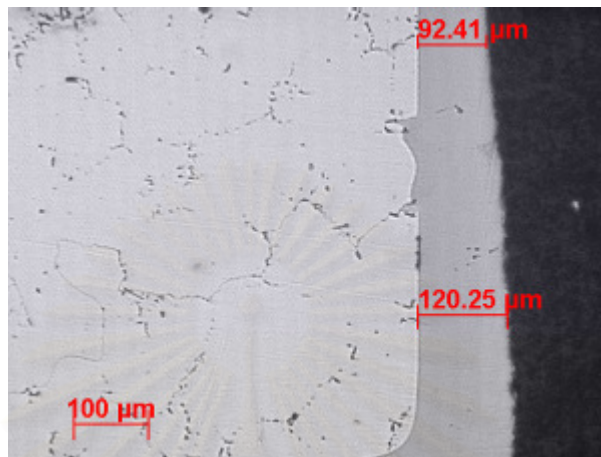


รูปที่ 4.16 ภาพแสดงทิศทางการแพร่ของอะลูมิเนียมเข้าสู่ชิ้นงาน

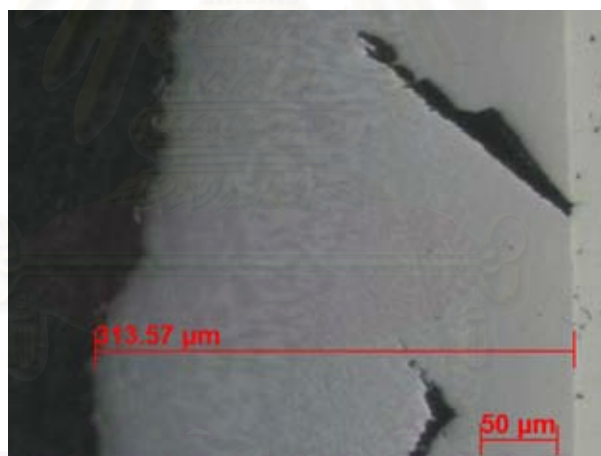
เมื่อพิจารณาโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 ที่ทำการเคลือบผิวด้วยอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง พบว่า ชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวที่เวลา 1 ชั่วโมง บริเวณกลางชิ้นงานจะมีความหนาชั้นเคลือบสม่ำเสมอ (รูปที่ 4.11) และจะมีความหนาเพิ่มมากขึ้นในบริเวณส่วนขอบชิ้นงาน (รูปที่ 4.17) เช่นเดียวกับโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลที่ทำการเคลือบผิวด้วยอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาความหนาชั้นเคลือบที่เวลาการเคลือบผิวต่างๆ พบว่าความหนาจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการเคลือบผิวเพิ่มขึ้น

โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 ที่ทำการเคลือบผิวด้วยอุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25 และ 4 ชั่วโมง เมื่อทำการตรวจสอบความหนา พบว่า จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับลักษณะชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นเมื่อทำการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส คือ บริเวณกลางชิ้นงานจะมีความหนาชั้นเคลือบสม่ำเสมอ (รูปที่ 4.12) และจะมีความ

หนาเพิ่มมากขึ้นในบริเวณส่วนขอบชิ้นงาน (รูปที่ 4.18) เมื่อพิจารณาความหนาชั้นเคลือบที่เวลาการเคลือบผิวต่างๆ พบว่าความหนาจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการเคลือบผิวเพิ่มขึ้น



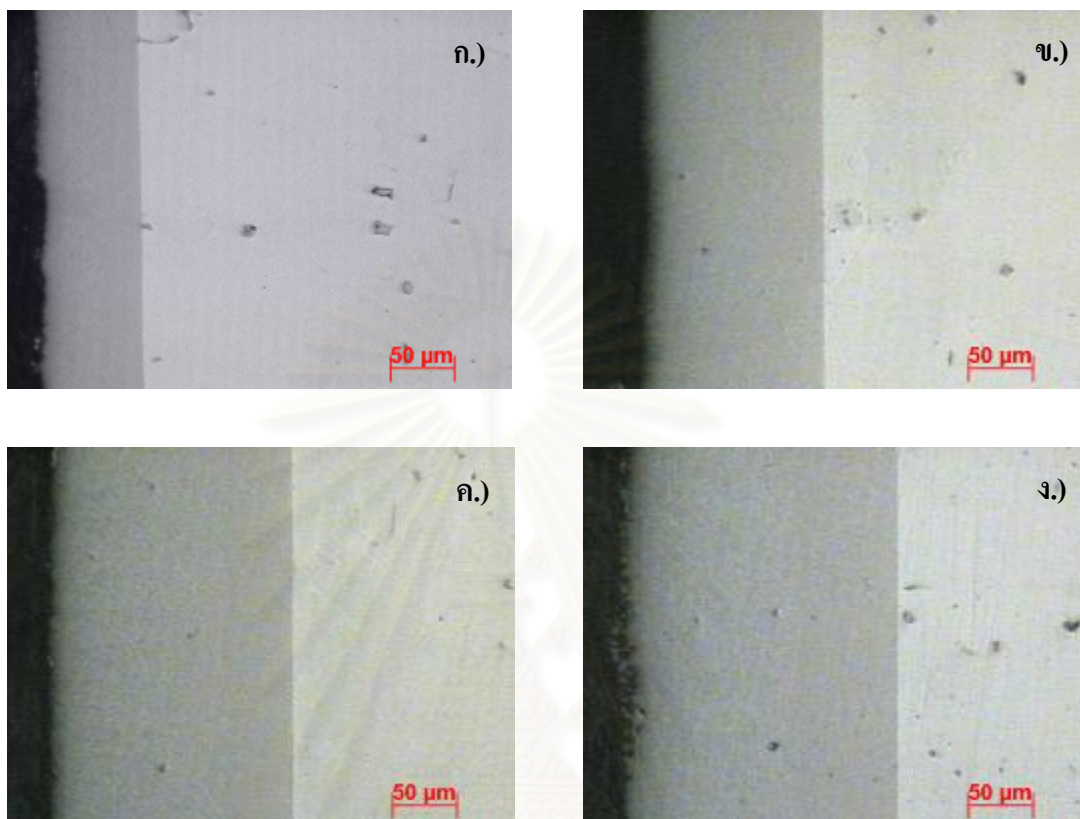
รูปที่ 4.17 ภาพถ่ายโครงสร้างบริเวณขอบชิ้นงาน โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 ที่ทำการเคลือบผิวที่  $900^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2.25 ชั่วโมง



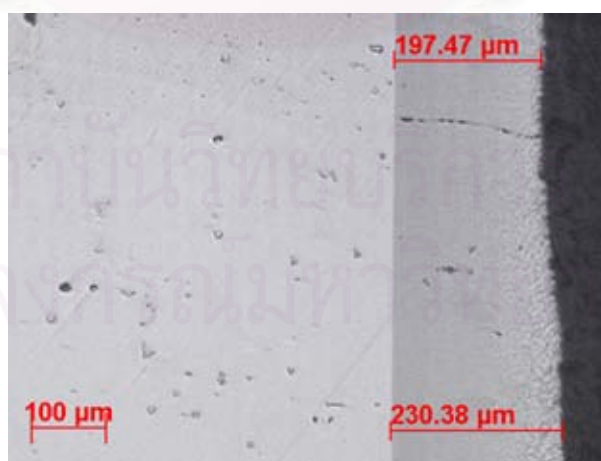
รูปที่ 4.18 ภาพถ่ายโครงสร้างบริเวณขอบชิ้นงาน โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 ที่ทำการเคลือบผิวที่  $1000^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 2.25 ชั่วโมง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.3.2 โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบบนโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้มนิกเกิลชนิด GTD 111



รูปที่ 4.19 ภาพถ่ายโครงสร้างบริเวณกลางชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้มนิกเกิลชนิด GTD 111 ที่ทำการเคลือบผิวที่ 900 °C เป็นเวลา ก.) 1 ข.) 2.25 ค.) 4 และ ง.) 6.25 ชั่วโมง



รูปที่ 4.20 ภาพถ่ายโครงสร้างบริเวณขอบชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้มนิกเกิลชนิด GTD 111 ที่ทำการเคลือบผิวที่ 900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

เมื่อพิจารณาโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลชนิด GTD 111 ที่ทำการเคลือบผิวด้วยอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง โดยนำมาตัดขวาง แล้วทำการตรวจสอบชั้นเคลือบด้วยกล้อง Optical Microscope จะเห็นว่าชั้นงานที่ทำการเคลือบผิวที่ 900 องศาเซลเซียส ด้วยเวลาต่างๆ ลักษณะชั้นเคลือบสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ ชั้นเคลือบด้านนอกจะมีสีเทาเข้ม และสีเทาอ่อนขนาดเล็กลับกัน และชั้นเคลือบด้านในจะมีสีเทาเข้ม ดังรูปที่ 4.19 โดยมีลักษณะชั้นเคลือบเหมือนกับชั้นเคลือบของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิล ชนิด IN 738 ที่ทำการเคลือบผิวด้วยอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ดังนั้น บริเวณชั้นเคลือบด้านนอกจึงมีโครงสร้างเป็นเฟส  $\text{NiAl}_3$  และชั้นเคลือบด้านในจะมีโครงสร้างเป็นเฟส  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  ซึ่งจะสอดคล้องกับผล XRD ที่มีการพบพีคของ 2 เฟส คือ เฟส  $\text{Ni}_2\text{Al}_3$  และ  $\text{NiAl}_3$  เช่นเดียวกัน

เมื่อทำการตรวจสอบความหนาชั้นเคลือบบริเวณกลางชิ้นงาน จะมีความหนาชั้นเคลือบสม่ำเสมอ และบริเวณส่วนขอบชิ้นงานจะมีชั้นเคลือบที่หนากว่าบริเวณกลางชิ้นงานเพราะมีปริมาณอะลูมิเนียมแพร่เข้าสู่ขอบชิ้นงานเป็นจำนวนมากกว่า

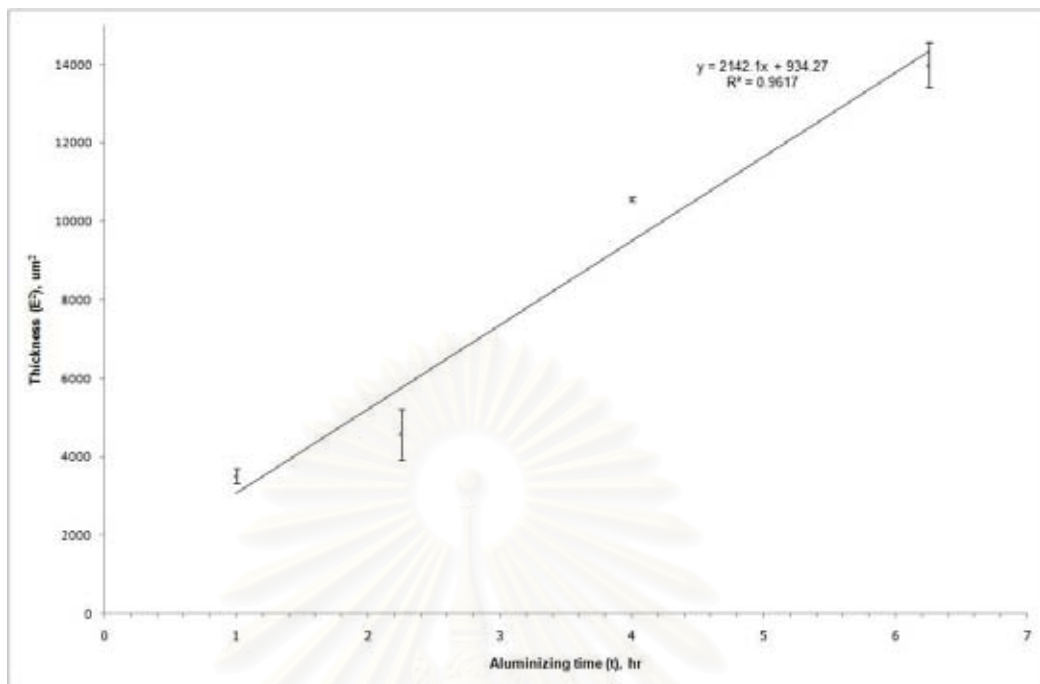
#### 4.4 ผลการตรวจสอบความหนาชั้นเคลือบก่อนทำการอบเป็นเนื้อเดียว

##### 4.4.1 ความหนาชั้นเคลือบบนโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลชนิด IN 738

เมื่อนำโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลชนิด IN 738 ที่ทำการเคลือบผิวด้วยอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง มาทำการวัดความหนาชั้นเคลือบ จะพบว่าเมื่อเวลาในการเคลือบผิวเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ความหนาของชั้นเคลือบเพิ่มขึ้น โดยจะมีค่าความหนาเฉลี่ยเป็น 59.23, 67.55, 102.86 และ 118.25  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ (ตารางที่ 4.1) จากนั้นเมื่อเขียนกราฟระหว่างค่าความหนาชั้นเคลือบยกกำลังสองต่อเวลาในการทำการเคลือบผิว พบว่าจะได้กราฟที่มีแนวโน้มเป็นเส้นตรงดังรูปที่ 4.21 โดยความชันของกราฟที่ได้จะมีค่าเท่ากับ 2142.1

ตารางที่ 4.1 แสดงความหนาชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในชิ้นบน IN 738 ที่อุณหภูมิ 800°C เป็นเวลา 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง

เวลาที่ใช้ในการเคลือบผิว (ชั่วโมง)	ความหนาของชั้นเคลือบ ( $\mu\text{m}$ )	SD
1.00	59.23	1.57
2.25	67.55	4.66
4.00	102.86	0.26
6.25	118.25	2.41

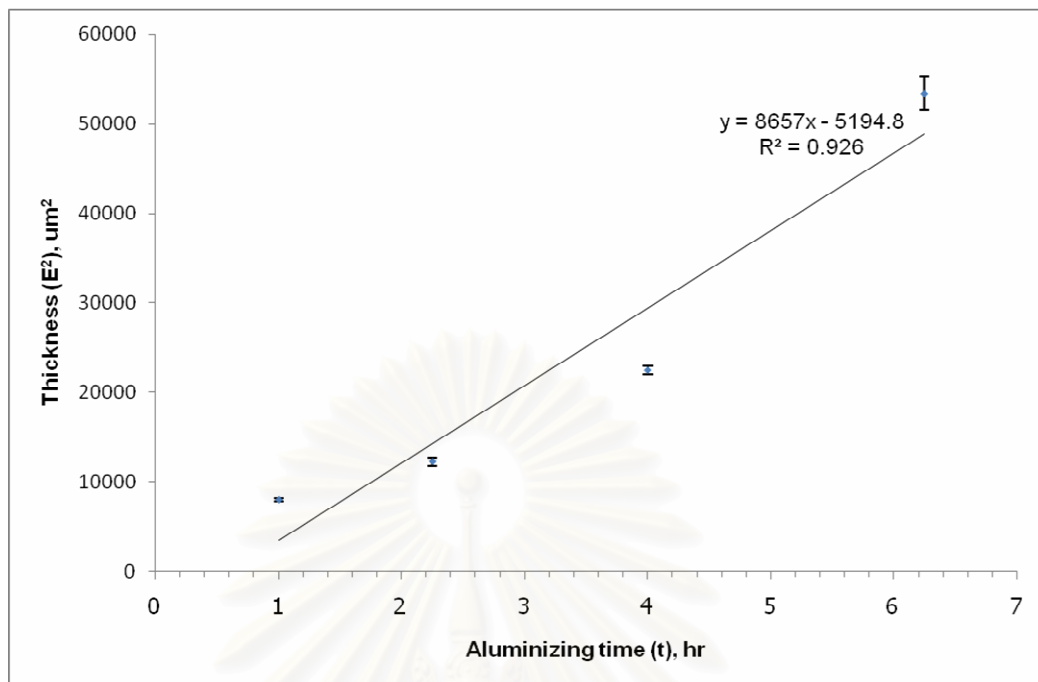


รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความหนาชั้นเคลือบต่อเวลาของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิงบน IN 738 ที่อุณหภูมิ 800°C

จากนั้นทำการตรวจสอบความหนาของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้กเกิดชนิด IN 738 ที่ทำการเคลือบผิวด้วยอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง พบว่า เมื่อเวลาในการเคลือบผิวเพิ่มขึ้น จะมีค่าความหนาเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้กเกิดชนิด IN 738 ที่ทำการเคลือบผิวด้วยอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส โดยจะมีความหนาเฉลี่ยเป็น 89.41, 110.71, 149.85 และ 231.02  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ (ตารางที่ 4.2) และเมื่อเขียนกราฟระหว่างค่าความหนาชั้นเคลือบยกกำลังสองและเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิว จะพบว่า กราฟที่ได้มีแนวโน้มเป็นเส้นตรงเช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.22 โดยความชันของกราฟ มีค่า เท่ากับ 8657

ตารางที่ 4.2 แสดงความหนาชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิงบน IN 738 ที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง

เวลาที่ใช้ในการเคลือบผิว (ชั่วโมง)	ความหนาของชั้นเคลือบ ( $\mu\text{m}$ )	SD
1.00	89.41	1.07
2.25	110.71	2.14
4.00	149.85	1.68
6.25	231.02	3.98



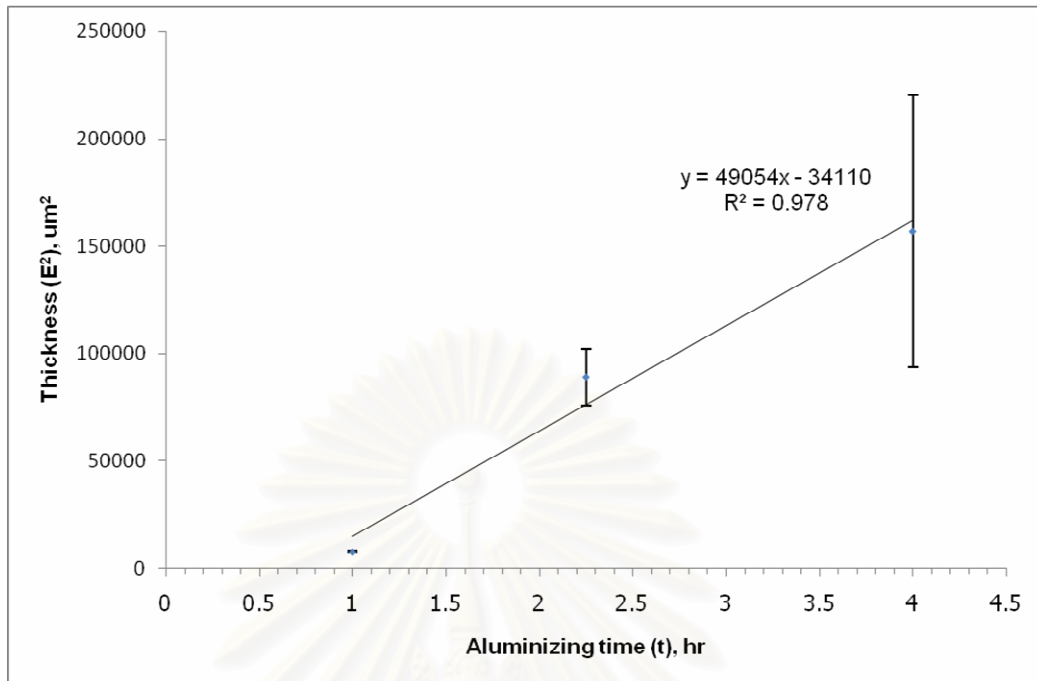
รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความหนาชั้นเคลือบต่อเวลาของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิงบน IN 738 ที่อุณหภูมิ 900°C

ในส่วนของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้มนิกเกิลชนิด IN 738 ที่ทำการเคลือบผิวด้วยอุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25 และ 4 ชั่วโมง เมื่อทำการตัดชิ้นงานแล้ววัดความหนา จะได้ว่าค่าความหนาเฉลี่ยของชั้นเคลือบจะเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาในการเคลือบผิวเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าความหนาเฉลี่ยที่ตรวจสอบได้มีค่าเท่ากับ 86.65, 297.68 และ 389.56  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.3 จากนั้นเมื่อนำค่าความหนาเฉลี่ยยกกำลังสองและเวลาในการเคลือบผิวมาเขียนกราฟ ก็จะได้กราฟที่มีแนวโน้มเป็นเส้นตรง ดังรูปที่ 4.23 และมีค่าความชันของกราฟเท่ากับ 49054

ตารางที่ 4.3 แสดงความหนาชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิงบน IN 738 ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 1, 2.25 และ 4 ชั่วโมง

เวลาที่ใช้ในการเคลือบผิว (ชั่วโมง)	ความหนาของชั้นเคลือบ ( $\mu\text{m}$ )	SD
1.00	86.65	3.15
2.25	297.68	22.70
4.00	389.56	82.01
6.25	-	-





รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความหนาชั้นเคลือบต่อเวลาของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในซิงบน IN 738 ที่อุณหภูมิ 1000<sup>o</sup>C

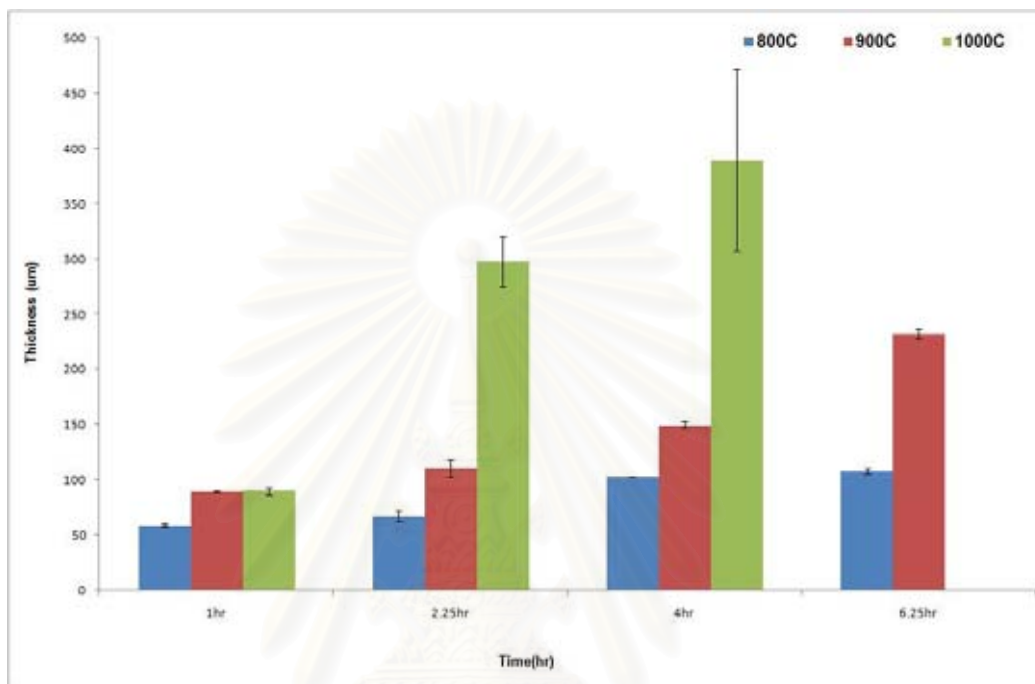
จากผลการตรวจสอบกราฟระหว่างค่าความหนาชั้นเคลือบยกกำลังสองต่อเวลาในการเคลือบผิวของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้มนิกเกิลชนิด IN 738 ที่ทำการเคลือบผิวด้วยอุณหภูมิ 800, 900 และ 1000 องศาเซลเซียส ข้างต้นพบว่า ค่าความหนาเฉลี่ยยกกำลังสอง (E<sup>2</sup>) จะมีค่าแปรผันตามอุณหภูมิ (t) ดังนั้นกลไกการเกิดชั้นเคลือบในกระบวนการ Pack-Aluminizing จึงเป็นแบบ Diffusion Control โดยมีอะลูมิเนียมแพร่ในนิกเกิล ดังที่ Wagner ได้ทำการศึกษาไว้ว่า เมื่อกลไกการเกิดชั้นเคลือบเป็นแบบ Diffusion control ความหนาที่ได้จะมีค่าเป็นสัดส่วนกับเวลา ดังสมการที่ 5.1

$$E^2 = 2k't \quad (5.1)$$

โดยค่า k' คือ ค่า Tammann's constant และเมื่อเปรียบเทียบกับสมการของ Wagner กับ สมการของกราฟที่ได้จากการเคลือบผิวโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้มนิกเกิลชนิด IN 738 ด้วยอุณหภูมิ 800, 900 และ 1000 องศาเซลเซียส จะได้ว่า ความชันของกราฟมีค่า 2k' ดังนั้นค่า Tammann's constant ของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้มนิกเกิลชนิด IN 738 ที่ทำการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 800, 900 และ 1000 องศาเซลเซียส จะมีค่าเท่ากับ 1071.05, 4328.5 และ 24527 ตามลำดับ

จากผลการตรวจความหนาชั้นเคลือบของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้มนิกเกิลชนิด IN 738 เมื่อทำการเคลือบผิวด้วยอุณหภูมิ 800, 900 และ 1000 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่อเวลาที่ใช้ในการเคลือบเพิ่มมากขึ้น ความหนาชั้นเคลือบจะเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการแพร่เป็นปรากฏการณ์ที่อาศัยเวลาดังนั้น

เมื่อใช้เวลาในการเคลือบผิวมากขึ้นทำให้มีเวลาสำหรับอะลูมิเนียมที่จะแพร่เข้าสู่ชิ้นงาน ดังนั้นเมื่อเวลานานขึ้นความหนาของชั้นเคลือบจึงสูงขึ้น ดังผลการทดลองที่พบว่าความหนาชั้นเคลือบแปรผันตามเวลาในการเคลือบผิว



รูปที่ 4.24 กราฟแท่งแสดงความหนาชั้นเคลือบต่ออุณหภูมิในการทำการเคลือบผิวของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738

จากนั้นเมื่อพิจารณาค่า Tammann's constant ของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 พบว่า ที่เวลาในการเคลือบผิวเท่ากัน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเคลือบผิวจะส่งผลให้ค่า Tammann's constant เพิ่มขึ้น โดยมีสาเหตุเนื่องจาก ที่เวลาในการเคลือบผิวเท่ากัน หากทำการเพิ่มอุณหภูมิในการเคลือบผิวความหนาชั้นเคลือบจะมีค่ามากขึ้น ดังรูปที่ 4.24 นั่นคือ อัตราการโตของชั้นเคลือบ (Growth rate) เพิ่มขึ้น ทั้งนี้อัตราการโตของชั้นเคลือบเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมินั้นเป็นผลมาจากค่า Diffusion coefficient ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ โดยความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับค่า Diffusion coefficient สามารถแสดงได้จากสมการที่ 5.2 คือ

$$D = D_0 \exp(-Q/RT) \quad (5.2)$$

จากสมการค่า  $D_0$  และ  $Q$  จะเป็นค่าคงที่และจะมีค่าเปลี่ยนแปลงเมื่อส่วนประกอบทางเคมี (Composition) เปลี่ยนแปลง ดังนั้นจากสมการที่ 5.2 ข้างต้นจะอธิบายได้ว่า เมื่ออุณหภูมิในการเคลือบผิวสูงขึ้น จะส่งผลให้ค่า Diffusion coefficient เพิ่มขึ้น ดังนั้นอัตราการโตของชั้นเคลือบจึงเพิ่มขึ้น และจากการที่อัตราการโตของชั้นเคลือบเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่า Tammann's constant เพิ่ม

มากขึ้น นอกจากสาเหตุข้างแล้ว กลไกการเกิดชั้นเคลือบด้วยวิธี Aluminizing ก็มีผลต่อความหนาและลักษณะชั้นเคลือบ จากข้อมูลที่ได้ทำการศึกษาพบว่า การทำ Aluminizing จะเกิดกลไก ได้ 2 แบบ คือ Inward diffusion และ Outward diffusion ซึ่งกลไกการเกิด inward diffusion จะเกิดเมื่อใช้อุณหภูมิในการทำการเคลือบผิวในช่วง 700-950 องศาเซลเซียส อะลูมิเนียมจะมีการแพร่เข้าสู่ผิวชิ้นงาน จะทำให้เกิดโครงสร้าง  $Ni_3Al_2$  และจะพบว่าเนื่องจากอะลูมิเนียมแพร่เข้าสู่ชิ้นงาน จึงทำให้ชิ้นงานไม่มีการเปลี่ยนแปลงขนาด ซึ่งสอดคล้องกับผลการตรวจสอบลักษณะชิ้นงานในหัวข้อ 4.1.1 ชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 800 และ 900 องศาเซลเซียส จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงของขนาดชิ้นงาน

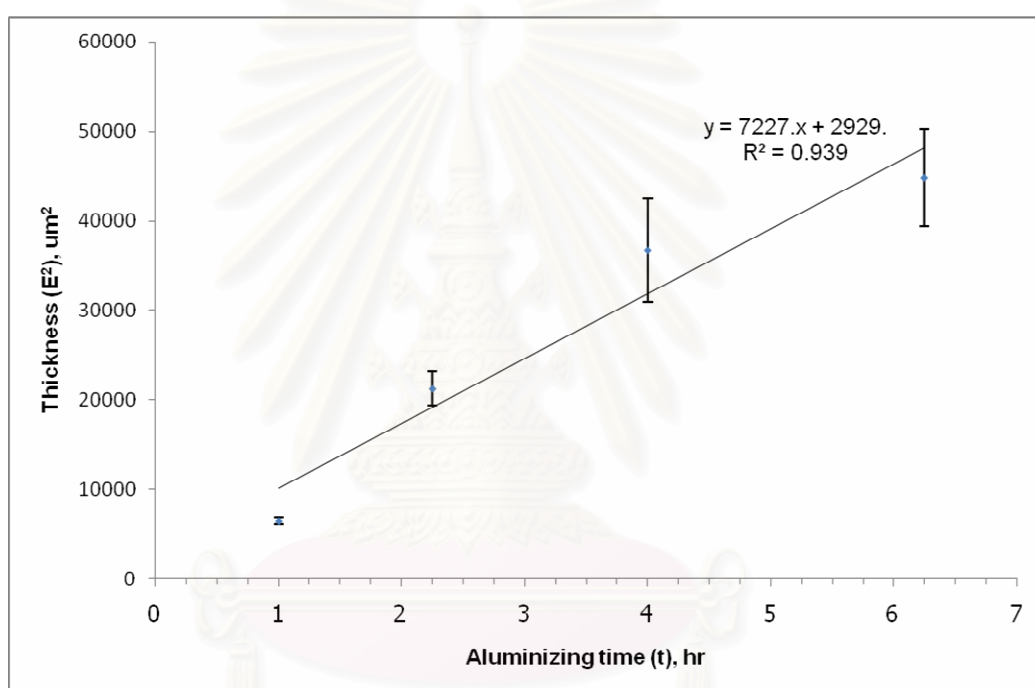
ขณะที่กลไกการเกิด outward diffusion จะเกิดเมื่อใช้อุณหภูมิในการเคลือบผิวประมาณ 1000-1100 องศาเซลเซียส ซึ่งนิเกิลจะมีการแพร่ออกจากเนื้อพื้นผิวชิ้นงาน ทำให้ชั้นเคลือบเกิดขึ้นบนผิวชิ้นงานเดิม ส่งผลให้ชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงขนาด นอกจากนี้ ชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส มีอัตราการโตสูงทำให้ความหนามาก โครงสร้างชั้นเคลือบนั้นเป็นเฟสที่มีคุณสมบัติที่เปราะ แตกและหลุดร่อนได้ง่าย จึงทำให้เมื่อทำการวัดความหนาชั้นเคลือบของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิลชนิด IN 738 ที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยอุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส จะได้ค่าความหนาที่ค่อนข้างแตกต่างกัน ทำให้ค่าเบี่ยงเบนของความหนาของชิ้นงานมีค่าสูง ดังแสดงในกราฟแผนภูมิแท่ง รูปที่ 4.24

#### 4.4.2 ความหนาชั้นเคลือบบนโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิลชนิด GTD 111

โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิลชนิด GTD 111 เมื่อเคลือบผิวด้วยอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง แล้วนำมาทำการตัดขวางและตรวจสอบความหนาชั้นเคลือบ ได้ว่า เมื่อเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิวโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิลชนิด GTD 111 เพิ่มขึ้น ความหนาของชั้นเคลือบก็จะเพิ่มขึ้น โดยค่าความหนาเฉลี่ยของชิ้นงานมีค่าเป็น 80.56, 145.68, 191.20 และ 211.42  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ (ตารางที่ 4.4) จากนั้นนำความหนาเฉลี่ยที่ได้ มาเขียนกราฟระหว่างความหนาเฉลี่ยของชั้นเคลือบยกกำลังสองต่อเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิว จะได้ว่ากราฟที่ได้มีแนวโน้มเป็นเส้นตรงเช่นเดียวกับโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิลชนิด IN 738 ดังรูปที่ 4.25 โดยมีค่าความชันของกราฟเท่ากับ 7227

ตารางที่ 4.4 แสดงความหนาชั้นเคลือบของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบน GTD 111 ที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง

เวลาที่ใช้ในการเคลือบผิว (ชั่วโมง)	ความหนาของชั้นเคลือบ ( $\mu\text{m}$ )	SD
1.00	80.56	2.34
2.25	145.68	6.41
4.00	191.20	14.95
6.25	211.42	12.80



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความหนาชั้นเคลือบต่อเวลาของชิ้นงานผ่านการทำอะลูมิเนียมในเชิงบน GTD 111 ที่อุณหภูมิ 900°C

จากผลการตรวจสอบกราฟระหว่างค่าความหนาชั้นเคลือบยกกำลังสองต่อเวลาในการเคลือบผิวของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้มนิกเกิลชนิด GTD 111 ที่ทำการเคลือบผิวด้วยอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ข้างต้นพบว่า ค่าความหนาเฉลี่ยยกกำลังสองจะมีค่าแปรผันตามอุณหภูมิ ( $E^2 \propto t$ ) ดังนั้นกลไกการเกิดชั้นเคลือบในกระบวนการ Pack-Aluminizing จึงเป็นแบบ Diffusion Control โดยมีอะลูมิเนียมแพร่ในนิกเกิลเช่นเดียวกับโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้มนิกเกิลชนิด IN 738 และจากสมการของ Wagner (สมการที่ 5.1) เมื่อเปรียบเทียบกับสมการของกราฟที่ได้จากการเคลือบผิวโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้มนิกเกิลชนิด GTD 111 ด้วยอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส จะได้ว่า ค่าความหนาของกราฟ มีค่า  $2k'$

ดังนั้นค่า Tammann's constant ของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลชนิด GTD 111 ที่ทำการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส จะมีค่าเท่ากับ 3613.5 และจากผลการตรวจความหนาชั้นเคลือบของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลชนิด GTD 111 เมื่อทำการเคลือบผิวด้วยอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส พบว่า เนื่องจากอัตราการแพร่ (Diffusion rate) จะแปรผันตามเวลาในการเคลือบผิว ดังนั้นเมื่อเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิวเพิ่มมากขึ้น ความหนาชั้นเคลือบจึงมีค่าเพิ่มขึ้น

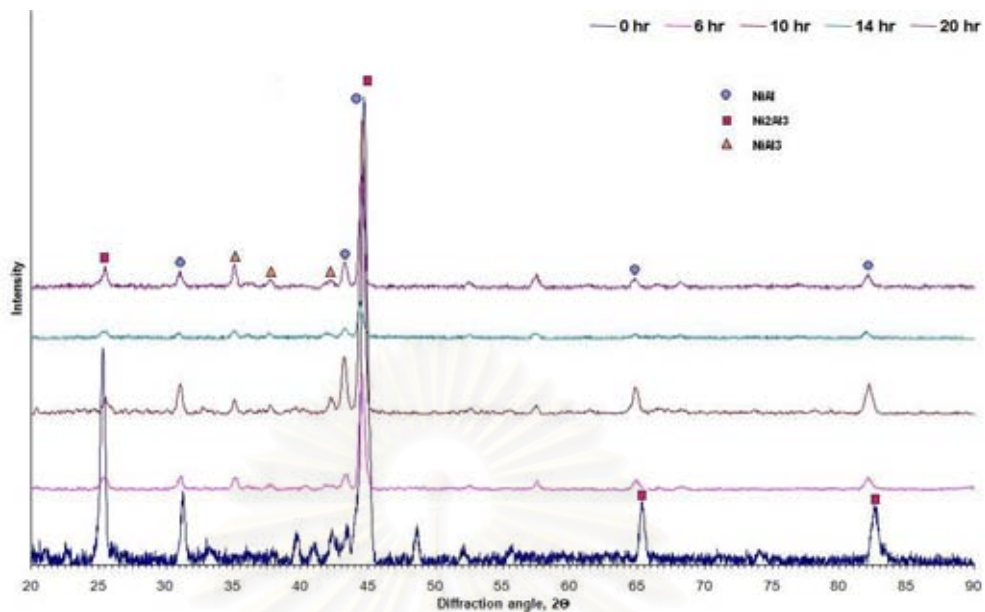
เมื่อเปรียบเทียบค่าความหนาชั้นเคลือบระหว่าง โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลชนิด IN 738 และ GTD 111 ที่ทำการเคลือบผิวด้วยอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลาเท่ากัน พบว่า โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลชนิด GTD 111 จะมีความหนาชั้นเคลือบที่น้อยกว่าโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลชนิด IN 738 ซึ่งอธิบายได้จากสมการที่ 5.2 โดยพบว่าค่า  $D_0$  และ  $Q$  จะมีค่าเปลี่ยนแปลงเมื่อ Composition มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลชนิด IN 738 และ GTD 111 นั้น มีส่วนผสมทางเคมีที่แตกต่างกัน จึงทำให้ค่า  $D_0$  และ  $Q$  มีค่าแตกต่างกัน ส่งผลให้ค่า Diffusion coefficient ของโลหะทั้งสองชนิดมีค่าแตกต่างกัน ดังนั้นค่า Tammann's constant หรือ อัตราการโตของชั้นเคลือบที่ได้จากโลหะผสมพิเศษนิกเกิลชนิด IN 738 และ GTD 111 จึงมีค่าแตกต่างกัน ดังจะเห็นได้จากผลการวัดความหนาของชั้นเคลือบ

#### 4.5 ผลการตรวจสอบเชิงคุณภาพของชั้นเคลือบภายหลังการทำอบเป็นเนื้อเดียว

##### 4.5.1 ผลการตรวจสอบโดย XRD

##### 4.5.1.1 ผลการตรวจสอบบนโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลชนิด IN 738

รูปที่ 4.26 โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลชนิด IN 738 ที่ผ่านการทำการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เมื่อนำมาทำการอบเป็นเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง พบว่า มีการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสัมพัทธ์ (relative intensity) ของเฟส  $Ni_2Al_3$  และ  $NiAl$  ซึ่งฟีกของเฟส  $Ni_2Al_3$  บางฟีกจะมีค่าความเข้มสัมพัทธ์ลดลง ส่วนฟีกของเฟส  $NiAl$  ก็จะหายไป โดยมีฟีกใหม่เกิดขึ้นคือ ฟีกของเฟส  $NiAl$  (JCPDS No. 02-1261) ซึ่งจากกราฟจะเห็นว่า ฟีกที่มีความเข้มสัมพัทธ์สูงสุดจะเป็นฟีกของเฟส  $NiAl$



รูปที่ 4.26 เปรียบเทียบการตรวจสอบชั้นเคลือบหลังทำการอบเป็นเนื้อเดียวที่ 1000 °C ที่เวลา 0, 6, 10, 14 และ 20 ชั่วโมง ของชิ้นงานที่ทำอะลูมิเนียมในซิงบน IN 738 ที่ 900 °C เวลา 4 ชั่วโมง ด้วยวิธี GIXD

จากผลการตรวจสอบข้างต้นทำให้ทราบว่า ภายหลังจากการทำการอบเป็นเนื้อเดียว โครงสร้างหลักของชั้นเคลือบจะเกิดการเปลี่ยนแปลงจากเฟส Ni<sub>2</sub>Al<sub>3</sub> ไปเป็นเฟส NiAl เนื่องจากการทำอบเป็นเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลานานจะทำให้ปริมาณอะลูมิเนียมในชั้นเคลือบซึ่งมีมาก สามารถเกิดการแพร่เข้าสู่พื้นผิว (Substrate) ชิ้นงาน (มีปริมาณอะลูมิเนียมต่ำกว่า) ทำให้ปริมาณอะลูมิเนียมในชั้นเคลือบลดลง เมื่อปริมาณของอะลูมิเนียมลดลง ก็จะทำให้โครงสร้างเปลี่ยนแปลงจากเฟส Ni<sub>2</sub>Al<sub>3</sub> เป็นเฟส NiAl ดังแผนภูมิสมดุลของนิกเกิลและอะลูมิเนียม รูปที่ 4.8

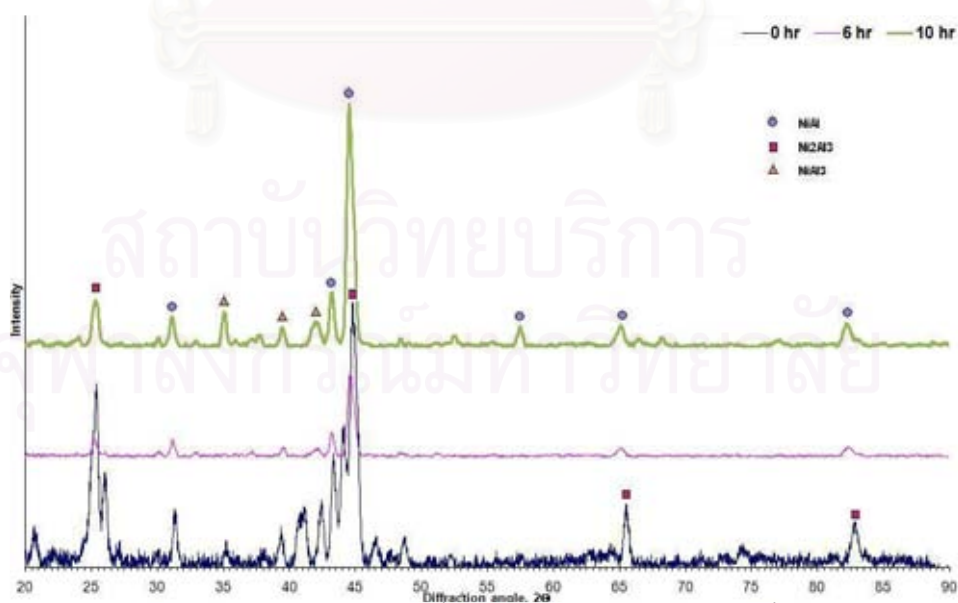
จากนั้นทำการตรวจสอบชิ้นงานที่ทำการอบเป็นเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง พบว่า ฟิสิกส์ที่ได้จะมีลักษณะเช่นเดียวกัน คือ มีฟิสิกของเฟส NiAl<sub>3</sub> และ NiAl เกิดขึ้น โดยฟิสิกส์ที่มีค่าความเข้มสัมพัทธ์สูงสุดคือฟิสิกของเฟส NiAl ดังนั้นชั้นเคลือบจึงมีโครงสร้างหลักเป็นเฟส NiAl เมื่อพิจารณาความเข้มสัมพัทธ์ของฟิสิก Ni<sub>2</sub>Al<sub>3</sub> ที่ได้พบว่าจะมีค่าน้อยลง เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ทำการอบเป็นเนื้อเดียวเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ซึ่งหมายความว่า เมื่อทำการอบเป็นเนื้อเดียวชิ้นงานเป็นเวลา 6 ชั่วโมงจะยังคงมีปริมาณของ Ni<sub>2</sub>Al<sub>3</sub> เหลืออยู่ ดังนั้นเมื่อเพิ่มเวลาในการอบเป็นเนื้อเดียวเป็น 10 ชั่วโมง ปริมาณเฟส Ni<sub>2</sub>Al<sub>3</sub> จึงลดลงไปอีก

และทำการตรวจสอบชิ้นงานที่ทำการอบเป็นเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 และ 20 ชั่วโมง พบว่าฟิสิกส์ที่ได้ประกอบไปด้วยฟิสิกของเฟส NiAl<sub>3</sub> และ NiAl

โดยพีคที่มีค่าความเข้มสัมพัทธ์สูงสุดคือพีคของเฟส NiAl ดังนั้นชั้นเคลือบจึงมีโครงสร้างหลักเป็นเฟส NiAl แต่เมื่อพิจารณาค่าความเข้มสัมพัทธ์ของพีค  $Ni_2Al_3$  จะเห็นว่ามีความใกล้เคียงกับชิ้นงานที่ทำการอบเป็นเนื้อเดียวที่เวลา 10 ชั่วโมง นั่นแสดงว่า การทำการอบเป็นเนื้อเดียวชิ้นงานเป็นเวลา 14 และ 20 ชั่วโมง ทำให้ชั้นเคลือบที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงไม่แตกต่างกับการอบเป็นเนื้อเดียวชิ้นงานเป็นเวลา 10 ชั่วโมง

#### 4.5.1.2 ผลการตรวจสอบบนโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิลชนิด GTD 111

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.27 โลหะผสมเนื้อพื้นนิเกิลชนิด GTD 111 ที่ผ่านการเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เมื่อนำมาทำการอบเป็นเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง พบว่า มีลักษณะกราฟคล้ายกับของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิลชนิด IN 738 โดยเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสัมพัทธ์ (relative intensity) ของเฟส  $Ni_2Al_3$  และ  $NiAl_3$  ซึ่งพีคของเฟส  $Ni_2Al_3$  บางพีคจะมีค่าความเข้มสัมพัทธ์ลดลง และบางพีคก็จะหายไป ส่วนพีคของเฟส  $NiAl_3$  ก็จะไปซ้อนกัน โดยมีพีคใหม่เกิดขึ้นคือ พีคของเฟส NiAl ซึ่งจากกราฟจะเห็นว่าพีคที่มีความเข้มสัมพัทธ์สูงสุดจะเป็นพีคของเฟส NiAl จากผลการตรวจสอบข้างต้นทำให้ทราบว่า ภายหลังจากการทำการอบเป็นเนื้อเดียว โครงสร้างหลักของชั้นเคลือบจะเกิดการเปลี่ยนแปลงจากเฟส  $Ni_2Al_3$  ไปเป็นเฟส NiAl เช่นเดียวกันกับโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิเกิลชนิด IN 738



รูปที่ 4.27 เปรียบเทียบการตรวจสอบชั้นเคลือบหลังทำการอบเป็นเนื้อเดียวที่ 1000 °C ที่เวลา 0, 6 และ 10 ชั่วโมง ของชิ้นงานที่ทำอะลูมิเนียมในเชิงบน GTD 111 ที่ 900 °C

เวลา 4 ชั่วโมง ด้วยวิธี GIXD

จากนั้นได้ทำการอบเป็นเนื้อเดียวชิ้นงานที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง เนื่องจากต้องการนำไปทำการศึกษาเปรียบเทียบผลด้านความต้านทานการเกิดออกซิเดชันพบว่า มีลักษณะกราฟคล้ายกับกราฟของชิ้นงานที่ทำการอบเป็นเนื้อเดียวเป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสัมพัทธ์ (relative intensity) ของเฟส  $Ni_2Al_3$  และ  $NiAl_3$  ซึ่งพีคของเฟส  $Ni_2Al_3$  บางพีคจะมีค่าความเข้มสัมพัทธ์ลดลง และบางพีคก็จะหายไปเช่นเดียวกัน ส่วนพีคของเฟส  $NiAl_3$  ก็จะไปเช่นกัน โดยมีพีคใหม่เกิดขึ้นคือ พีคของเฟส  $NiAl$  ซึ่งจากกราฟจะเห็นว่า พีคที่มีความเข้มสัมพัทธ์สูงสุดจะเป็นพีคของเฟส  $NiAl$

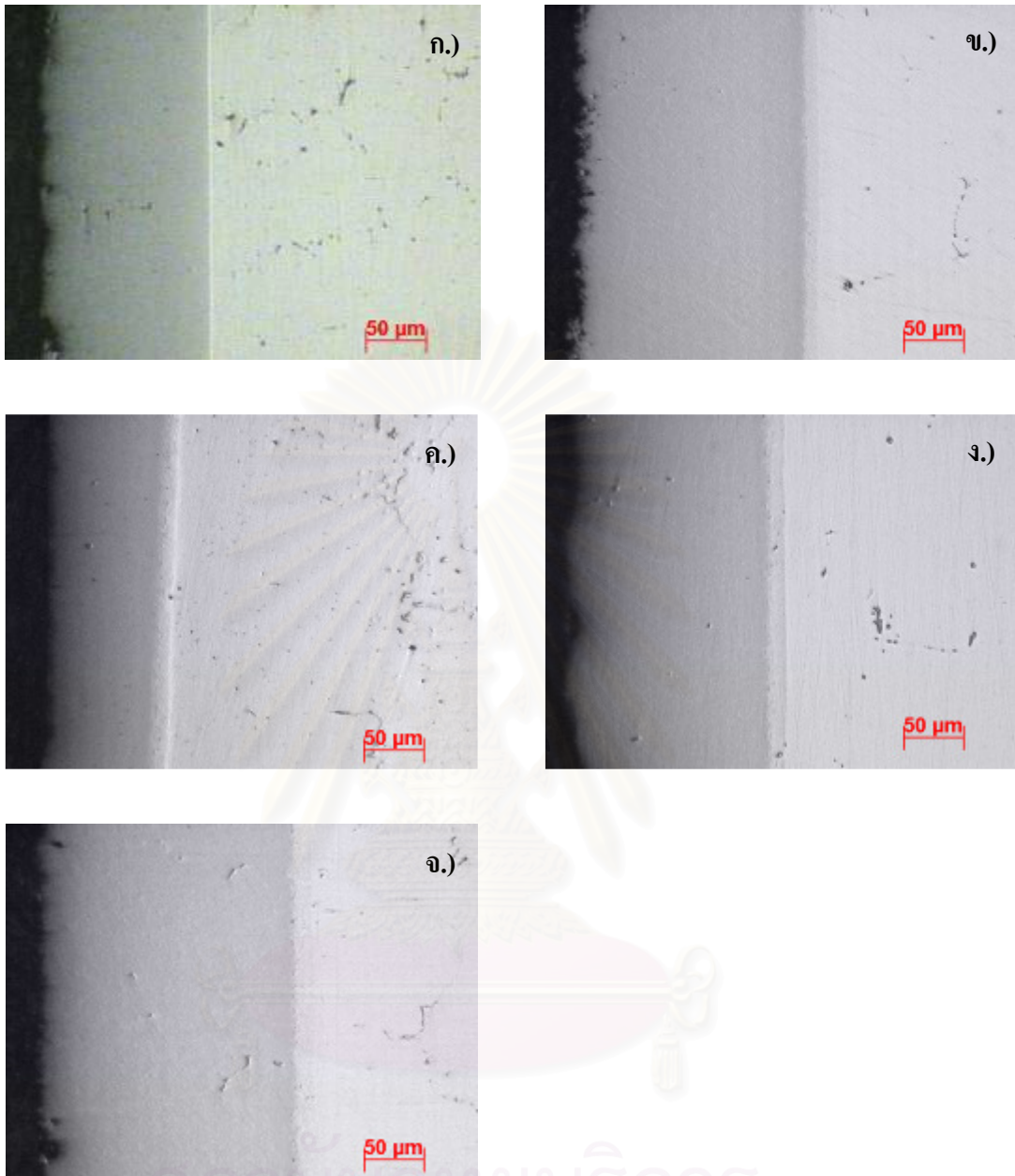
เมื่อพิจารณาความเข้มสัมพัทธ์ของพีค  $Ni_2Al_3$  ที่ได้พบว่าจะมีค่าน้อยลง เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ทำการอบเป็นเนื้อเดียวเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ซึ่งหมายความว่า เมื่อทำการอบเป็นเนื้อเดียวชิ้นงานเป็นเวลา 6 ชั่วโมงจะยังคงมีปริมาณของ  $Ni_2Al_3$  เหลืออยู่ ดังนั้นเมื่อเพิ่มเวลาในการอบเป็นเนื้อเดียวเป็น 10 ชั่วโมง ปริมาณเฟส  $Ni_2Al_3$  จึงลดลงไปอีกภายหลังจากการทำการอบเป็นเนื้อเดียว โครงสร้างหลักของชิ้นเคลือบจะเกิดการเปลี่ยนแปลงจากเฟส  $Ni_2Al_3$  ไปเป็นเฟส  $NiAl$

#### 4.5.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวางของชั้นเคลือบหลังทำการอบเป็นเนื้อเดียว

##### 4.5.2.1 โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบบนโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738

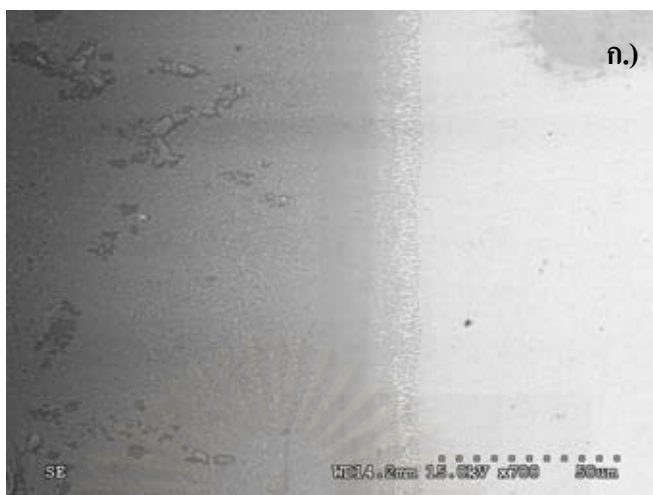
จากรูปที่ 4.28 เมื่อพิจารณาโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 ที่ทำการเคลือบผิวด้วยอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง แล้วนำไปทำการอบเป็นเนื้อเดียว โดยนำมาตัดขวาง แล้วทำการตรวจสอบชั้นเคลือบด้วยกล้อง Optical Microscope จะเห็นว่าชิ้นงานที่ทำการอบเป็นเนื้อเดียว จะมีลักษณะชั้นเคลือบเป็นชั้นเดียวกัน โดยมีลักษณะคือ จะมีสีเทาเข้มและสีเทาอ่อนขนาดเล็กลึกลับกัน และกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอ เมื่อทำการตรวจสอบด้วยกล้อง SEM จะพบว่าชั้นเคลือบที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นรูพรุน โดยมีสีเทาเข้มและสีเทาอ่อนขนาดเล็กลึกลับกัน ดังรูป 4.29 ซึ่งจากผล XRD ได้ตรวจพบพีคของเฟส  $NiAl$  ซึ่งเป็นเฟสหลัก ดังนั้น โครงสร้างชั้นเคลือบที่ได้ภายหลังจากการอบเป็นเนื้อเดียวจะเป็นเฟส  $NiAl$  โดยมีเฟส  $NiAl_3$  ผสมอยู่บ้างเล็กน้อย





รูปที่ 4.28 ภาพถ่ายโครงสร้างโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 ที่เคลือบผิว 900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วทำการอบเป็นเนื้อเดียวเป็นเวลา ก.) 0 ข.) 6 ค.) 10 ง.) 14 และ จ.) 20 ชั่วโมง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

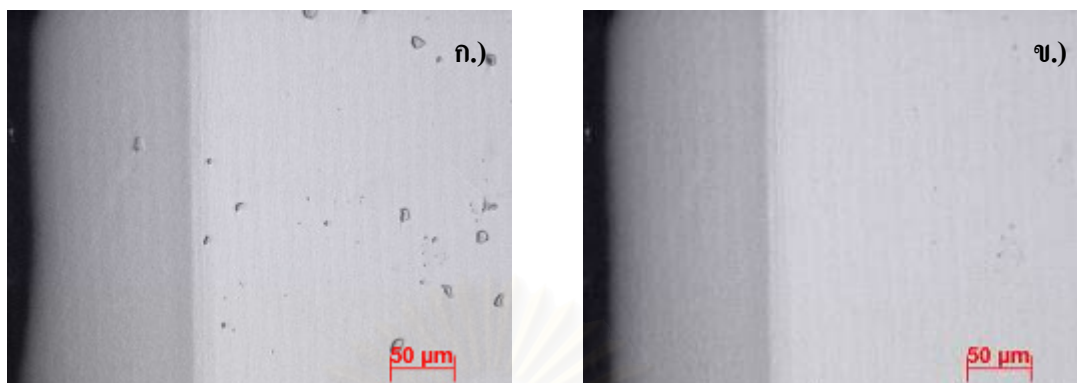


รูปที่ 4.29 ภาพถ่ายโครงสร้างโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 ที่เคลือบผิว 900 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วทำการอบเป็นเนื้อเดียวเป็นเวลา ก.) 10 และ ข.) 20 ชั่วโมง ด้วยกล้อง SEM

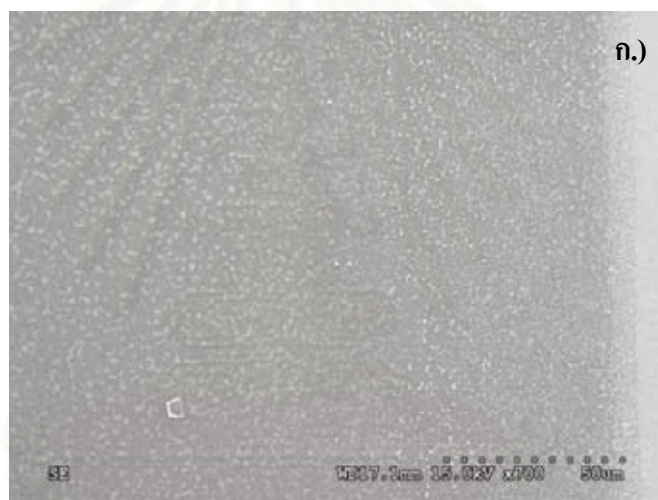
#### 4.5.2.2 โครงสร้างจุลภาคของชั้นเคลือบบนโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด GTD

111

จากรูปที่ 4.30 เมื่อพิจารณาโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด GTD 111 ที่ทำการเคลือบผิวด้วยอุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง แล้วนำไปทำการอบเป็นเนื้อเดียว โดยนำมาตัดขวาง แล้วทำการตรวจสอบชั้นเคลือบด้วยกล้อง Optical Microscope จะเห็นว่าชั้นงานที่ทำการอบเป็นเนื้อเดียวจะมีลักษณะชั้นเคลือบเป็นชั้นเดียวกัน โดยมีลักษณะคือ จะมีสีเทาเข้มและสีเทาอ่อนขนาดเล็กลึกลับกันและกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอ เมื่อทำการตรวจสอบด้วยกล้อง SEM จะพบว่าดังรูป 4.31 ซึ่งจากผล XRD ได้ตรวจพบฟลักของเฟส NiAl ซึ่งเป็นเฟสหลัก ดังนั้น โครงสร้างชั้นเคลือบที่ได้ภายหลังจากการอบเป็นเนื้อเดียวจะเป็นเฟส NiAl โดยมีเฟส NiAl<sub>3</sub> ผสมอยู่บ้างเล็กน้อย



รูปที่ 4.30 ภาพถ่ายโครงสร้างโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด GTD 111 ที่เคลือบผิว  $900^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วทำการอบเป็นเนื้อเดียวเป็นเวลา ก.) 6 และ ข.) 10 ชั่วโมง



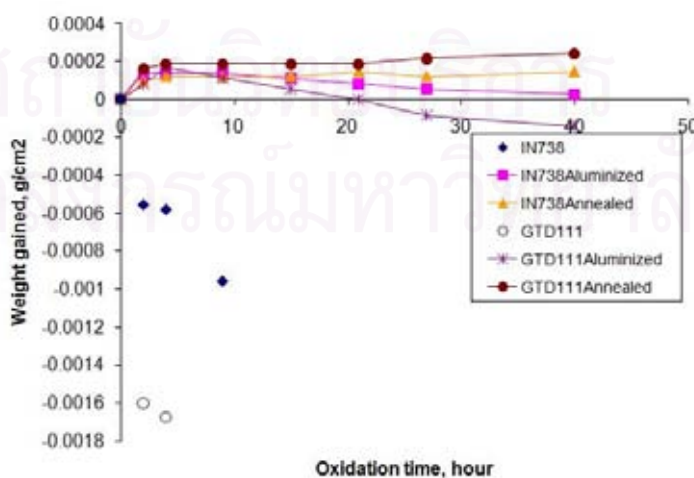
รูปที่ 4.31 ภาพถ่ายโครงสร้างโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด GTD 111 ที่เคลือบผิว  $900^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วทำการอบเป็นเนื้อเดียวเป็นเวลา ก.) 6 และ ข.) 10 ชั่วโมง ด้วยกล้อง SEM

## 4.6 ผลการตรวจสอบความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชัน

### 4.6.1 ผลการตรวจสอบน้ำหนัก

#### 4.6.1.1 ผลการตรวจสอบน้ำหนักของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738

พิจารณารูปที่ 4.32 ผลการตรวจสอบความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่า โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 ที่ไม่ได้ทำการเคลือบผิวด้วยกระบวนการ Pack-Aluminizing จะมีน้ำหนักลดลง ในขณะที่ชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวโดยไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียวและชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวและอบอ่อนจะมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น สำหรับชิ้นงานที่ ไม่ได้ทำการเคลือบผิวโลหะพื้นนิกเกิลจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่อยู่ในบรรยากาศได้ดีที่อุณหภูมิสูงและสามารถเกิดเป็นสารประกอบออกไซด์ที่ผิว ออกไซด์ที่เกิดขึ้นนี้มีความหนาแน่นต่ำและพรุน ทำให้ออกซิเจนสามารถแพร่ผ่านชั้นออกไซด์และทำปฏิกิริยาทำให้ชั้นออกไซด์เกิดขึ้นต่อไปและมีความหนาที่เพิ่มขึ้น เมื่อชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นหนามากก็จะเกิดการหลุดร่อนออกจากผิวชิ้นงานได้ ทำให้น้ำหนักของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 และ GTD 111 ที่ไม่ได้ทำการเคลือบผิวมีน้ำหนักลดลง เนื่องจากเกิดการหลุดร่อนของฟิล์มออกไซด์บางส่วน แต่สำหรับชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวโดยไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียวและชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวและอบเป็นเนื้อเดียวจะมีชั้นเคลือบนิกเกิลอะลูมิเนียม (NiAl) เคลือบผิว ซึ่งที่อุณหภูมิสูงและบรรยากาศออกซิเจนในอากาศจะเกิดปฏิกิริยากับชั้นเคลือบ ทำให้เกิดสารประกอบอะลูมิเนียมออกไซด์ซึ่งเป็นฟิล์มที่มีความหนาแน่นสูงไม่มีรูพรุน ทำให้ออกซิเจนสามารถแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม อะลูมิเนียมออกไซด์นี้ได้ยากทำให้ช่วยยับยั้งการเกิดออกซิเดชัน และเนื่องจากฟิล์มออกไซด์ที่เกิดขึ้นดังที่กล่าวมาแล้วจึงส่งผลให้น้ำหนักชิ้นงานทั้งสองเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.32 แสดงการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1000°C ของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 และ GTD 111

จากนั้นพิจารณาเปรียบเทียบความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชันของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลที่ผ่านการเคลือบผิวโดยไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียว และโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลที่ผ่านการเคลือบผิวและอบเป็นเนื้อเดียว เมื่อทำการทดสอบเป็นเวลา 4 และ 9 ชั่วโมง พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวโดยไม่ทำการอบเป็นเนื้อเดียวจะมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นมากกว่าชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวและอบเป็นเนื้อเดียว เนื่องจากชั้นเคลือบของชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวโดยไม่ได้ทำการอบเป็นเนื้อเดียวมีการเกิดฟิล์มออกไซด์มากกว่าชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวและอบเป็นเนื้อเดียว ดังนั้นน้ำหนักจึงเพิ่มมากกว่า และเมื่อพิจารณาความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชัน เมื่อทำการทดสอบเป็นเวลา 15 ชั่วโมง พบว่า ชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวโดยไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียวจะมีน้ำหนักของชิ้นงานลดลง ในขณะที่ชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวและผ่านการอบเป็นเนื้อเดียวจะยังคงมีน้ำหนักคงเดิม นั่นหมายความว่า ออกไซด์บนชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวโดยไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียวเริ่มมีการหลุดร่อน ขณะที่ชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวและผ่านการอบเป็นเนื้อเดียวยังไม่มีมีการหลุดร่อนของฟิล์มออกไซด์ นั่นแสดงว่า ชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวและอบเป็นเนื้อเดียวจะต้านทานการเกิดออกซิเดชันได้ดีกว่าชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวโดยไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียวและชิ้นงานที่ไม่ได้ทำการเคลือบผิวตามลำดับ

#### 4.6.1.2 ผลการตรวจสอบน้ำหนักของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลชนิด GTD 111

จากรูปที่ 4.32 ผลการตรวจสอบความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่า โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลชนิด GTD 111 ที่ไม่ได้เคลือบผิวจะมีน้ำหนักลดลง ในขณะที่ชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวโดยไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียวและชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวและอบเป็นเนื้อเดียว จะมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลชนิด IN 738 ซึ่งมีสาเหตุจากโลหะบนผิวชิ้นงานที่ไม่ได้ทำการเคลือบผิว จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในบรรยากาศได้ดี เกิดเป็นสารประกอบออกไซด์ที่ผิว ซึ่งออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะเกิดการหลุดร่อนออกจากผิวชิ้นงานได้ง่าย ทำให้น้ำหนักของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลชนิด IN 738 ที่ไม่ได้ทำการเคลือบผิวมีน้ำหนักลดลง ขณะที่ชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวโดยไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียวและชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวและอบเป็นเนื้อเดียวจะมีชั้นเคลือบช่วยป้องกัน ซึ่งชั้นเคลือบจะเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนจะเกิดเป็นฟิล์มออกไซด์ที่หลุดร่อนได้ยากกว่า ส่งผลให้น้ำหนักชิ้นงานทั้งสองเพิ่มขึ้น

จากนั้นพิจารณาเปรียบเทียบความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชันของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลที่ผ่านการเคลือบผิวโดยไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียว และโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้่นิกเกิลที่ผ่านการเคลือบผิวและอบเป็นเนื้อเดียว เมื่อทำการทดสอบเป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่า ชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวโดยไม่ทำการอบเป็นเนื้อเดียวจะมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นมากกว่าชิ้นงาน

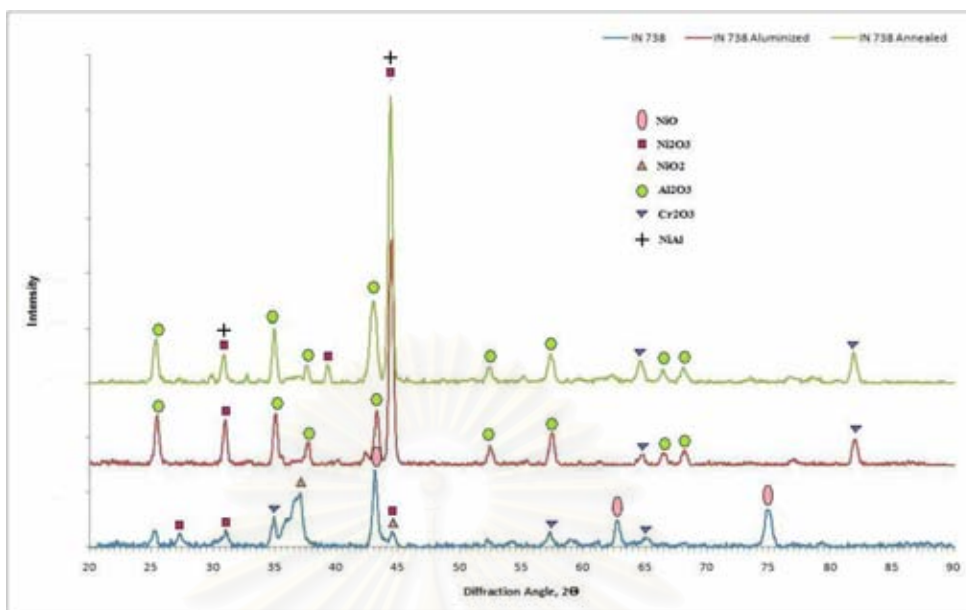
ที่ทำการเคลือบผิวและอบเป็นเนื้อเดียว เนื่องจากชั้นเคลือบของชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวโดยไม่ได้ทำการอบเป็นเนื้อเดียวมีการเกิดฟิล์มออกไซด์มากกว่าชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวและอบเป็นเนื้อเดียว น้ำหนักชิ้นงานจึงเพิ่มมากกว่า นั่นหมายความว่า ชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวและอบเป็นเนื้อเดียวจะสามารถป้องกันการเกิดออกไซด์ฟิล์มได้ดีกว่าชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวแต่ไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียว

และเมื่อพิจารณาความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชัน เมื่อทำการทดสอบเป็นเวลา 9 และ 15 ชั่วโมง พบว่า ชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวโดยไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียวจะมีน้ำหนักของชิ้นงานลดลง ในขณะที่ชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวและผ่านการอบเป็นเนื้อเดียวจะยังคงมีน้ำหนักคงเดิม นั่นหมายความว่าออกไซด์บนชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวโดยไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียวเริ่มมีการหลุดร่อน ขณะที่ชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวและผ่านการอบเป็นเนื้อเดียวยังไม่มีการหลุดร่อนของฟิล์มออกไซด์ นั่นแสดงว่า ชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวและอบเป็นเนื้อเดียวจะต้านทานการเกิดออกซิเดชันได้ดีกว่าชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวโดยไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียวและชิ้นงานที่ไม่ได้ทำการเคลือบผิวตามลำดับ

#### 4.6.2 ผลการตรวจสอบโดย XRD

##### 4.6.2.1 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบภายหลังการทำการทดสอบออกซิเดชันของโลหะผสมพิเศษเนื้อพืชนิกเกิลชนิด IN 738

รูปที่ 4.33 เมื่อทำการตรวจสอบชั้นเคลือบโลหะผสมพิเศษเนื้อพืชนิกเกิลชนิด IN 738 ที่ไม่ได้ทำการเคลือบผิวภายหลังทำการทดสอบออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง พบว่า โลหะผสมพิเศษเนื้อพืชนิกเกิลชนิด IN 738 ที่ไม่ได้ทำการเคลือบผิวจะมีกราฟซึ่งประกอบไปด้วยพีคของเฟส  $\text{Ni}_2\text{O}_3$ ,  $\text{NiO}$ ,  $\text{NiO}$  และ  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (JCPDS No. 14-0481, 85-1977, 04-0835, และ 38-1479) โดยพีคที่มีค่าความเข้มสัมพัทธ์สูงสุดที่สุดคือ พีคของเฟส  $\text{NiO}$  ดังนั้นเมื่อนำโลหะผสมพิเศษเนื้อพืชนิกเกิลชนิด IN 738 ที่ไม่ได้ทำการเคลือบผิวมาทดสอบออกซิเดชันจะเกิดออกไซด์ของนิกเกิลเป็นส่วนใหญ่ โดยมีเฟส  $\text{NiO}$  เป็นเฟสหลัก และเมื่อทำการตรวจสอบชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวโดยไม่ได้ออบเป็นเนื้อเดียวและชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวและอบเป็นเนื้อเดียว พบว่า กราฟที่ได้จะประกอบไปด้วยพีคของเฟส  $\text{NiAl}$ ,  $\text{Ni}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (JCPDS No. 46-1212) และ  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  โดยพีคที่มีค่าความเข้มสัมพัทธ์สูงสุดที่สุดคือ พีคของเฟส  $\text{NiAl}$



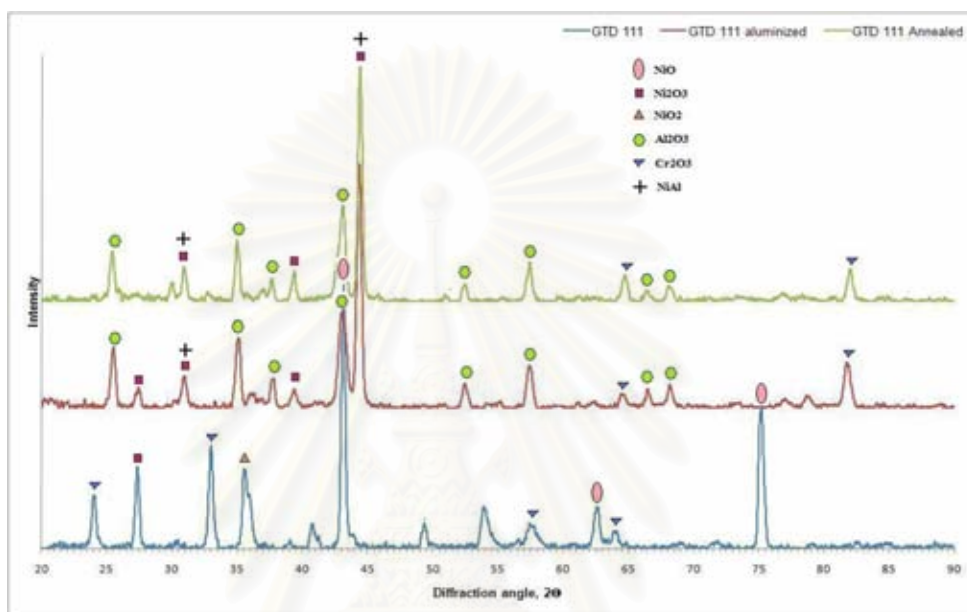
รูปที่ 4.33 ผลการเปรียบเทียบการตรวจสอบชั้นเคลือบหลังทำการทดสอบออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 15 ชั่วโมง ของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 ด้วยวิธี GIXD

จากผลการตรวจสอบชั้นเคลือบพบว่า โลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 เมื่อนำไปทำการทดสอบออกซิเดชันจะพบว่าการเกิดออกไซด์ของนิกเกิลเป็นส่วนใหญ่ แต่เมื่อทำการเคลือบผิวพบว่า ชั้นเคลือบที่ได้จะช่วยลดการเกิดออกไซด์ของนิกเกิลได้ โดยจะเกิดเป็นออกไซด์ของอะลูมิเนียมขึ้นแทน ชั้นอะลูมิเนียมออกไซด์นี้ทำตัวเป็นชั้นขัดขวางการแพร่ของออกซิเจน ทำให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันถูกหน่วงหรือขัดขวาง ทำให้ชั้นฟิล์มออกไซด์ที่เกิดขึ้นนี้จึงเป็นเพียงชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ที่บางมาก และเมื่อตรวจสอบด้วย GIXD ที่มุมตกกระทบ 5 องศา รังสีเอกซ์สามารถทะลุผ่านชั้นฟิล์มออกไซด์ ทำให้ยังคงพบพิกของเฟส NiAl เป็นพิกหลักร่วมกับพิกของเฟสอะลูมิเนียมออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.33

#### 4.6.2.2 ผลการตรวจสอบชั้นเคลือบภายหลังทำการทดสอบออกซิเดชันของโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด GTD 111

รูปที่ 4.34 เมื่อทำการตรวจสอบชั้นเคลือบโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด GTD 111 ที่ไม่ได้ทำการเคลือบผิวภายหลังทำการทดสอบออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง พบว่า ชิ้นงานที่ไม่ได้ทำการเคลือบผิวจะมีกราฟซึ่งประกอบไปด้วยพิกของเฟส  $\text{Ni}_2\text{O}_3$ ,  $\text{NiO}_2$ ,  $\text{NiO}$  และ  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  โดยพิกที่มีค่าความเข้มสัมพัทธ์สูงสุด คือพิกของเฟส NiO ดังนั้นเมื่อนำโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด GTD 111 ที่ไม่ได้ทำการเคลือบผิวมาทดสอบ

ออกซิเดชันพบว่าเกิดออกไซด์ของนิกเกิลเป็นส่วนใหญ่ โดยมีเฟส NiO เป็นเฟสหลัก และเมื่อทำการตรวจสอบชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวโดยไม่ได้อบเป็นเนื้อเดียวและชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวและอบเป็นเนื้อเดียว พบว่า กราฟที่ได้จะประกอบไปด้วยฟิสิกของเฟส NiAl, Ni<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> และ Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> โดยฟิสิกที่มีค่าความเข้มสัมพัทธ์สูงที่สุดคือ ฟิสิกของเฟส NiAl



รูปที่ 4.34 ผลการเปรียบเทียบการตรวจสอบชิ้นเคลือบหลังทำการทดสอบออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 15 ชั่วโมง ของโลหะผสมพิเศษเนื้อพ่นนิกเกิลชนิด GTD 111 ด้วยวิธี GIXD

ดังนั้น โลหะผสมพิเศษเนื้อพ่นนิกเกิลชนิด GTD 111 เมื่อนำไปทำการทดสอบออกซิเดชันจะพบว่าเกิดออกไซด์ของนิกเกิลเป็นส่วนใหญ่ แต่เมื่อทำการเคลือบผิว พบว่าชั้นเคลือบที่ได้จะช่วยลดการเกิดออกไซด์ของนิกเกิลได้ โดยจะเกิดเป็นออกไซด์ของอะลูมิเนียมขึ้นเช่นเดียวกับที่พบในชิ้นงาน IN 738 ดังนั้นโลหะผสมพิเศษเนื้อพ่นนิกเกิลชนิด GTD 111 ที่เคลือบและผ่านการอบเป็นเนื้อเดียวจึงสามารถต้านทานการเกิดออกซิเดชันได้ โดยการเกิดฟิล์มของอะลูมิเนียมออกไซด์เป็นชั้นป้องกันการเกิดออกซิเดชัน โดยทำหน้าที่ขัดขวางการแพร่ของออกซิเจนและหน่วงการเกิดออกซิเดชัน



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

ผลของอุณหภูมิและเวลาต่อความหนาและโครงสร้างชั้นเคลือบในกระบวนการ Pack-Aluminizing ของโลหะผสมพิเศษนิกเกิลชนิด IN 738 และ GTD 111 สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1 การเคลือบผิวโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้ นิกเกิลชนิด IN 738 และ GTD 111 ด้วยกระบวนการ Pack-Aluminizing ที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ จะได้โครงสร้างชั้นเคลือบที่ประกอบด้วยเฟสหลักคือ  $Ni_2Al_3$  และจะมีเฟสรองคือ  $NiAl_3$

- กรณีเพิ่มเวลาในการเคลือบผิวโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้ นิกเกิลชนิด IN 738 และ GTD 111 ด้วยกระบวนการ Pack-Aluminizing จะไม่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคชั้นเคลือบ

- กรณีเพิ่มอุณหภูมิในการเคลือบผิวโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้ นิกเกิลชนิด IN 738 ด้วยกระบวนการ Pack-Aluminizing จะทำให้โครงสร้างชั้นเคลือบเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยมีเฟส  $NiAl_3$  ลดลง เพราะเฟส  $NiAl_3$  จะไม่เสถียรที่อุณหภูมิสูงกว่า 854 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามยังคงพบเฟส  $NiAl_3$  ปริมาณน้อย ในการเคลือบผิวด้วยกระบวนการ Pack-Aluminizing ที่อุณหภูมิสูงกว่า 854 องศาเซลเซียส ซึ่งเกิดระหว่างการเย็นตัวภายในเตา

5.2 การเคลือบผิวโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้ นิกเกิลชนิด IN 738 และ GTD 111 ด้วยกระบวนการ Pack-Aluminizing ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ จะส่งผลต่อความหนาชั้นเคลือบ

- กรณีเพิ่มเวลาในการเคลือบผิวโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้ นิกเกิลชนิด IN 738 และ GTD 111 ด้วยกระบวนการ Pack-Aluminizing จะทำให้ความหนาของชั้นเคลือบเพิ่มขึ้น โดยมีกลไกการโตขึ้นของชั้นเคลือบถูกควบคุมด้วยกลไกการแพร่

- กรณีเพิ่มอุณหภูมิในการเคลือบผิวโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้ นิกเกิลชนิด IN 738 ด้วยกระบวนการ Pack-Aluminizing จะทำให้ความหนาของชั้นเคลือบเพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิจะมีผลทำให้ค่า Diffusion Coefficient เพิ่มขึ้น และโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้ นิกเกิลทั้ง 2 ชนิดมีส่วนผสมทางเคมีแตกต่างกัน ทำให้ค่า Diffusion Coefficient แตกต่างกัน

5.3 การอบเป็นเนื้อเดียวด้วยอุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้ นิกเกิลชนิด IN 738 และ GTD 111 ที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยกระบวนการ Pack-Aluminizing ที่เวลาต่างๆ จะทำให้โครงสร้างชั้นเคลือบเกิดการเปลี่ยนแปลงกลายเป็นเฟส  $NiAl$  เป็นหลัก และยังคงพบ  $NiAl_3$  และ  $Ni_2Al_3$  ในปริมาณลดลงจากก่อนทำการอบเป็นเนื้อเดียว โดยปริมาณของเฟส  $Ni_2Al_3$  จะ

ลดลงตามเวลาในการอบเป็นเนื้อเดียว และเมื่อเพิ่มเวลาในการอบเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่า 10 ชั่วโมง ปริมาณของ  $Ni_2Al_3$  จะเริ่มคงที่

5.4 การทดสอบความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชันชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 และ GTD 111 ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ได้ว่าโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 และ GTD 111 ที่ผ่านการเคลือบผิวอบเป็นเนื้อเดียว จะมีความต้านทานการเกิดออกซิเดชันได้ดีที่สุด รองลงมาคือโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลที่ได้ทำการเคลือบผิว และไม่ได้ทำการเคลือบผิวตามลำดับ

5.5 การทดสอบความสามารถในการต้านทานการเกิดออกซิเดชันชิ้นงานโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 และ GTD 111 ด้วยอุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส พบว่า

- กรณีโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 และ GTD 111 ที่ไม่ได้ทำการเคลือบผิวด้วยกระบวนการ Pack-Aluminizing โครงสร้างที่เกิดขึ้นจะเป็นออกไซด์ของนิกเกิล ( $Ni_2O_3$ ,  $NiO$ ,  $NiO$ ) และ  $Cr_2O_3$  โดยมีเฟส  $NiO$  เป็นเฟสหลัก

- กรณีโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 และ GTD 111 ที่ทำการเคลือบผิวด้วยกระบวนการ Pack-Aluminizing ทั้งที่ไม่ผ่านการอบเป็นเนื้อเดียวและผ่านการอบเป็นเนื้อเดียว พบว่าโครงสร้างที่เกิดขึ้นคือ  $NiAl$ ,  $Ni_2O_3$ ,  $Al_2O_3$  และ  $Cr_2O_3$  โดยมีเฟส  $NiAl$  เป็นเฟสหลัก

ดังนั้นการเพิ่มความต้านทานการเกิดออกซิเดชันเกิดจากการเกิดชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ที่ช่วยขัดขวางการแพร่ของออกซิเจน

## รายการอ้างอิง

- [1] ปัญญาวัชร วัลยาว. เอกสารประกอบ TECHNICAL TRAINING, วิศวกรรมงานโลหะ สำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูง. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค), สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 24 กุมภาพันธ์ 2548.
- [2] C.T. SIMS. SUPERALLOYS II. New York: Wiley, 1987.
- [3] ปัญญาวัชร วัลยาว. เอกสารประกอบการสอน วิชา High temperature Materials. ภาควิชา วิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
- [4] C.T. SIMS and W.C. HAGEL. The Superalloys. New York : Wiley, 1972.
- [5] S.A. Sajjadi, S. Nategh and Roderick I. L. Guthrie. Study of microstructure and mechanical properties of high performance Ni-base superalloy GTD-111. Materials Science and Engineering A325. (2002) : 484-489.
- [6] J.H. Westbrook and R.L. Fleischer. Structural application of intermetallic compounds. New York : Wiley, 2000.
- [7] Crystal Structures of the Al-Ni System. Crystal Lattice Structures. Naval Research Laboratory, Materials Science and Technology Division, Washington DC. Available from : <http://cst-www.nrl.navy.mil/lattice/alloys/alni.html> [2007,Jan 20]
- [8] Z. Yu, D.D. Hass and H.N.G. Wadley. NiAl bond coats made by a directed vapor deposition approach. Materials Science and Engineering A394. (2005) : 43-52.
- [9] T. Sourmail. Coatings for Turbine Blades. Available from : <http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2003/Superalloys/coatings/index.html> [2007,Jan 20]
- [10] C. Hounginou, S. Chevalier and J.P. Larpin. Synthesis and characterisation of pack cemented aluminide coatings on metals. Applied Surface Science 236. (2004) : 256-269.
- [11] A.M. Hodge and D.C. Dunand. Synthesis of nickel-aluminide forms by pack-aluminization of nickel foams. Intermetallics 9. (2001) : 581-589.
- [12] Xin Ren, Fuhui Wang and Xin Wang. High-temperature oxidation and hot corrosion behaviors of the NiCr-CrAl coating on a nickel-based superalloy. Surface & Coatings Technology 198. (2005) : 425-431.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก.1 ความหนาชั้นเคลือบโลหะผสมพิเศษเนื้อฟีนิกเกิลชนิด IN 738 ที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยวิธี Pack-Aluminizing ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25 ชั่วโมง (หน่วยเป็นไมครอน)

ครั้งที่	1 ชั่วโมง	2.25 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง	6.25 ชั่วโมง
1	58.25	78.41	102.48	130.46
2	58.06	64.91	102.80	105.63
3	61.47	74.53	103.11	118.63
4	59.13	65.53	103.11	117.08
5	62.82	65.22	102.80	115.84
6	55.36	62.95	100.23	121.43
ค่ามากที่สุด	62.87	78.41	103.11	130.46
ค่าน้อยสุด	55.36	62.95	100.23	105.63
ค่าเฉลี่ยที่ตัดค่ามากที่สุด และน้อยสุด	59.23	67.55	102.88	118.25
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1.57	4.66	0.30	2.41

ตารางที่ ก.2 ความหนาชั้นเคลือบโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 ที่ผ่านการเคลือบผิว  
ด้วยวิธี Pack-Aluminizing ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25  
ชั่วโมง (หน่วยเป็น ไมครอน)

ครั้งที่	1 ชั่วโมง	2.25 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง	6.25 ชั่วโมง
1	75.10	115.08	152.67	227.16
2	93.67	108.10	151.72	228.39
3	89.31	113.04	147.84	235.80
4	88.39	108.83	150.61	232.71
5	90.52	110.25	149.23	236.46
6	-	-	146.88	227.13
ค่ามากที่สุด	75.10	115.08	146.88	236.46
ค่าน้อยสุด	93.67	108.10	152.67	227.13
ค่าเฉลี่ยที่ตัดค่ามากที่สุด และน้อยสุด	89.41	110.7067	149.85	231.015
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1.07	2.141829	1.683152	3.979987

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.3 ความหนาชั้นเคลือบโลหะผสมพิเศษเนื้อพื้นนิกเกิลชนิด IN 738 ที่ผ่านการเคลือบผิว  
ด้วยวิธี Pack-Aluminizing ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25 และ 4 ชั่วโมง  
(หน่วยเป็นไมครอน)

ครั้งที่	1 ชั่วโมง	2.25 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง	6.25 ชั่วโมง
1	85.71	265.43	455.7	-
2	82.61	313.57	463.29	-
3	88.82	298.14	336.71	-
4	89.44	313.57	302.53	-
5	89.31	241.11	484.39	-
6	79.93	318.07	295.44	-
ค่ามากที่สุด	89.31	318.07	484.39	-
ค่าน้อยสุด	79.93	241.11	295.44	-
ค่าเฉลี่ยที่ตัดค่ามากที่สุด และน้อยสุด	86.65	297.6775	389.5575	-
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	3.15	22.69551	82.0121	-

ตารางที่ ก.4 ความหนาชั้นเคลือบโลหะผสมพิเศษเนื้อพ่นนิกเกิลชนิด GTD 111 ที่ผ่านการเคลือบผิว  
ด้วยวิธี Pack-Aluminizing ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25, 4 และ 6.25  
ชั่วโมง (หน่วยเป็น ไมครอน)

ครั้งที่	1 ชั่วโมง	2.25 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง	6.25 ชั่วโมง
1	80.86	151.23	188.89	195.06
2	82.1	151.23	192.59	209.87
3	82.1	140.12	209.87	214.81
4	77.16	140.12	173.45	225.92
5	77.04	156.47	169.67	195.00
6	85.52	139.98	209.87	225.92
ค่ามากที่สุด	85.52	156.47	209.87	225.92
ค่าน้อยสุด	77.04	139.98	169.67	195.00
ค่าเฉลี่ยที่ตัดค่ามากที่สุด และน้อยสุด	80.555	145.675	191.2	211.415
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	2.337598	6.414361	14.95437	12.80357

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ก.5 อัตราส่วนน้ำหนักต่อพื้นที่ผิวเมื่อทำการทดสอบออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลาต่างๆ ของโลหะผสมพิเศษเนื้อพูนิกเกิลชนิด IN 738 และ GTD 111 ที่ผ่านไม่ทำการเคลือบผิว, เคลือบผิวที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และเคลือบผิวที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมงแล้วนำไปอบเป็นเนื้อเดียวที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง (หน่วยเป็นกรัมต่อตารางเซนติเมตร)

ชนิด	0 ชั่วโมง	2 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง	9 ชั่วโมง	15 ชั่วโมง
IN 738	0	-0.000555	-0.000581	-0.000959	-0.002499
IN 738 Aluminized	0	0.000138	0.000138	0.000138	0.000110
IN 738 Aluminized&Annealed	0	0.000099	0.000124	0.000124	0.000124
GTD 111	0	-0.001601	-0.001674	-0.002474	-0.002547
GTD 111 Aluminized	0	0.000085	0.000169	0.000113	0.000056
GTD 111 Aluminized&Annealed	0	0.000161	0.000188	0.000188	0.000188

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ข

### Wagner's Equation

Wagner ได้ทำการศึกษากลไกการเกิดชั้นเคลือบในกระบวนการ Pack-Aluminizing พบว่า จาก Fick's First Law

$$J = -D[\partial C / \partial X] \quad (1)$$

เมื่อกลไกการเกิดชั้นเคลือบเป็นแบบ Diffusion control ความหนาที่ได้จะมีค่าเป็นสัดส่วนกับเวลา ดังสมการ

$$E^2 = 2k't \quad (2)$$

โดยค่า k' คือ ค่า Tammann's constant

### การหาพื้นที่ผิวของสี่เหลี่ยมใดๆ

สี่เหลี่ยมใดๆ หากให้ความกว้างของแต่ละด้านแทนด้วย a, b, c และ d จะสามารถหาค่า semiperimeter ได้ ดังสมการ

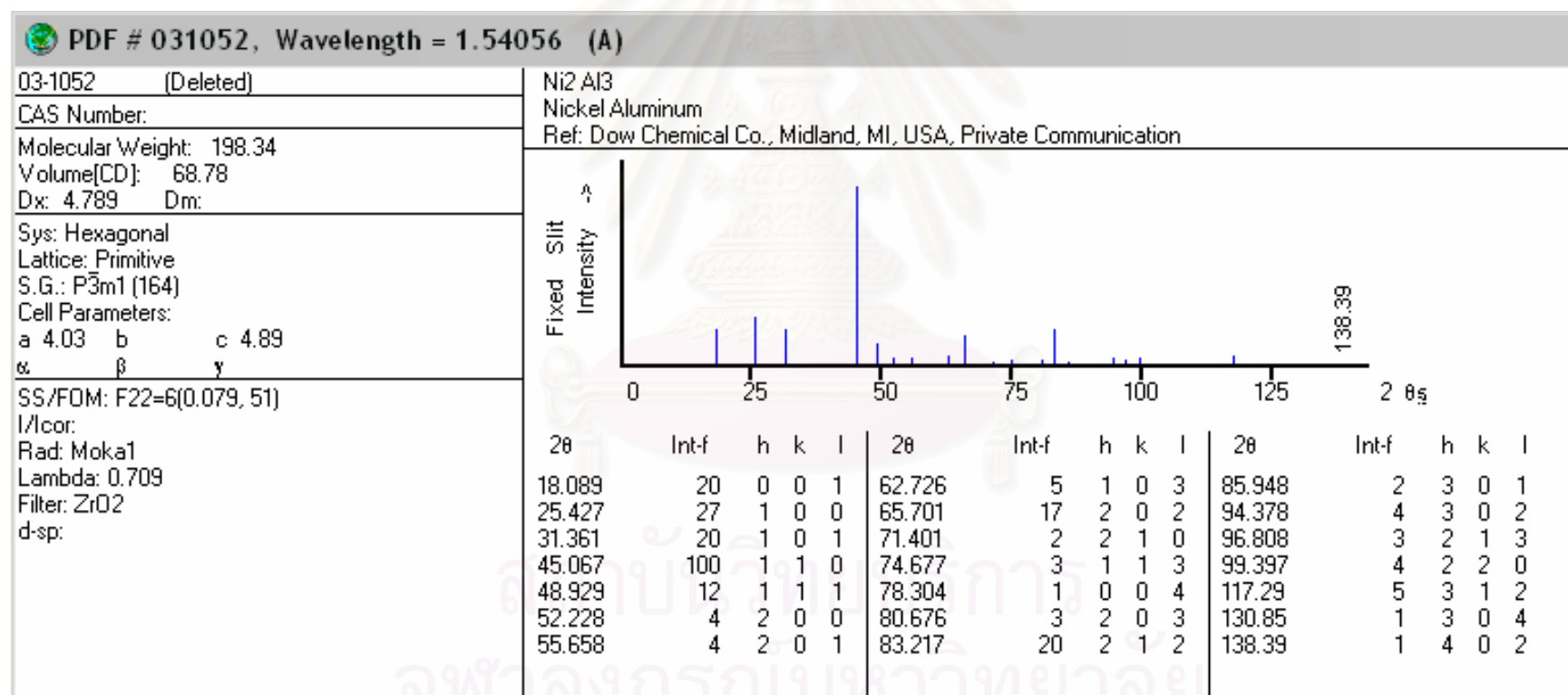
$$s = (a+b+c+d)/2 \quad (3)$$

จากนั้นสามารถหาพื้นที่ผิวของสี่เหลี่ยมใดๆ ได้ดังสมการ

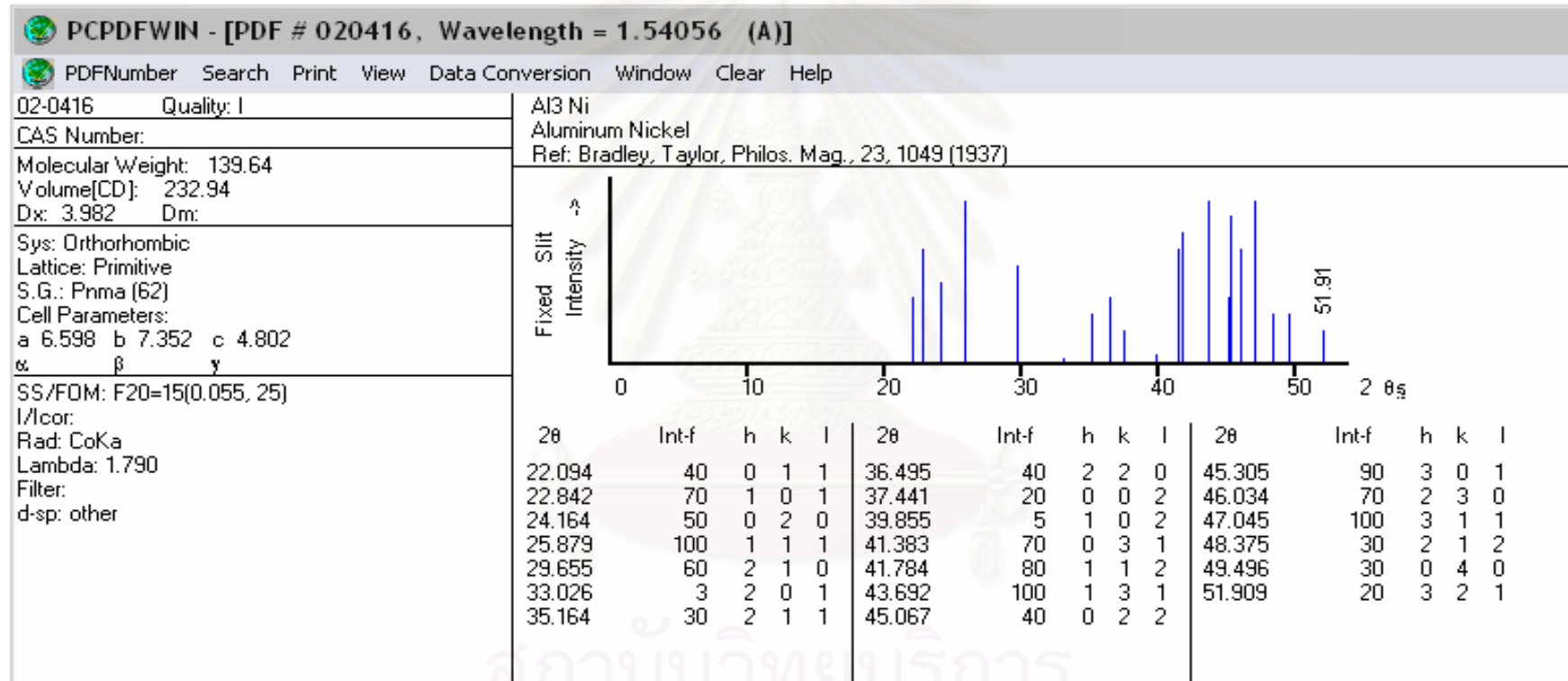
$$A(\Theta) = \sqrt{(s-a)(s-b)(s-c)(s-d)} \quad (4)$$

## ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก.1 Reference pattern: Nickel Aluminum ( $\text{Ni}_2\text{Al}_3$ )

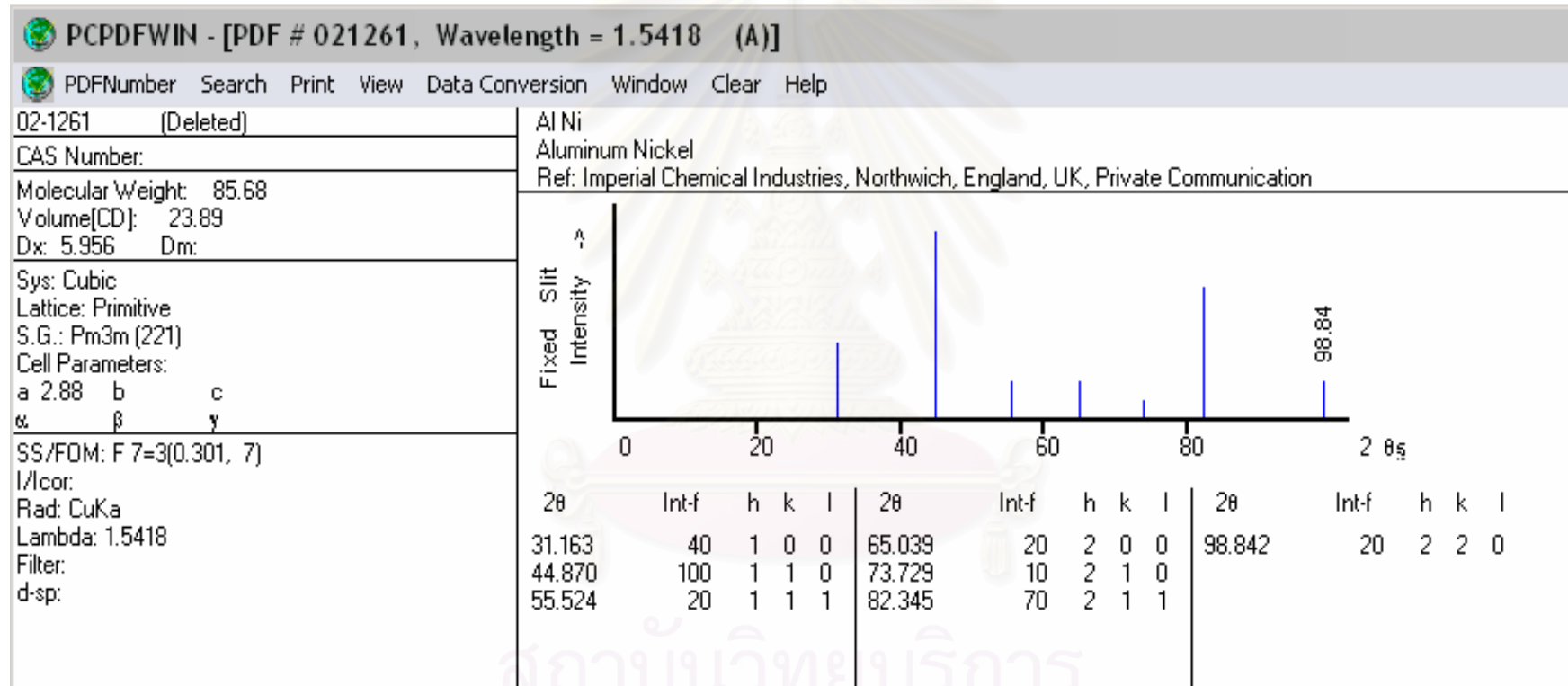


ตารางที่ ก.2 Reference pattern: Nickel Aluminum (NiAl<sub>3</sub>)

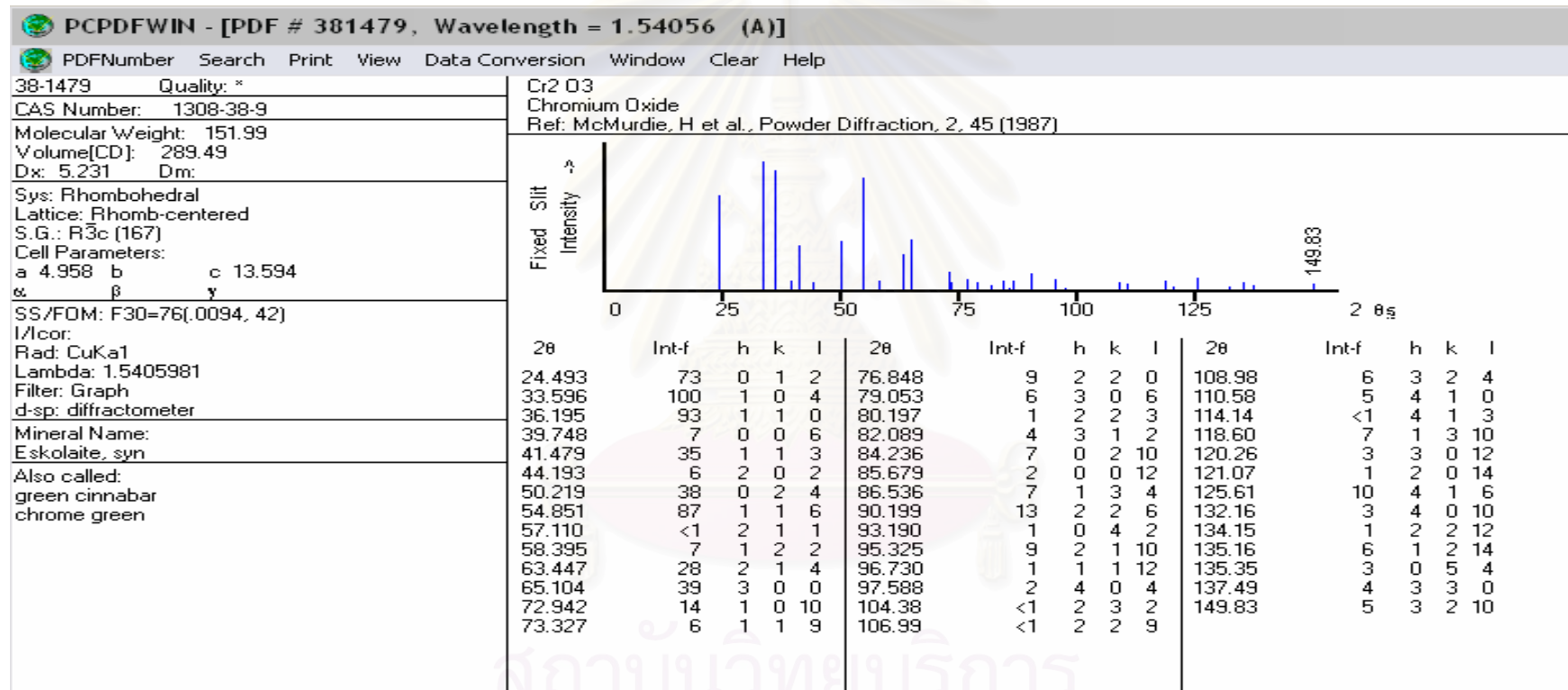


สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.3 Reference pattern: Nickel Aluminum (NiAl)

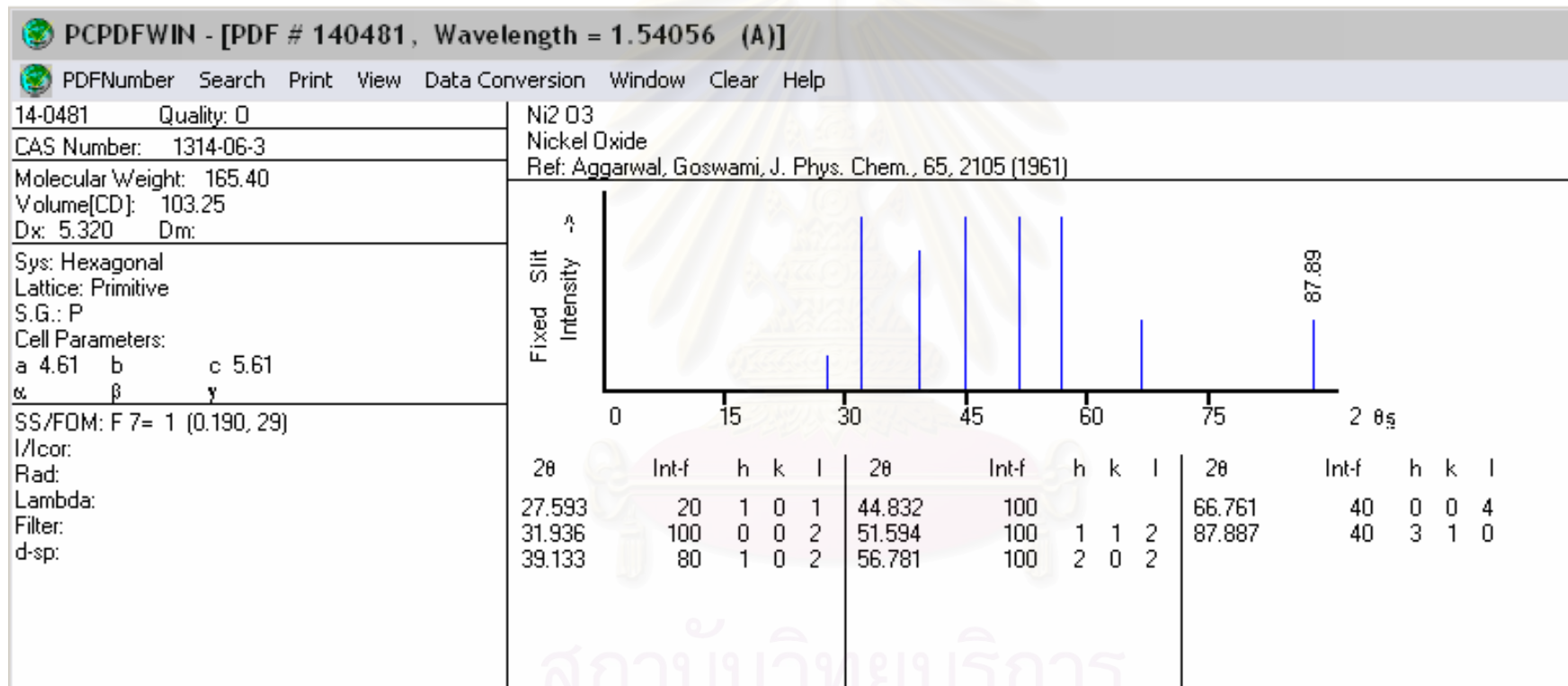


ตารางที่ ก.4 Reference pattern: Chromium Oxide (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)



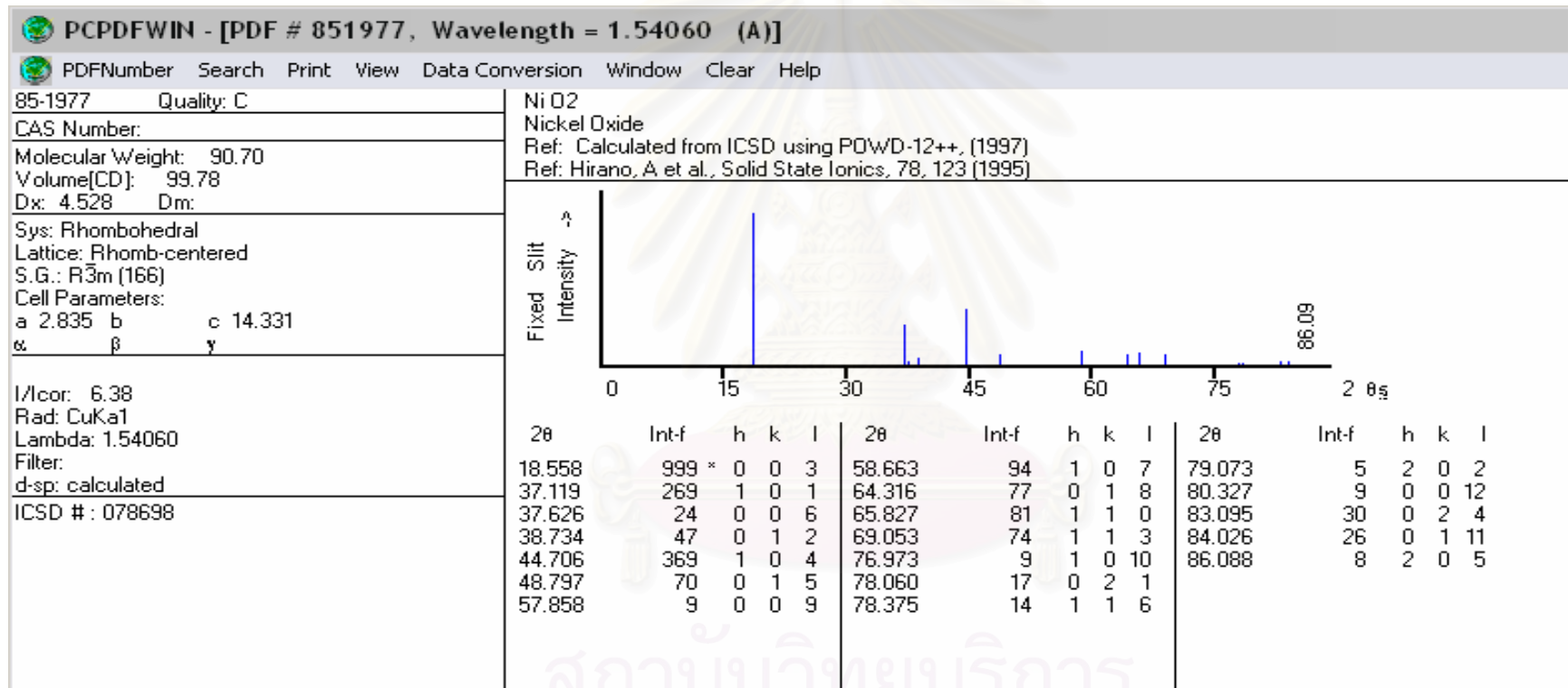
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.5 Reference pattern: Nickel Oxide ( $\text{Ni}_2\text{O}_3$ )



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

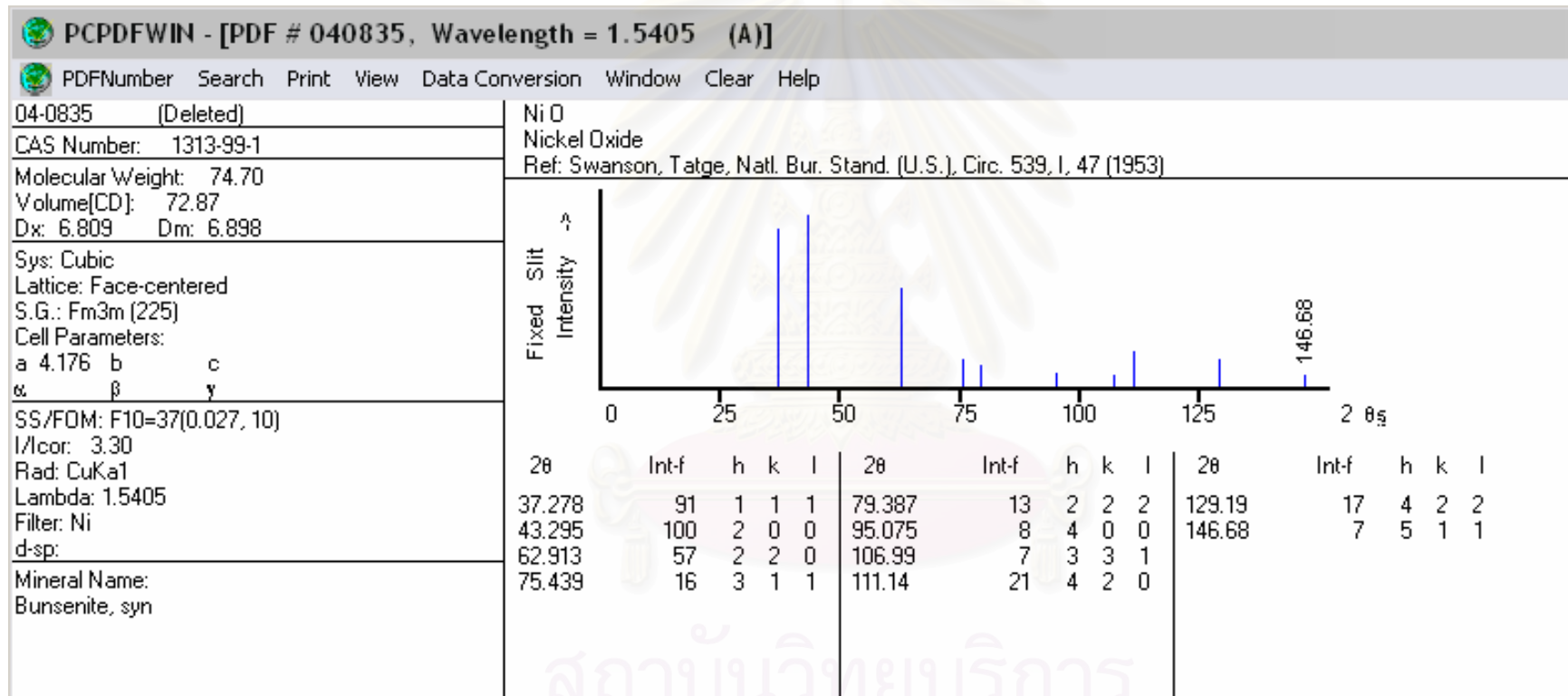
ตารางที่ ก.6 Reference pattern: Nickel Oxide (NiO<sub>2</sub>)



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

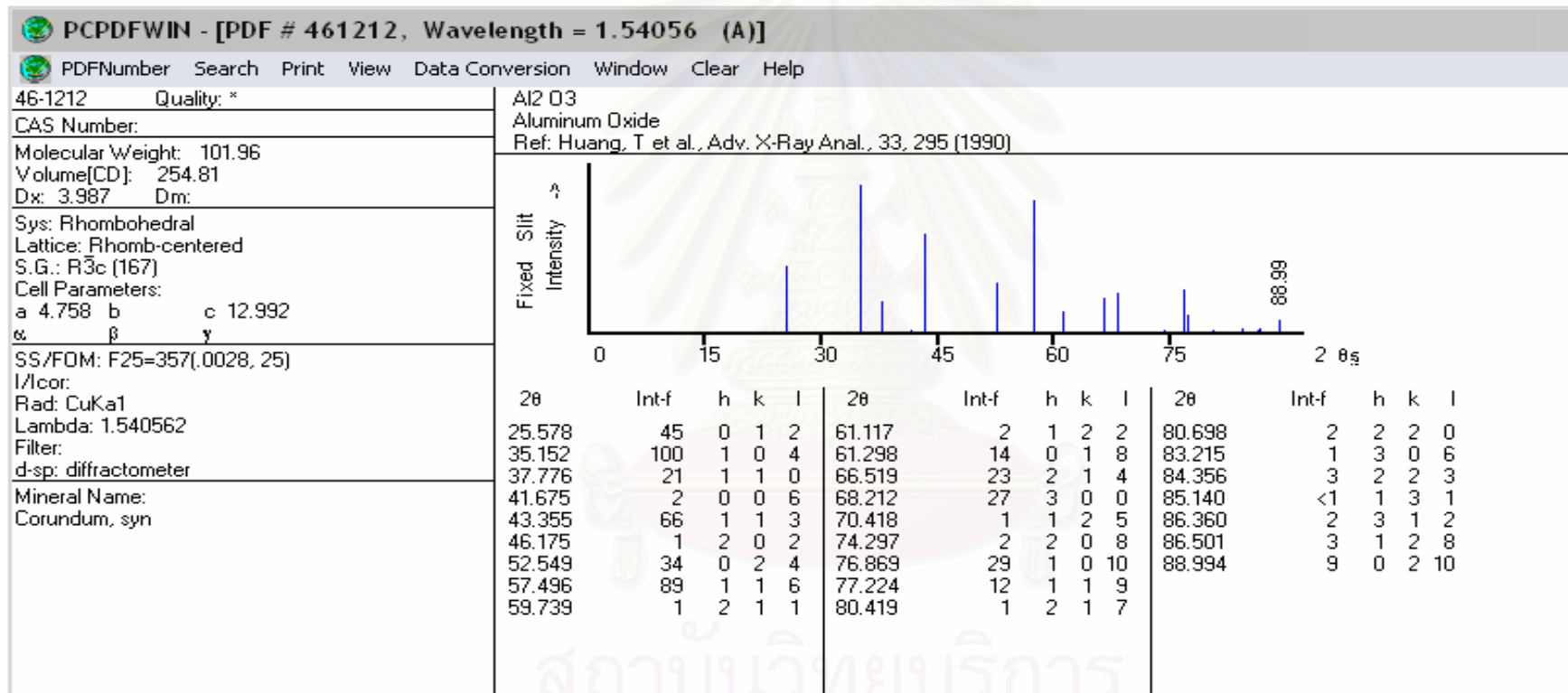


ตารางที่ ก.7 Reference pattern: Nickel Oxide (NiO)



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.8 Reference pattern: Aluminum Oxide ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว สิริินญา จันทร์ศักดิ์สูง เกิดวันศุกร์ที่ 6 พฤษภาคม พ.ศ. 2526 ที่จังหวัดภูเก็ต เข้าศึกษามัธยมปลายที่โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษา จากนั้นได้ศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต หลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการและวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2544 ก่อนเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2548



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย