

ผลของอุณหภูมิในการอบชุบทางความร้อนต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติ  
ทางกลของโพลีอะลูมิเนียมโพรงอากาศแบบเปิดที่เคลือบด้วยนิกเกิล

นางสาวอมฤตา อิศริยภัทร์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2555  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

EFFECTS OF HEAT TREATMENT TEMPERATURE ON MICROSTRUCTURE  
AND MECHANICAL PROPERTIES OF NICKEL PLATED OPEN-CELL ALUMINIUM FOAM

Miss Ammarueda Issariyapat

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 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของอุณหภูมิในการอบชุบทางความร้อนต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของโพลีอะลูมิเนียมโพรงอากาศแบบเปิดที่เคลือบด้วยนิกเกิล
โดย	นางสาวอมฤตา อิศริยภัทร์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโลหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฐมมา วิสุทธิพิทักษ์กุล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนันท์ บุญยงมณีรัตน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศศิริวงค์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ชาคกร จารุพิสิฐธรร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฐมมา วิสุทธิพิทักษ์กุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนันท์ บุญยงมณีรัตน์)

..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.ปัญญาวัชร ว่างยาว)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(อาจารย์ ดร.ราชธีร์ เตชะไพศาลเจริญกิจ)

อมฤดา อิศริยภัทร์ : ผลของอุณหภูมิในการอบชุบทางความร้อนต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของโฟมอะลูมิเนียมโพรงอากาศแบบเปิดที่เคลือบด้วยนิกเกิล (EFFECTS OF HEAT TREATMENT TEMPERATURE ON MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF NICKEL PLATED OPEN-CELL ALUMINIUM FOAM) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร.ปฐมมา วิสุทธิพิทักษ์กุล, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : ผศ.ดร.ยุทธนันท์ บุญยงมณีรัตน์, 95 หน้า.

ในงานวิจัยนี้ได้นำโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ (>99.8%) โพรงอากาศแบบเปิด ขนาด 8 ppi ความหนาแน่นสัมพัทธ์ 3.10% มาเคลือบผิวด้วยนิกเกิลโดยกรรมวิธีทางไฟฟ้า เป็นเวลา 15, 30 และ 60 นาที (ชั้นเคลือบนิกเกิลหนา 25, 52 และ 87 ไมครอน ตามลำดับ) หลังจากนั้นผ่านกระบวนการทางความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 620 และ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน เพื่อศึกษาชั้นสารประกอบที่เกิดขึ้นและศึกษาผลของสารประกอบนิกเกิลอะลูมิเนียมไนต์ที่เกิดขึ้นระหว่างเนื้อพื้นอะลูมิเนียมและชั้นเคลือบนิกเกิลต่อสมบัติทางกลของโฟมอะลูมิเนียม วิเคราะห์สมบัติทางกลของชั้นสารประกอบนิกเกิลอะลูมิเนียมไนต์ด้วย Nano-indentation และทดสอบสมบัติการรับแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียมด้วยเครื่อง Universal testing machine

หลังจากชิ้นงานผ่านกระบวนการทางความร้อน จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วย XRD และ EDS พบชั้นสารประกอบนิกเกิลอะลูมิเนียมไนต์ ได้แก่  $Al_3Ni$  และ  $Al_3Ni_2$  เกิดขึ้นระหว่างเนื้อพื้นอะลูมิเนียมและชั้นเคลือบนิกเกิล เมื่อวิเคราะห์สมบัติการรับแรงอัดพบว่าชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมที่เคลือบผิวด้วยนิกเกิลมีสมบัติการรับแรงอัดที่ดีขึ้นประมาณ 2-4 เท่า แต่สำหรับชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน ณ อุณหภูมิต่างๆ หลังจากเคลือบผิวนั้น พบสารประกอบนิกเกิลอะลูมิเนียมไนต์เกิดขึ้น แม้ว่าสารประกอบนิกเกิลอะลูมิเนียมไนต์ที่เกิดขึ้นนั้นมีสมบัติทางกลที่ดี แต่มีความเปราะสูง และเนื่องจากการเกิดสารประกอบนิกเกิลอะลูมิเนียมไนต์นี้ทำให้เกิดรูพรุนภายในเนื้อวัสดุ จึงเป็นสาเหตุให้ชิ้นงานมีสมบัติการรับแรงอัดที่ลดต่ำลง

ภาควิชา .....วิศวกรรมโลหการ.....ลายมือชื่อ.....  
 สาขาวิชา .....วิศวกรรมโลหการ.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....  
 ปีการศึกษา .....2555.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม .....

# #5370382921 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEYWORDS: ALUMINIUM FOAM / ELECTRODEPOSITION / Al-Ni INTERMETALLICS / HEAT TREATMENT

AMMARUEDA ISSARIYAPAT : EFFECTS OF HEAT TREATMENT TEMPERATURE ON MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF NICKEL PLATED OPEN-CELL ALUMINIUM FOAM. ADVISOR: ASST.PROF. PATAMA VISUTTIPITUKKUL, Ph.D., CO-ADVISOR: ASST.PROF. YUTTANANT BOONYONGMANEERAT., Ph.D., 95 pp

In this research, commercial pure aluminium foam (>99.8% purity) with open-cell structure was coated by nickel followed by heat treatment. The relative density of aluminium foam before coating is 3.10%. The as-receive foams were nickel coated by electrodeposited process for 15, 30 and 60 min. (coating thickness 25, 52 and 87 μm respectively) After that, coated foams were heat-treated at temperature of 620°C to 650°C for 60 min under Ar atmosphere to study effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of open-cell aluminium foam. The specimens, 20x20x20 mm, were compression tested by universal testing machine at the ambient temperature with a constant strain rate of  $2.5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ .

After heat treatment, Intermetallic compound of Al-Ni formed at the interface between Al and Ni. From XRD and EDS analysis, those compound are  $\text{Al}_3\text{Ni}$  and  $\text{Al}_3\text{Ni}_2$ . Another one is to study effect of Al-Ni intermetallic compound layers on compressive properties of open-cell aluminium foam. The as-coated foam compressive properties directly raise about factor 2-4 for compressive strength, yield stress and energy absorption by increasing the coating thickness. The heat-treated under various temperature affected to form Intermetallic compound layers. However, the heat-treated Al-Ni intermetallics formed at the interface shows lower compressive strength comparing to coated specimens, owing to the brittleness of Al-Ni intermetallics and micro voids' formation.

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

Field of Studies ... Metallurgical Engineering ..... Advisor's Signature .....

Academic Year ..... 2012 ..... Co-advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยคำแนะนำและความช่วยเหลือของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฐมา วิสุทธิพิทักษ์กุล ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนันท์ บุญยงมณีรัตน์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงที่ท่านได้อบรมสั่งสอน ถ่ายทอดความรู้ คำแนะนำทั้งลำดับขั้นตอนการทำงาน วิธีการคิดการแก้ไขปัญหา ชี้แนะแนวทางการดำเนินงานวิจัย รวมทั้งตรวจสอบวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ชاکกร จารุพิสิษฐธร ซึ่งเป็นประธานคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร. ปัญญวัชร วังยาว ซึ่งเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร.ราชธีร์ เตชะเจริญกิจไพศาล ซึ่งเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ภายนอกมหาวิทยาลัย ที่สละเวลาเพื่อเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิทยานิพนธ์นี้ ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่านที่ให้ความรู้ทั้งในตำราและการใช้ชีวิตประจำวัน รวมทั้งคอยให้กำลังใจข้าพเจ้าจนกระทั่งสำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาโทมาบัดนี้ ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่านที่ให้คำแนะนำและอำนวยความสะดวกแก่ข้าพเจ้ามาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธำชัช เหลืองวรานันท์ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เตาท่อ ขอขอบพระคุณนายเอกภักดิ์ วิเชียรรัตน์ ที่คอยให้ความช่วยเหลือในเรื่องการจัดหาวัสดุโพลีเอทิลีนที่ใช้ในการทดลอง ขอขอบพระคุณนายชัยพัฒน์ ตั้งพัฒน์เจริญ ที่ช่วยซ่อมแซมเตาท่อจนสามารถใช้งานได้ ทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยดี ขอขอบพระคุณนายรัฐชนันต์ สงวนหมู่ ที่ช่วยให้คำแนะนำในการทำ การทดลอง ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุคนธ์เสถียร ตุงคะสมิต จากศูนย์นวัตกรรมนาโนและเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ Nano-indentation ขอขอบพระคุณศูนย์วิจัยทันตวัสดุศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์การใช้เครื่องมือ และนาย อนุชาติ ศรีจันบาล เจ้าหน้าที่บริการวิทยาศาสตร์ ที่ช่วยสอนการใช้เครื่องทดสอบการรับแรงอัด

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาอันเป็นที่เคารพรักของข้าพเจ้าที่คอยให้ความรัก กำลังใจ และสนับสนุนด้านการศึกษาโดยตลอด และขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่น้องที่ร่วมศึกษาในระดับปริญญาโทมาบัดนี้ ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ กับข้าพเจ้าเป็นอย่างดีเสมอมา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง .....	ญ
สารบัญภาพ .....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย .....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	4
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทรรศน์ .....	5
2.1 อะลูมิเนียม .....	5
2.2 โฟมโลหะ .....	8
2.2.1 ประเภทของโฟมโลหะ .....	9
2.2.1.1 โฟมโลหะโพรงอากาศแบบปิด .....	9
2.2.1.2 โฟมโลหะโพรงอากาศแบบเปิด .....	10
2.2.2 สมบัติของโฟมอะลูมิเนียมโพรงอากาศแบบเปิด .....	11
2.3 การปรับปรุงสมบัติของโฟมอะลูมิเนียมโพรงอากาศแบบเปิด .....	15
2.4 การเคลือบผิวโฟมอะลูมิเนียมด้วยนิกเกิล .....	17
2.4.1 การสเปรย์ร้อน .....	17
2.4.2 การเคลือบไอ .....	18
2.4.3 การชุบ .....	19

	หน้า
2.4.3.1 การชุบหรือการเคลือบแบบไม่ใช้ไฟฟ้า .....	19
2.4.3.2 การชุบหรือการเคลือบแบบใช้กระแสไฟฟ้า .....	20
2.5 การเคลือบผิวอะลูมิเนียมด้วยนิกเกิลโดยใช้กระแสไฟฟ้า .....	22
2.6 สารประกอบเชิงโลหะระหว่างอะลูมิเนียมและนิกเกิล .....	39
2.7 กระบวนการทางความร้อน (Heat Treatment) และการเกิดสารประกอบเชิงโลหะระหว่างชั้นเคลือบและโลหะพื้น .....	30
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย .....	34
3.1 เครื่องมือและวัสดุที่ใช้ในการทดลอง .....	34
3.1.1 อุปกรณ์ เครื่องมือ สารเคมีที่ใช้สำหรับเตรียมชิ้นงานวัสดุพื้น .....	34
3.1.2 อุปกรณ์ เครื่องมือ สารเคมีที่ใช้ทำการชุบเคลือบวัสดุด้วยไฟฟ้า .....	34
3.1.3 อุปกรณ์ เครื่องมือกระบวนการทางความร้อน .....	35
3.1.4 เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบและทดสอบวัสดุ .....	35
3.2 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน .....	36
3.3 การเคลือบนิกเกิลลงบนอะลูมิเนียมโดยการชุบด้วยไฟฟ้า .....	36
3.4 การวิเคราะห์ผิวหลังจากทำการเคลือบด้วยนิกเกิล .....	37
3.5 กระบวนการอบชุบทางความร้อน .....	37
3.6 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและเฟส ของสารประกอบที่เกิดขึ้น .....	38
3.7 การวิเคราะห์สมบัติทางกล .....	38
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและอภิปรายผล .....	40
4.1 โครงสร้างมหภาค .....	41
4.2 ผลของปัจจัยด้านเวลาในการเคลือบผิวด้วยนิกเกิลโดยกรรมวิธีทางไฟฟ้าบนชิ้นงานโม่อะลูมิเนียม .....	43
4.3 ผลของปัจจัยด้านอุณหภูมิในกระบวนการทางความร้อนต่อโครงสร้างจุลภาค .....	46



	หน้า
4.4 การทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุ.....	54
4.4.1 การทดสอบสมบัติทางกลด้วยเครื่อง Nano-indentation.....	54
4.4.2 การทดสอบสมบัติการรับแรงอัด .....	57
4.4.2.1 ความแข็งแรง ณ จุดคราก .....	60
4.4.2.2 ค่าความเครียดช่วงพลาโต .....	61
4.4.2.3 ค่าการดูดซับพลังงาน .....	64
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	72
รายการอ้างอิง.....	75
ภาคผนวก .....	80
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	95

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	สมบัติทางกลของโลหะอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ ณ อุณหภูมิห้อง.....	5
2.2	สมบัติต่างๆของโลหะอะลูมิเนียมบริสุทธิ์.....	6
2.3	ประเภทของโลหะผสมอะลูมิเนียมแบ่งตามธาตุผสมและสมบัติต่างๆ.....	7
2.4	สมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน สมบัติทางไฟฟ้าของโลหะโพมโพรงอากาศ แบบปิด.....	12
4.1	ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานโพมอะลูมิเนียม.....	41
4.2	รูปร่างเรขาคณิตของโพมอะลูมิเนียม.....	42
4.3	โครงสร้างมหภาคของชิ้นงานกลุ่มต่างๆ.....	42
4.4	ผลของเวลาในการเคลือบผิวโพมอะลูมิเนียมด้วยนิกเกิลโดยกรรมวิธีทางไฟฟ้าต่อ ความหนาชั้นเคลือบและความหนาแน่นสัมพัทธ์.....	46
4.5	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่กระบวนการทางความร้อน 600 องศาเซลเซียส.....	51
4.6	สมบัติทางกลของวัสดุ วิเคราะห์จากเครื่อง Nano-indentation.....	56
4.7	ค่าความเครียดช่วงพลาโตจากการคำนวณทางทฤษฎีและจากการทดลองของ ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการต่างๆ.....	64
4.8	ค่าการดูดซับพลังงานจากการคำนวณทางทฤษฎีและจากการทดลองของชิ้นงาน ผ่านกระบวนการต่างๆ.....	68
4.9	ค่าสมบัติทางกลของโพมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์และโพมอะลูมิเนียม ณ สภาวะของ กระบวนการต่างๆ ที่ได้จากการกราฟความเค้น-ความเครียดจากการทดสอบการรับ แรงอัด ดังนี้ ความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield strength) ความเค้นช่วงพลาโต (Plateau stress) และค่าการดูดซับพลังงาน (Energy absorption) .....	69
ข.1	การคำนวณความหนาแน่นสัมพัทธ์ของโพมอะลูมิเนียมตั้งต้น.....	83
ข.2	การคำนวณความหนาแน่นของชิ้นงานโพม.....	84
ข.3	การคำนวณความหนาแน่นของวัสดุเนื้อพื้นแบบผสม.....	85
ค.1	รัศมีของก้านโพมอะลูมิเนียมตั้งต้น ความหนาของชั้นสารประกอบและชั้นเคลือบ นิกเกิล.....	86
ค.2	อัตราส่วนพื้นที่ของแต่ละเฟส.....	87

## ตารางที่

หน้า

ง.1	สมบัติทางกลของ Aluminium, Nickel, $Al_3Ni$ และ $Al_3Ni_2$ .....	90
จ.1	ค่าความแข็งแรง ณ จุดครากของชิ้นงานโคมที่ผ่านกระบวนการต่างๆ ซึ่งได้จากการคำนวณโดยใช้กฎการผสม.....	92
ฉ.1	ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานโคมที่ผ่านกระบวนการต่างๆ.....	94

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	(ก) ภาพวัสดุก้อน (Bulk Materials) ที่มีรูพรุนแทรกกระจายตามเนื้อพื้น (ข) ภาพวัสดุที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุน (Cellular Materials).....	8
2.2	(ก) โฟมโลหะที่มีลักษณะโครงสร้างโพรงอากาศแบบปิด, (ข) โฟมโลหะที่มีลักษณะ โครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิด.....	10
2.3	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโฟมโลหะแสดงช่วงการ แปรรูป 3 ทั้งช่วง .....	14
2.4	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโฟมคาร์บอน และโฟม คาร์บอนที่ทำการเคลือบผิวด้วยทองแดง.....	15
2.5	การเพิ่มขึ้นของค่าความเค้นในช่วงพลาโตและค่าโมดูลัสของชิ้นงานโฟมคาร์บอน สัมพันธ์กับน้ำหนักชั้นเคลือบทองแดง.....	16
2.6	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของการทดสอบความต้านทาน แรงอัด เปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียม และชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมที่ผ่าน กระบวนการ Plasma Electrolytic Oxidation (PEO).....	17
2.7	กรรมวิธีการเคลือบผิวโลหะด้วยไฟฟ้าของทองแดง (copper, Cu) ด้วยสารละลาย คอปเปอร์ซัลเฟต ( $CuSO_4$ ).....	22
2.8	กรรมวิธีการเคลือบผิวอะลูมิเนียมด้วยนิกเกิล.....	23
2.9	ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและความเค้นของโฟมอะลูมิเนียมโครงสร้างโพรง อากาศแบบเปิด ผ่านการชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้าโดยใช้กระแสตรง ที่ความหนาของชั้น เคลือบต่างๆ.....	25
2.10	(ก) ความแข็งแรงแรงอัด (Compressive Strength) และ (ข) ความแข็งแรงแรงอัด จำเพาะ (Specific compressive strength) ของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์และโฟม อะลูมิเนียมที่เคลือบผิวด้วยนิกเกิล-ทั้งสแตนท์ที่สภาวะต่างๆ.....	26
2.11	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ โฟมอะลูมิเนียมที่ทำการเคลือบผิวด้วยนิกเกิลทั้งสแตนท์เป็นเวลา 1 และ 3 ชั่วโมง.....	27

ภาพที่		หน้า
2.12	พลังงานที่สามารถดูดซับได้ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรและต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนัก ของโพลีอะลูมิเนียมบริสุทธิ์และโพลีอะลูมิเนียมที่เคลือบผิวด้วยนิกเกิล-ทังสแตนที่สภาวะต่างๆ.....	28
2.13	แผนภูมิสมดุลสำหรับระบบอะลูมิเนียม-นิกเกิล.....	29
2.14	ภาพถ่าย FESEM และวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย EDS ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนหลังจากเคลือบผิวอะลูมิเนียมด้วยนิกเกิลโดยวิธี Cold gas dynamic spraying process (CDSP) (ก) 450°C (ข) 500°C (ค) 600°C.....	32
3.1	กรรมวิธีทางความร้อน.....	38
4.1	ภาพชิ้นงาน 4.1(ก) คือชิ้นงานโพลีอะลูมิเนียมตั้งต้น ภาพที่ 4.1(ข) คือโพลีอะลูมิเนียมที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยนิกเกิลโดยกรรมวิธีทางไฟฟ้า และภาพที่ 4.1(ค) คือชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยนิกเกิลโดยกรรมวิธีทางไฟฟ้าและผ่านกระบวนการทางความร้อน.....	41
4.2	ภาคตัดขวางของ (ก) ชิ้นงานอะลูมิเนียมแบบก้อนที่เคลือบผิวด้วยนิกเกิลเป็นเวลา 15 นาที (ข) (ค) และ (ง) คือชิ้นงานโพลีอะลูมิเนียมโพรงอากาศแบบเปิดที่เคลือบผิวด้วยนิกเกิลเป็นเวลา 15 นาที 30 นาที และ 60 นาทีตามลำดับ.....	44
4.3	ความหนาเฉลี่ยของชั้นเคลือบนิกเกิลบนผิวชิ้นงานโพลีอะลูมิเนียม.....	45
4.4	โครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวางของชิ้นงานโพลีอะลูมิเนียมโพรงอากาศแบบเปิด (ก) เคลือบผิวด้วยนิกเกิลโดยกรรมวิธีทางไฟฟ้าเป็นเวลา 30 นาทีและผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิ 620 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (ข) เคลือบผิวด้วยนิกเกิลโดยกรรมวิธีทางไฟฟ้าเป็นเวลา 30 นาทีและผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง.....	47
4.5	XRD ของชิ้นงานโพลีอะลูมิเนียมที่ทำการเคลือบผิวด้วยนิกเกิลและผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1, 2.25 และ 4 ชั่วโมง.....	48
4.6	(ก) ภาพการทำ line scan ของชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบทางความร้อนที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง, (ข) กราฟที่ได้จากการทำ line scan ตามเส้นสีเหลืองของรูปที่ 4.6 1)ปริมาณอะลูมิเนียม 2)ปริมาณนิกเกิล .....	49

ภาพที่	หน้า
4.7	การเปลี่ยนแปลงสัญญาณ DTA ที่อุณหภูมิต่างๆ ของอะลูมิเนียมและนิกเกิล..... 51
4.8	รูปทรงที่พบในภาพตัดขวางชิ้นงานโไฟมอะลูมิเนียมที่ทำการเคลือบผิวด้วยนิกเกิลโดยการชุบด้วยไฟฟ้าและผ่านกระบวนการทางความร้อน ..... 53
4.9	ภาพจำลองการแพร่ระหว่างโลหะ 2 ชนิดที่มีสัมประสิทธิ์การแพร่ต่างกัน โดย $J_1$ และ $J_2$ ( $\text{mole m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) คือ intrinsic flux ของโลหะ..... 54
4.10	ลักษณะความเป็น Elastic-Plastic ของ Al, Ni, $\text{Al}_3\text{Ni}_2$ และ $\text{Al}_3\text{Ni}$ ขณะการให้โหลดและการปล่อยโหลด..... 55
4.11	รอยกดจากการทดสอบ Nano-indentation ภายใต้อุณหภูมิ 50 กรัม..... 56
4.12	สมบัติทางกลของ Al, $\text{Al}_3\text{Ni}$ , $\text{Al}_3\text{Ni}_2$ และ Ni (ก) Hardness of Indentation (ข) Vickers Hardness (ค) Elastic of Indentation (ง) Yield stress..... 57
4.13	ลักษณะการทดสอบการรับแรงอัดของโไฟมอะลูมิเนียมที่ความเครียด 0%, 30%, 50% และ 70%..... 58
4.14	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโไฟมอะลูมิเนียมโพรงอากาศแบบเปิดในสภาวะต่างๆ..... 59
4.15	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโไฟมอะลูมิเนียมตั้งต้น และ (ก) ชิ้นงานโไฟมอะลูมิเนียมที่เคลือบผิวด้วยนิกเกิลโดยกรรมวิธีทางไฟฟ้าเป็นเวลา 30 และ 60 นาที (ข) ชิ้นงานโไฟมอะลูมิเนียมที่เคลือบผิวด้วยนิกเกิลโดยกรรมวิธีทางไฟฟ้าและผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิ 620 และ 650 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 60 นาที..... 60
4.16	ความแข็งแรง ณ จุดครากในสภาวะต่างๆ ของ ชิ้นงานโไฟมอะลูมิเนียมในสภาวะของกระบวนการต่างๆ..... 61
4.17	ค่าความเครียดช่วงพลาโตของชิ้นงานโไฟมอะลูมิเนียมในสภาวะของกระบวนการต่างๆ..... 62
4.18	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสัมพัทธ์และค่าความเครียดช่วงพลาโต จากการทดลองและการคำนวณทางทฤษฎี ของชิ้นงานโไฟมอะลูมิเนียมในสภาวะของกระบวนการต่างๆ..... 63

ภาพที่	หน้า
4.19	ค่าการดูดซับพลังงานของโพลีอะลูมิเนียมในสถานะของกระบวนการต่างๆ..... 66
4.20	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสัมพัทธ์และค่าการดูดซับพลังงาน จากการทดลองและการคำนวณทางทฤษฎี ของชิ้นงานโพลีอะลูมิเนียมในสถานะของกระบวนการต่างๆ..... 67
4.21	โครงสร้างจุลภาคของภาคตัดขวางของชิ้นงานโพลีอะลูมิเนียมหลังการทดสอบการต้านทานแรงอัด (ก) ชิ้นงานโพลีอะลูมิเนียมที่ทำการเคลือบด้วยนิกเกิลโดยกรรมวิธีทางไฟฟ้า (ข) ชิ้นงานโพลีอะลูมิเนียมที่ทำการเคลือบด้วยนิกเกิลโดยกรรมวิธีทางไฟฟ้าและผ่านกระบวนการทางความร้อน..... 70
ก.1	ภาพโครงสร้างโพลีอะลูมิเนียม..... 81
ก.2	ภาพจำลองโครงสร้างโพลีอะลูมิเนียม..... 82
ค.1	ภาพจำลองโครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวาง..... 86

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

โฟมอะลูมิเนียมเป็นวัสดุประเภทใหม่อีกประเภทหนึ่งที่มีการนำมาประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆกันอย่างแพร่หลาย เช่น นำมาทำเป็นโครงสร้างในอุตสาหกรรมยานยนต์ วัสดุดูดซับแรงกระแทก วัสดุดูดซับเสียงและแรงสั่นสะเทือน ตัวเร่งปฏิกิริยา และวัสดุแลกเปลี่ยนความร้อน ในปัจจุบันมีการใช้งานโฟมอะลูมิเนียมในงานการดูดซับเสียงบนพื้นถนนทางด่วน ดูดซับเสียงตามปล่องระบายอากาศ และห้องเครื่องยนต์ กั้นชนส่วนหน้าของรถยนต์ รวมทั้งใช้ในงานอุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำ ชีวเวช และอุปกรณ์ที่ใช้เกี่ยวกับอวกาศ นอกจากนี้ยังนำมาออกแบบเพื่อตกแต่งในงานสถาปัตยกรรมอีกด้วย [1]

เหตุผลที่โฟมอะลูมิเนียมมีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางเนื่องมาจากสมบัติที่ดีหลายประการ เช่น ความหนาแน่นต่ำ, ความแข็งแรงและความแข็งตึงจำเพาะมีค่าสูง ความสามารถในการดูดซับพลังงานที่ดี [2, 3] มีความเหนียวอยู่ในเกณฑ์ที่ดีและมีน้ำหนักที่เบา ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีการพยายามนำโฟมอะลูมิเนียมและโฟมผสมอะลูมิเนียมมาใช้งานแทนโลหะอื่นในงานบางประเภท เนื่องจากสามารถลดน้ำหนักของโครงสร้างได้มาก [4] ถึงแม้ว่าโฟมอะลูมิเนียมนั้นมีการใช้งานอยู่มากมาย แต่ในความเป็นจริงแล้วโฟมอะลูมิเนียมมีข้อเสียหลัก คือมีความต้านทานแรงอัดที่ต่ำ ในการใช้งานจริงแม้ว่าโฟมอะลูมิเนียมจะมีสมบัติด้านความเหนียวที่ดีแต่ยังคงมีข้อจำกัดในแง่ของความแข็งแรงและความแข็งตึงต่อหน่วยน้ำหนักที่ไม่เพียงพอในงานหลายประเภท เช่น ในงานที่ต้องรับแรงกระแทกจากการกระทบและแรงระเบิด [5] เป็นต้น นอกจากนี้คุณสมบัติหลอมเหลวต่ำเนื่องมาจากสมบัติของวัสดุพื้น จึงเป็นข้อจำกัดในการใช้งานที่สภาวะอุณหภูมิต่ำเท่านั้น ซึ่งไม่สามารถประยุกต์ใช้งานบางประเภทได้ เช่น อุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิสูง เป็นต้น การเลือกใช้งานโฟมอะลูมิเนียมให้เหมาะสมจึงเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงเป็นอย่างมาก การศึกษาการปรับปรุงสมบัติของโฟมอะลูมิเนียมโดยปรับปรุงสมบัติด้านความแข็งแรง จึงมีความสำคัญและก่อให้เกิดประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก ซึ่งจะทำให้สามารถใช้งานโฟมอะลูมิเนียมในด้านอุตสาหกรรมได้



หลากหลายและกว้างขวางมากขึ้น การเคลือบผิว (Coating) เป็นวิธีหนึ่งที่ทางอุตสาหกรรมนิยมนำมาใช้เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและเพิ่มสมบัติที่ดีบางประการของวัสดุเนื้อพื้น เช่น การต้านทานการเกิดออกซิเดชันและต้านทานการกัดกร่อนบริเวณผิวชิ้นงาน การต้านทานการสึกหรอ โดยอาศัยวัสดุอื่นที่มีสมบัติที่ดีกว่า

การเคลือบผิวสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การพ่นเคลือบ(Thermal Spraying) และการเคลือบไอ (Vapor Deposition, PVD CVD) เป็นต้น แต่เนื่องจากชิ้นงานโพลิเมอร์บางที่ซับซ้อน การชุบด้วยไฟฟ้า (Electroplating) จึงเป็นวิธีหนึ่งที่เหมาะสมและนิยมในทางอุตสาหกรรมเนื่องจากเป็นวิธีที่ทำได้ ที่อุณหภูมิต่ำ ราคาถูก สามารถทำซ้ำได้ และสามารถควบคุมความหนาของชั้นเคลือบได้โดยควบคุมกระแสไฟฟ้าและเวลาที่ใช้ [6] นิกเกิลเป็นโลหะชนิดหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจอย่างมากในการนำมาเคลือบผิวชิ้นงานอะลูมิเนียม เนื่องจากนิกเกิลมีสมบัติที่ดีหลากหลายประการเมื่อเทียบกับสมบัติของเนื้อพื้นอะลูมิเนียม โดยเฉพาะในเรื่องของความแข็งแรง มีหลากหลายงานวิจัยที่ศึกษาผลในการนำนิกเกิลและนิกเกิลผสมมาเคลือบบนผิวอะลูมิเนียมโพลิเมอร์โดยกรรมวิธีทางไฟฟ้า ในงานวิจัยของ Jung, A และคณะ [7] นั้นได้เคลือบผิวอะลูมิเนียมโพลิเมอร์ด้วยนิกเกิลผลึกระดับนาโน พบว่าความหนาของชั้นเคลือบเพียง 15 ไมครอน สามารถเพิ่มค่าการดูดซับพลังงานได้ถึง 9 เท่าในระบบการรับโหลดแบบ quasi-static และในงานวิจัยของ Boonyongmaneerat, Y. และคณะ [8] ได้ศึกษาผลของความหนาของชั้นเคลือบนิกเกิล-ทังสเตนผลึกระดับนาโนต่อความแข็งแรงการรับแรงอัดของโพลิเมอร์ พบว่าความหนาของชั้นเคลือบที่มากขึ้นส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของสมบัติทางกลของชิ้นงานโพลิเมอร์ เช่น ความแข็งแรงในการรับแรงอัด ค่าการดูดซับพลังงาน และความแข็งแรง ณ จุดคราก [9] เป็นต้น

ส่วนใหญ่แล้วโพลิเมอร์โพรงอากาศแบบเปิดนั้นเน้นการใช้งานไปในด้านการจัดการอุณหภูมิของระบบ เช่น ในชิ้นส่วน Turbine blade ได้นำโพลิเมอร์มาใช้ในการระบายความร้อนเพื่อยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ [10] เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามในการใช้งานนั้นเมื่อมีอุณหภูมิสูงเข้ามาเกี่ยวข้องด้วยแล้ว หากโพลิเมอร์โครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิดผ่านการปรับปรุงด้วยการเคลือบผิว เช่น นิกเกิล จะมีโอกาสที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้สารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic Compound) ระหว่างเนื้อพื้นอะลูมิเนียมกับชั้นเคลือบนิกเกิล ทำให้เกิดเป็นสารประกอบขึ้น เช่น

สารประกอบนิกเกิลอะลูมิเนียม [11] สารประกอบนิกเกิลอะลูมิเนียมเป็นวัสดุที่มีความแข็งและแข็งแรงมากกว่าอะลูมิเนียมและนิกเกิล [12] แต่อย่างไรก็ดีหากเกิดสารประกอบเชิงโลหะนี้ในเชิงโครงสร้าง อาจเกิดปัญหาจากความเปราะและความต้านทานในการแตกหักจาก Thermal Shock ที่ต่ำ นอกจากนี้ยังเกิดรูพรุนขึ้นภายในเนื้อชิ้นงาน [13, 14] ซึ่งยังไม่มีการศึกษาในเชิงลึกว่ามีผลกระทบต่อความแข็งแรงโครงสร้างโฟมอย่างไรในงานวิจัยนี้จึงนำแนวคิดดังกล่าวมาประยุกต์กับชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมโพรงอากาศแบบเปิดเพื่อศึกษาผลของชั้นสารประกอบที่เกิดขึ้นต่อสมบัติทางกลในด้านต่างๆของโฟม เช่น ความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield Stress), ความต้านทานแรงอัด (Compressive Strength) หรือค่าความเค้นช่วงพลาโต (Plateau Stress) และความสามารถในการดูดซับพลังงาน (Energy Absorption) เป็นต้น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. หาค่าของตัวแปรในการเคลือบผิวและตัวแปรในกระบวนการทางความร้อนต่อโครงสร้างจุลภาคของโฟมอะลูมิเนียมโพรงอากาศแบบเปิด
2. หาค่าของชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างอะลูมิเนียมและนิกเกิลที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของโฟมอะลูมิเนียมต่อสมบัติทางกล ได้แก่ ความต้านทานแรงอัด (Compressive Strength), ค่าความเค้นช่วงพลาโต (Plateau Stress) และค่าการดูดซับพลังงาน (Energy Absorption)

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาผลของชั้นเคลือบนิกเกิลบนชิ้นงานอะลูมิเนียมโพรงอากาศแบบเปิดที่ผ่านกระบวนการอบชุบทางความร้อนต่อสมบัติทางกล ซึ่งเคลือบผิวโดยใช้วิธีการชุบด้วยไฟฟ้า (Electroplating) สภาวะในการเคลือบคือการควบคุมค่ากระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 0.165 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ด้วยเครื่อง DC Power Supply ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส และสารอิเล็กโทรไลต์คือนิกเกิลซัลเฟต ( $\text{NiSO}_4$ ), นิกเกิลคลอไรด์ ( $\text{NiCl}_2$ ), กรดบอริก (Boric acid) ช่วงเวลา 30 - 60 นาที

2. ทำการอบชุบทางความร้อนที่อุณหภูมิ 620 - 650 องศาเซลเซียส และในช่วงเวลา 0 ถึง 60 นาที

3. ทดสอบความต้านทานแรงอัด (Compressive Strength) ที่ Strain rate  $2.5 \times 10^{-4}$  ต่อวินาที

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงผลของตัวแปรในการเคลือบผิวและตัวแปรในกระบวนการทางความร้อน ต่อโครงสร้างจุลภาคของโพลีเอสเตอร์นิยมนิโพรทอกราคแบบเปิด

2. ทราบถึงผลของชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างโพลีเอสเตอร์นิยมนิโพรทอกราคแบบเปิดที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของโพลีเอสเตอร์นิยมนิโพรทอกราคแบบเปิด ได้แก่ ความต้านทานแรงอัด (Compressive Strength), ค่าความเค้นช่วงพลาโต (Plateau Stress) และค่าการดูดซับพลังงาน (Energy Absorption)

## บทที่ 2

### วรรณกรรมปริทัศน์

#### 2.1 อะลูมิเนียม (Aluminium, Al)

โลหะอะลูมิเนียมเป็นโลหะที่มีน้ำหนักเบา มีความอ่อน ความเหนียวที่สูง สามารถดัด ตัด กลึง และหล่อแบบได้ง่าย มีความหนาแน่น  $2.7 \text{ g/cm}^3$  ซึ่งมีค่าประมาณ 1 ใน 3 ของโลหะเหล็ก ลักษณะของผิวมีสีเทาและไม่เป็นเงาเนื่องจากมีชั้นฟิล์มออกไซด์บางๆปกคลุมอยู่ ชั้นฟิล์มนี้เกิดขึ้นจากการที่ผิวของโลหะอะลูมิเนียมสัมผัสกับอากาศและทำปฏิกิริยากับออกซิเจนอย่างรวดเร็วเกิดเป็นฟิล์มบางของสารประกอบอะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ซึ่งฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์นี้สามารถป้องกันไม่ให้ออกซิเจนแทรกลงไปทำปฏิกิริยากับเนื้ออะลูมิเนียมภายในได้ ส่งผลดีในด้านต้านทานการกัดกร่อนในบรรยากาศทั่วไป โลหะอะลูมิเนียมบริสุทธิ์มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 660 องศาเซลเซียส สำหรับโลหะอะลูมิเนียมบริสุทธิ์มีค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield strength) อยู่ที่ประมาณ 7-25 MPa และมีความสามารถในการนำความร้อนและนำไฟฟ้าที่ดี [15] สำหรับสมบัติต่างๆของโลหะอะลูมิเนียมแสดงไว้ในตารางที่ 2.1 และ 2.2 ดังนี้

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกลของโลหะอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ ณ อุณหภูมิห้อง [16]

Purity, %	Tensile yield strength , (0.2% offset)		Elongation in 50 mm (2 in), %
	MPa	ksi	
99.99	10	1.4	50
99.8	20	2.9	45
99.6	30	4.4	43

ตารางที่ 2.2 สมบัติต่างๆของโลหะอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ [17]

Property	Unit	Value	Note
Atomic number	-	13	-
Density, $\rho$	Kgm <sup>-3</sup>	2698	-
Melting point	°C	660.45	<1013x10 <sup>-3</sup> bar
Boiling point	°C	2056	<1013x10 <sup>-3</sup> bar
Vapour pressure	Pa	3.7x10 <sup>-3</sup>	at 927 °C
Mass internal energy, U	JKg <sup>-1</sup>	3.98x10 <sup>5</sup>	-
Mass thermal capacity, C <sub>p</sub>	JKg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	897	at 25 °C
Thermal conductivity, $\lambda$	Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	237	at 27 °C
Linear expansion coefficient, $\alpha_1$	10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>	23.1	at 25 °Cb
Electrical resistivity, $\rho$	10 <sup>-9</sup> $\Omega$ m	26.548	at 25 °C
Magnetic susceptibility, K	-	0.6x10 <sup>-3</sup>	at 25 °C
Longitudinal elasticity modulus, E	MPa	69 000	-
Poisson ratio,	-	0.33	-

สำหรับในท้องตลาดจะอะลูมิเนียมบริสุทธิ์แบ่งออกเป็น 4 เกรด ดังนี้

1. อะลูมิเนียม (A1) 99.99% มีคุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อนได้ดีเยี่ยมในสภาวะของน้ำทะเล
2. อะลูมิเนียม (A2) 99.80% ใช้ในอุตสาหกรรมเคมีเพราะว่ามีความเหนียว (Ductility) สูง
3. อะลูมิเนียม (A3) น้อยกว่า 99.60% ต้านทานต่อการเกิดกัดกร่อนได้มาก เหมาะกับงานที่ไม่ต้องการอะลูมิเนียมบริสุทธิ์มากนัก

4. อะลูมิเนียม (A4) 99% ใช้ทำพวกภาชนะใส่อาหารทั่ว ๆ ไป อะลูมิเนียมแผ่นที่ใช้ทำงานทั่ว ๆ ไปซึ่งไม่ต้องการอะลูมิเนียมบริสุทธิ์สูงนัก

โลหะอะลูมิเนียมบริสุทธิ์นั้นมีการใช้งานไม่มากนักเนื่องจากข้อจำกัดมากมาย นักโลหวิทยาจึงปรับปรุงสมบัติของอะลูมิเนียมโดยการเติมธาตุอื่นๆเข้าไปเพื่อเพิ่มสมบัติที่ดีบางประการตามความต้องการในการเลือกใช้งาน เช่น สมบัติทางกล (Mechanical properties) มีค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield strength) อยู่ที่ประมาณ 200-600 MPa ความสามารถในการขึ้นรูป (Formability) และความสามารถในการเชื่อม (Weldability) [15] เป็นต้น ทำให้ในปัจจุบันมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในรูปของโลหะผสมอะลูมิเนียม โลหะอะลูมิเนียมแบ่งประเภท ออกตามสมบัติต่างๆตามตารางที่ 2.3 ดังนี้

ตารางที่ 2.3 ประเภทของโลหะผสมอะลูมิเนียมแบ่งตามธาตุผสมและสมบัติต่างๆ [17, 18]

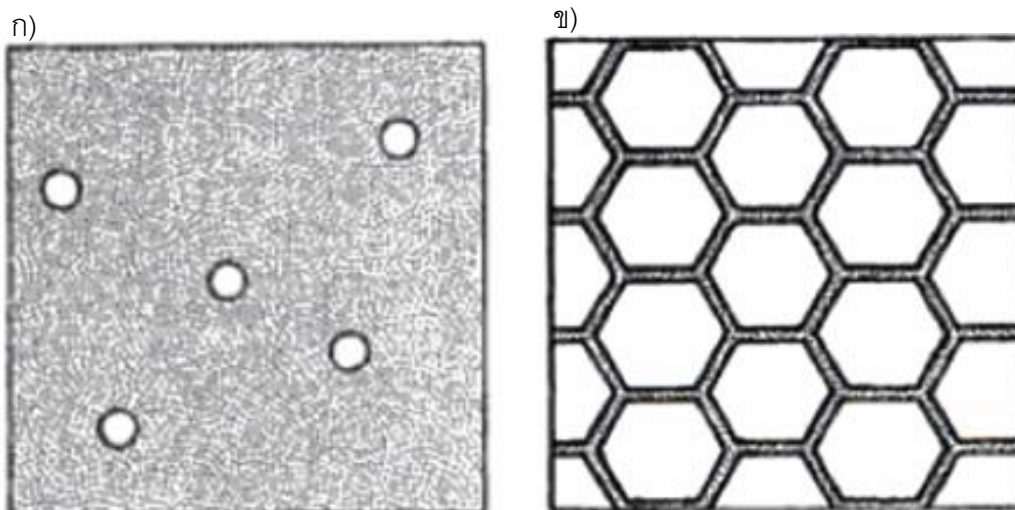
ธาตุผสม	Grade of casting alloy	Grade of wrought alloy	สมบัติต่างๆ
ไม่เติมธาตุใด	10000	1000	สามารถขึ้นรูปและเชื่อมได้ง่าย ทนการกัดกร่อนได้ดี แต่ความแข็งแรงต่ำ
Copper	20000	2000	ความแข็งแรงสูง กลึงไสตัดเจาะได้ง่าย แต่ขึ้นรูปและเชื่อมยาก ทนการกัดกร่อนต่ำ
Manganese		3000	สามารถขึ้นรูปและเชื่อมได้ ทนการกัดกร่อนได้ ความแข็งแรงปานกลาง
Silicon	40000	4000	สามารถขึ้นรูปและเชื่อมได้ ทนการกัดกร่อนได้
Magnesium	50000	5000	สามารถขึ้นรูปและเชื่อมได้ ทนการกัดกร่อนได้ดี

ตารางที่ 2.3 ประเภทของโลหะผสมอะลูมิเนียมแบ่งตามธาตุผสมและสมบัติต่างๆ (ต่อ)

Magnesium + Silicon		6000	ทนการกัดกร่อนและความสามารถในการเชื่อมต่ำ แต่กลึงไสตัดเจาะได้ และความแข็งแรงสูง
Zinc	70000	7000	สามารถขึ้นรูปได้ดี

## 2.2 โฟมโลหะ (Metal foam) [2, 19]

โฟมหรือวัสดุที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุน (Cellular materials) คือ วัสดุที่มีโพรงอากาศเป็นส่วนประกอบจำนวนมาก ซึ่งเป็นผลมาจากโครงร่างกึ่งก้าน (Struts) หรือผนัง (Plates) ที่เชื่อมต่อกันเป็นโครงข่าย สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงเมื่อพูดถึงโฟมหรือวัสดุที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุน (Cellular materials) คือค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative density,  $\rho_{rel}$ ) โดยทั่วไปแล้วจะมีค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์น้อยกว่าร้อยละ 30 เนื่องจากหากมีค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่มากกว่าร้อยละ 30 นั้น จะเปลี่ยนลักษณะของวัสดุเป็นรูปร่างเสมือนว่าเป็นวัสดุก้อน (Bulk materials) ที่มีรูพรุนแยกกันและกระจายตามเนื้อพื้น เปรียบเทียบได้ดังภาพที่ 2.1 (ก) และ (ข)



ภาพที่ 2.1 (ก) ภาพวัสดุก้อน (Bulk materials) ที่มีรูพรุนแทรกกระจายตามเนื้อพื้น, (ข) แสดงภาพวัสดุที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุน (Cellular materials) [20]

สำหรับโฟมโลหะ (Metal foams) นั้นเป็นวัสดุใหม่ทางวิศวกรรม [3] ซึ่งอยู่ในช่วงกำลังพัฒนา ทำให้ยากต่อการควบคุมลักษณะและสมบัติที่ได้ จึงต้องอาศัยเทคนิคในการผลิต ซึ่งเป็นเหตุให้โฟมโลหะนั้นมีราคาสูง แต่ยังมีใช้งานกันเนื่องจากมีจุดเด่นหลายประการ เช่น น้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับวัสดุเดียวกันต่อหน่วยปริมาตรที่เท่ากัน ประสิทธิภาพในการดูดซับพลังงาน และความสามารถในการนำความร้อนสูงเนื่องจากมีพื้นที่ผิวมาก เป็นต้น ลักษณะเด่นดังกล่าวทำให้โฟมโลหะเป็นที่สนใจในการนำมาเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานบางประเภท เช่น อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) วัสดุกันกระแทก (Packaging) ตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst supports) โครงสร้างที่ต้องการน้ำหนักเบา (Light weight structural part) เป็นวัสดุติดผนังเพื่อป้องกันเสียง และฉนวนป้องกันความร้อน (Thermal insulator) เป็นต้น

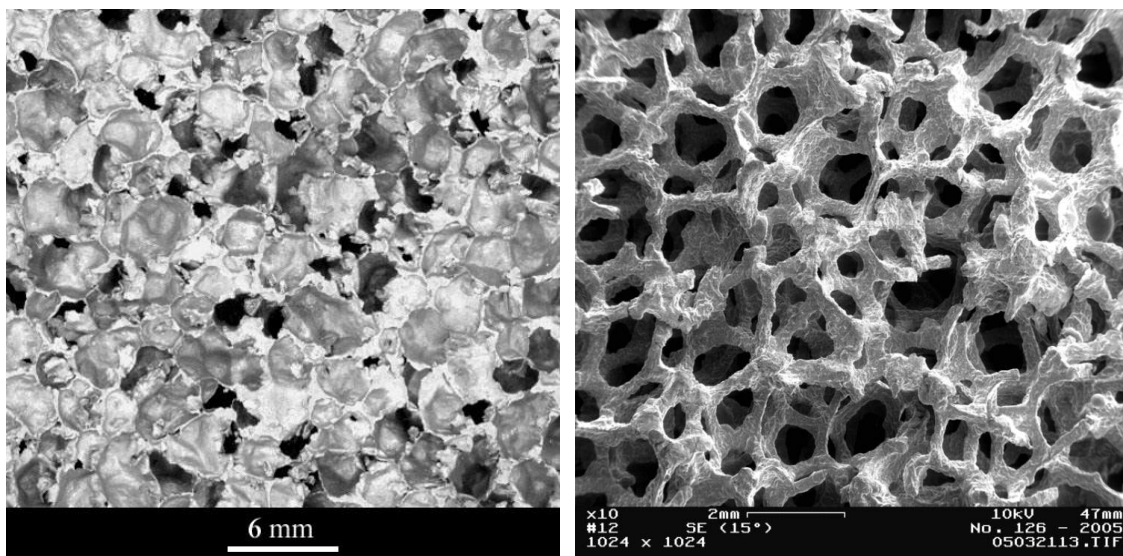
## 2.2.1 ประเภทของโฟมโลหะ

ประเภทของโฟมโลหะแบ่งตามลักษณะโครงสร้างเป็น 2 ประเภทคือโครงสร้างโพรงอากาศแบบปิด (Closed-cell foams) และโครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิด (Open-cell foams) ดังภาพที่ 2.2 (ก) โฟมโลหะที่มีลักษณะโครงสร้างโพรงอากาศแบบปิด (ข) โฟมโลหะที่มีลักษณะโครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิด

### 2.2.1.1 โฟมโลหะโพรงอากาศแบบปิด (Closed-cell metal foam)

โฟมโลหะโพรงอากาศแบบปิดนั้นจะมีผนังกั้นระหว่างแต่ละโพรงอากาศ ทำให้ของไหลไม่สามารถไหลผ่านได้ มีรายงานกล่าวว่าเริ่มมีการศึกษาในครั้งแรกเมื่อปี 1926 โดยการเป่าแก๊สเฉื่อย (Inert gas) ลงในโลหะหลอมเหลว ต่อมามีการศึกษาเพิ่มเติมโดยการทดลองให้ความร้อนกับปรอทและอะลูมิเนียมจนอะลูมิเนียมหลอมเหลว ในสภาพความดันสูง ปรอทกลายเป็นไอแทรกตัวในน้ำโลหะเมื่อเย็นตัวลงจนอะลูมิเนียมกลับเป็นของแข็งจะได้โฟมอะลูมิเนียม จนในที่สุดในทศวรรษที่ 90 ก็ได้มีการนำมาใช้งานจริงในภาคอุตสาหกรรม โดยโฟมโลหะโพรงอากาศแบบปิดที่นำมาใช้นั้นผลิตจากการเป่าแก๊สลงในโลหะหลอมเหลวหรือผสม Foaming agent เพื่อทำให้เกิดฟองอากาศ ณ อุณหภูมิสูง





ภาพที่ 2.2 (ก) โฟมโลหะที่มีลักษณะโครงสร้างโพรงอากาศแบบปิด, (ข) โฟมโลหะที่มีลักษณะโครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิด [21]

โฟมโลหะโพรงอากาศแบบปิดนิยมนำมาใช้ในงานในด้านของการป้องกันความเสียหายจากการกระแทก (Impact-absorbing) แต่ข้อเสียคือเมื่อถูกใช้งานในการรับแรงกระแทกแล้วจะเกิดการเปลี่ยนรูปขึ้น ทำให้ใช้งานได้ครั้งเดียว นอกจากนี้เนื่องจากโฟมโลหะมีน้ำหนักเบา ความหนาแน่นสัมพัทธ์ต่ำ และมีความแกร่งต่อหน่วยน้ำหนักสูงจึงนิยมนำไปใช้งานในด้านของโครงสร้างที่ต้องการน้ำหนักเบาอีกด้วย

### 2.2.1.2 โฟมโลหะโพรงอากาศแบบเปิด (Open-cell metal foam)

โฟมโลหะโพรงอากาศแบบเปิด เป็นโฟมที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นร่างแห ส่วนที่เป็นผนังเชื่อมทะลุถึงกัน ทำให้ของไหลสามารถไหลผ่านได้ เนื่องจากวัสดุชนิดนี้มีพื้นที่ผิวมากและโลหะที่นำมาผลิตโฟมโลหะนั้นมีความสามารถในการนำความร้อนและทนความร้อนสูงจึงนิยมนำมาใช้งานเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) และตัวคัดกรองอนุภาค (Filter) ในอุตสาหกรรมเคมี เป็นต้น

## 2.2.2 สมบัติของโพลีเอทิลีนโพรพิลีนไฟเบอร์

โพลีเอทิลีนโพรพิลีนไฟเบอร์เป็นโพลีเมอร์ที่นิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมโพลีเอทิลีนโพรพิลีนไฟเบอร์เนื่องจากโพลีเอทิลีนโพรพิลีนไฟเบอร์มีข้อดีมากมาย เช่น มีน้ำหนักที่เบา มีความแข็งแรงต่อหน่วยน้ำหนักสูง มีความหนาแน่นต่ำ มีความสามารถในการดูดซับพลังงานการอัดที่ดี ทนอุณหภูมิสูงได้ดีเมื่อเทียบกับโพลีโพรพิลีน สำหรับในอุตสาหกรรมนั้นนิยมนำโพลีเอทิลีนโพรพิลีนไฟเบอร์มาใช้งาน ดังตัวอย่างเช่น นำมาทำเป็นส่วนหนึ่งของตัวถังรถยนต์หรือเครื่องบิน บางตำแหน่งเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับพลังงานในการชนกระแทก ทำเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) เนื่องจากมีพื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อนมาก และนำมาทำเป็นตัวกั้นไฟ (Flame arresters) เป็นต้น [20]

สำหรับสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน สมบัติทางไฟฟ้าของโพลีเอทิลีนโพรพิลีนไฟเบอร์โครงสร้างโพรพิลีนไฟเบอร์นั้นเป็นไปตามตารางที่ 2.4 ซึ่งจำเป็นต้องทราบข้อมูลของโพลีเอทิลีนโพรพิลีนไฟเบอร์นั้นๆ จึงจะสามารถกำหนดสมบัติต่างๆของโพลีเอทิลีนโพรพิลีนไฟเบอร์ได้ ซึ่งงานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับโพลีเอทิลีนโพรพิลีนไฟเบอร์ ข้อมูลของสมบัติโพลีเอทิลีนโพรพิลีนไฟเบอร์เป็นไปตามที่แสดงในตารางที่ 2.1 และ ตารางที่ 2.2 และจากความสัมพันธ์ในตารางที่ 2.4 นั้นจะเห็นว่าค่าความหนาแน่นหรือความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative density) ของโพลีเอทิลีนโพรพิลีนไฟเบอร์นั้นเป็นตัวแปรที่สำคัญอีกตัวแปรหนึ่ง โดยค่าความหนาแน่น ( $\rho$ ) ของโพลีเอทิลีนโพรพิลีนไฟเบอร์คำนวณได้ดังสมการที่ 2.1 [3]

$$\rho_f = \frac{m_f}{V} \quad (\text{สมการที่ 2.1})$$

ความหนาแน่นสัมพัทธ์ ( $\rho_{rel}$ ) คำนวณได้ดังสมการที่ 2.2 [3]

$$\rho_{rel} = \frac{\rho_f}{\rho_s} \times 100 \quad (\text{สมการที่ 2.2})$$

โดย  $\rho_s$  คือความหนาแน่นของโลหะที่ใช้ทำโฟมนั้นๆ สำหรับอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ที่มีความหนาแน่นคือ  $2.7 \text{ g/cm}^3$  และค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์นี้มีผลต่อทั้งสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางกลของโฟมโลหะ

ตารางที่ 2.4 แสดงสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน สมบัติทางไฟฟ้าของโฟมโลหะโพรงอากาศแบบเปิด [3]

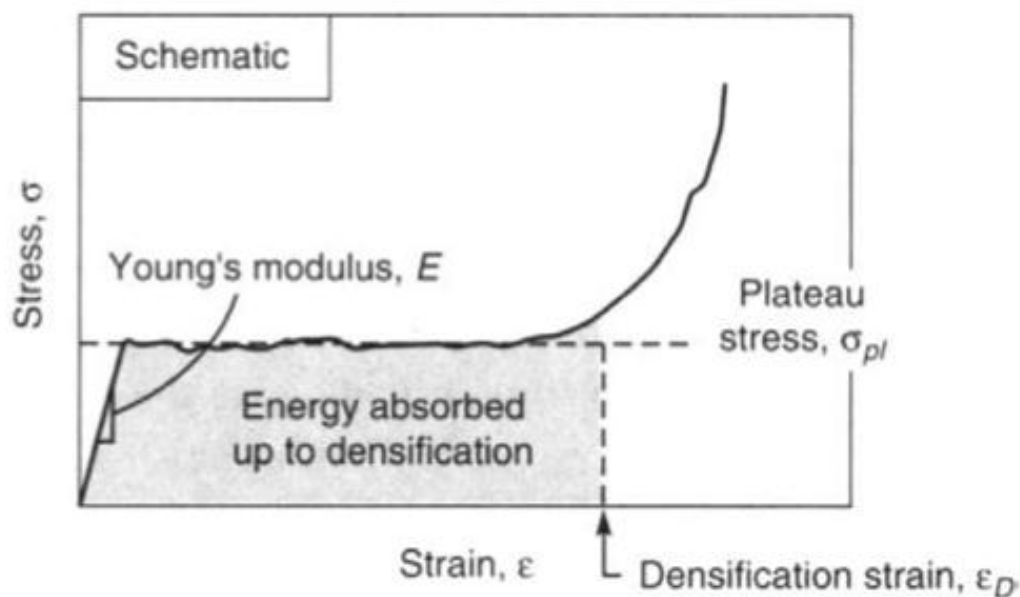
Mechanical, Thermal, Electrical properties of open-cell foam	Open-cell foam
Young's modulus (GPa), E	$E = (0.1 - 4)E_s\left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)$
Shear modulus (GPa), G	$G \approx \frac{3}{8}E$
Bulk modulus (GPa), K	$K \approx 1.1E$
Flexural modulus (GPa), $E_f$	$E_f \approx E$
Poisson's ratio, $\nu$	0.32-0.34
Compressive strength (MPa), $\sigma_c$	$\sigma_c = (0.1 - 1.0)\sigma_{c.s}\left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^{\frac{3}{2}}$
Tensile strength (MPa), $\sigma_t$	$\sigma_t \approx (1.1 - 1.4)\sigma_c$
Endurance limit (MPa), $\sigma_e$	$\sigma_e \approx (0.5 - 0.75)\sigma_c$
Densification strain, $\epsilon_d$	$\epsilon_d = (0.9 - 1.0)\left(1 - 1.4\frac{\rho}{\rho_s} + 0.4\left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^3\right)$
Loss coefficient, $\eta$	$\eta \approx (0.95 - 1.05)\left(\frac{\eta_s}{\rho_s}\right)$
Hardness (MPa), H	$H = \sigma_c\left(1 + 2\left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)\right)$
Initiation toughness (J/m <sup>2</sup> ), $J_{ic}$	$J_{ic}^* \approx \beta\sigma_{y.s}l\left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^\rho$

ตารางที่ 2.4 แสดงสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน สมบัติทางไฟฟ้าของโพลีเอทิลีนพริกอากาศแบบเปิด (ต่อ) [3]

Melting point (K), $T_m$	As solid
Max. service temp. (K) $T_{max}$	As solid
Min. service temp. (K), $T_{min}$	As solid
Specific heat (J/kg.K), $C_p$	As solid
Thermal cond. (W/m.K), $\lambda$	$\left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^{1.8} < \frac{\lambda}{\lambda_s} < \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^{1.65}$
Thermal exp. ( $10^{-6}/K$ ), $\alpha$	As solid
Latent heat (kJ/kg), $L$	As solid
Resistivity ( $10^{-8}$ ohm.m), $R$	$\left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^{-1.6} < \frac{R}{R_s} < \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^{-1.85}$

สำหรับสมบัติทางกลของโพลีเอทิลีนพริกอากาศนั้นพฤติกรรมการรับแรงอัดเป็นสิ่งที่สำคัญมาก เนื่องจากการใช้งานหลักๆของโพลีเอทิลีนพริกอากาศคือนำมาเป็นวัสดุสำหรับดูดซับพลังงานในการชนหรือกระแทก ซึ่งพฤติกรรมการรับแรงอัดนั้นสามารถแสดงในรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้น (Stress,  $\sigma$ ) และความเครียด (Strain,  $\epsilon$ ) ดังภาพที่ 2.3 จากกราฟจะสังเกตได้ว่าการแปรรูปจะมีอยู่ 3 ช่วง คือ ช่วงแรกเป็นช่วงที่แปรรูปแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear elastic) โดยค่าโมดูลัสของยัง (Young's modulus) จะหาได้จากความชันของกราฟในช่วงยืดหยุ่นเชิงเส้นนี้ เนื่องจากได้รับแรงกระทำน้อยจึงเกิดการงอ การยืดตัวของโพลีเอทิลีนพริกอากาศเท่านั้น แต่ถ้าหากแรงกระทำเกินจุดคราก (Yield stress) ไปแล้วจะเกิดการแปรรูปอย่างถาวร (Plastic deformation) ได้ สำหรับช่วงที่ 2 คือช่วงที่เรียกว่าช่วงพลาโต (Plateau regime) หรือช่วงการแปรรูปในบริเวณที่ราบ ช่วงนี้จะเป็นช่วงที่กราฟระหว่างความเค้นและความเครียดมีความชันคงที่ ความเค้นที่คงที่หรือเกือบคงที่ในช่วงนี้จะเรียกว่า Plateau stress และในช่วงนี้การแปรรูปจะเกิดจากการบิดงอ (Bending) และการโก่งของก้านผนังโพลีเอทิลีนพริกอากาศ สำหรับ

ในช่วงที่ 3 คือช่วงสุดท้ายเรียกว่าช่วงการแปรรูปแบบอัดแน่น (Densification) จะเป็นช่วงที่ความเค้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในขณะที่ความเครียดเพิ่มเล็กน้อย



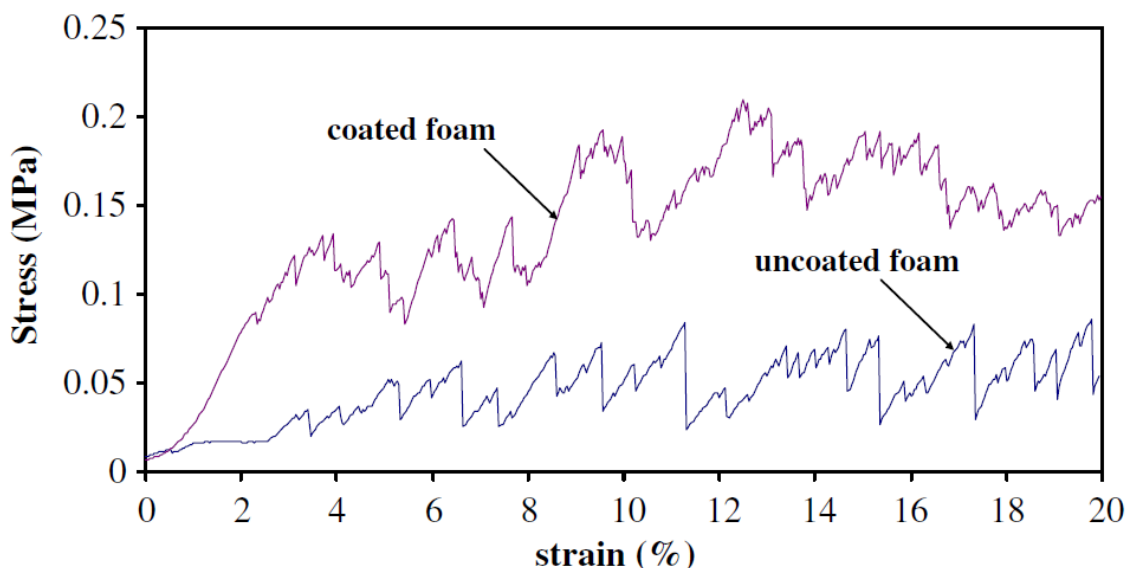
ภาพที่ 2.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโพลีโหระ  
แสดงช่วงการแปรรูป 3 ทั้งช่วง [3]

จากที่กล่าวมาแล้วว่าโพลีโหระมีนิยามนั้นนิยมนำมาใช้งานในเรื่องของการดูดซับพลังงานจากการชนการกระแทก ดังนั้นสมบัติการรับแรงอัดเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึง และพื้นที่ใต้กราฟของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดบอกถึงพลังงานที่สามารถดูดซับได้ ดังพื้นที่ส่วนที่เป็นสี่เหลี่ยมในภาพที่ 2.9 ในการนำไปใช้งานจริงในการรับแรงเพื่อป้องกันความเสียหาย ค่าความเค้นที่ใช้ได้นั้นจะต้องต่ำกว่าค่าความเค้นสูงสุด (Densification strain,  $\epsilon_D$ ) ที่โพลีโหระนั้นรับได้ โพลีโหระที่ดีจึงควรมีความเครียดในช่วง Plateau ที่ยาวเพื่อที่จะดูดซับพลังงานได้หมดก่อนจะถึงช่วงอัดแน่น สำหรับโพลีโหระสามารถคำนวณค่าขีดจำกัดของความเครียด ( $\epsilon_D$ ) ได้ดังสมการที่ 2.3 [3]

$$\varepsilon_d = 0.8 - 1.75\left(\frac{\rho}{\rho_s}\right) \quad (\text{สมการที่ 2.3})$$

### 2.3 การปรับปรุงสมบัติของโฟมอะลูมิเนียมโพรงอากาศแบบเปิด

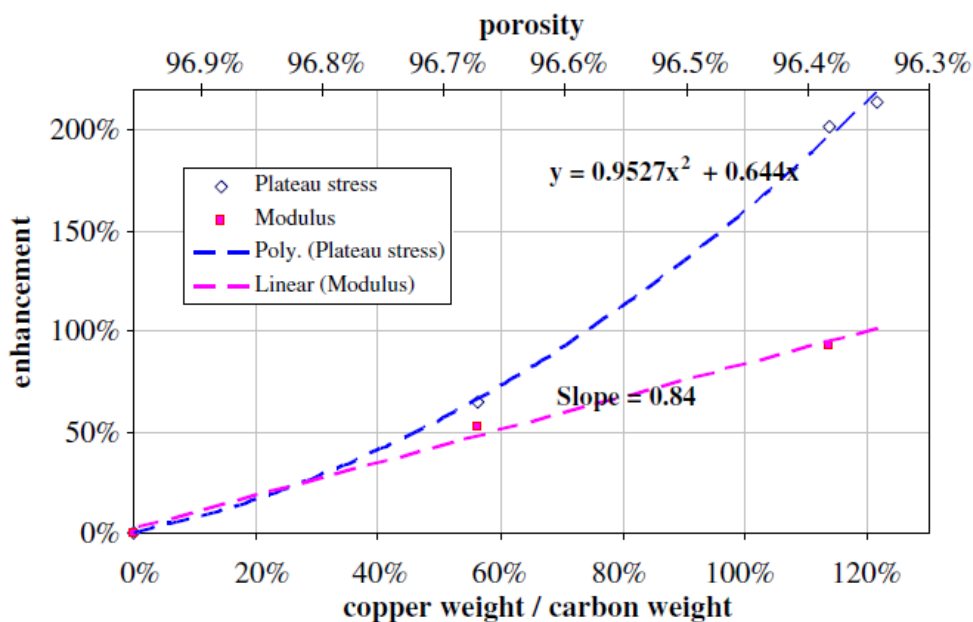
ดังที่กล่าวมาในหัวข้อ 2.1 ในปัจจุบันนี้โฟมอะลูมิเนียมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากอะลูมิเนียมมีความหนาแน่นต่ำ น้ำหนักเบา และสามารถขึ้นรูปได้ง่าย [22] โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมยานยนต์ เครื่องจักรกล และไฟฟ้าเคมี เป็นต้น แต่มีข้อด้อยในการใช้งานโลหะอะลูมิเนียมในเรื่องของจุดหลอมเหลวต่ำ ความแข็งแรงและการทนต่อการกัดกร่อนที่ไม่ดี เป็นต้น สมบัติดังที่กล่าวนี้เป็นข้อจำกัดในการใช้งานในด้านต่างๆ แต่ในปัจจุบันมีความพยายามที่จะเอาชนะข้อจำกัดในการใช้งานดังกล่าว ทางเลือกหนึ่งในการนำมาใช้งานคือการนำวัสดุมาปรับปรุงพื้นผิวเพื่อเพิ่มสมบัติที่ดีในด้านต่างๆของวัสดุเนื้อพื้น



ภาพที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโฟมคาร์บอน และโฟมคาร์บอนที่ทำการเคลือบผิวด้วยทองแดง

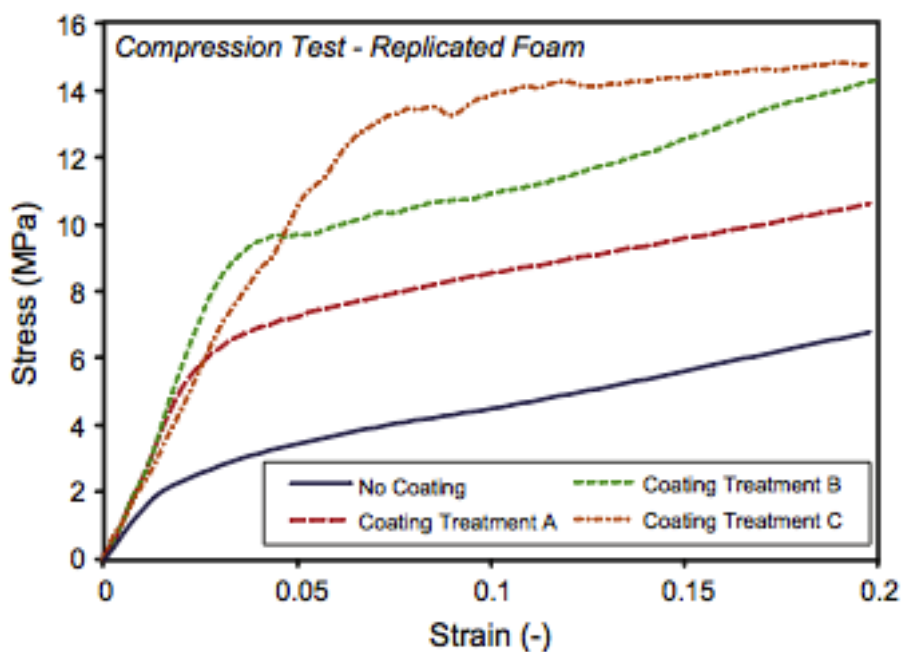
มีงานวิจัยที่ได้นำโฟมโลหะมาเคลือบผิวด้วยวัสดุอื่นและศึกษาสมบัติทางกล ดังเช่น งานวิจัยของ Almajali และคณะ [23] ได้ศึกษาสมบัติทางกลของชิ้นงานโฟมคาร์บอนที่เคลือบผิวด้วยทองแดง

พบว่าโพลีคาร์บอนที่เคลือบผิวด้วยทองแดงนั้นมีความแข็งแรงการรับแรงอัดที่สูงขึ้น ดังภาพที่ 2.4 และค่าความเค้นช่วงพลาโตและค่าโมดูลัสมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นสัมพันธ์กับน้ำหนักของชั้นเคลือบทองแดง ดังแสดงในภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 การเพิ่มขึ้นของค่าความเค้นในช่วงพลาโตและค่าโมดูลัสของชิ้นงานโพลีคาร์บอน สัมพันธ์กับน้ำหนักชั้นเคลือบทองแดง

นอกจากนี้งานวิจัยของ T. Abdulla และคณะ [24] ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของการเคลือบผิวบนชิ้นงานโพลีอะลูมิเนียมโพรงอากาศแบบเปิดด้วยวิธี Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) ต่อความแข็งแรงจำเพาะ เมื่อนำไปทดสอบความต้านทานแรงอัดแล้วพบว่ามีความเค้น ณ จุดคราก (Yield stress) และความเค้นในช่วงพลาโตสูงขึ้นเมื่อชั้นเคลือบหนามากขึ้น ดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของการทดสอบความต้านทานแรงอัด เปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียม และชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการ Plasma Electrolytic Oxidation (PEO)

วิธีหนึ่งในการปรับปรุงสมบัติทางกลของชิ้นงานโฟมโลหะนั้นสามารถทำได้โดยวิธีการเคลือบผิวด้วยโลหะชนิดอื่นๆเพื่อช่วยในการรับแรงดั่งตัวอย่างงานวิจัยดังที่กล่าวมา วิธีการเคลือบผิวนำมาใช้มีหลายวิธีที่นิยมใช้กัน ในแต่ละวิธีมีข้อเด่นและข้อจำกัดแตกต่างกันออกไป

## 2.4 การเคลือบผิวโฟมอะลูมิเนียม [25-27]

การเคลือบผิวโฟมอะลูมิเนียมด้วยนิกเกิลนั้นสามารถทำได้หลายวิธีดังเช่น

### 2.4.1 การสเปรย์ร้อน (Thermal Spraying)

วิธีนี้อาศัยการพ่นไอของโลหะเหลวมาเคลือบผิวของโลหะที่ต้องการทำการเคลือบผิวไว้ โดยทำการหลอมเหลวโลหะเคลือบด้วยกระแสไฟฟ้าและใช้อากาศอัดละอองไอของโลหะนั้นๆออกมา



เคลือบผิวโลหะตัวหลัก แต่วิธีนี้โลหะหลักที่ต้องการนำมาเคลือบผิวนั้นต้องมีผิวที่ขรุขระ สำหรับวิธีนี้นั้นนิยมใช้กับชิ้นงานขนาดใหญ่ นอกจากนี้วิธีนี้ไม่เหมาะกับชิ้นงานที่มีรูปร่างสลับซับซ้อนและชั้นเคลือบมีรูพรุนสูง ชั้นเคลือบที่ได้มักมีสมบัติทางกลด้อยกว่าวิธีอื่นๆที่กล่าวมาแล้วโดยเฉพาะวัสดุที่ไวต่อการเกิดออกซิเดชัน เนื่องจากเกิดฟิล์มออกไซด์ที่ผิวโลหะพื้น และชั้นเคลือบที่ได้มีการเกาะติดที่ไม่ดี เพราะเป็นการเกาะติดทางกล (Mechanical Interlock) เกิดการหลุดร่อนง่าย ดังนั้นการดูดซับพลังงานจึงไม่ดี วิธีนี้นิยมใช้วิธีนี้กับโลหะในการซ่อมบำรุงเพื่อให้ได้ขนาดเป็นส่วนใหญ่

#### 2.4.2 การเคลือบไอ (Vapor Deposition)

เทคนิคการเคลือบผิวโดยใช้ไอของโลหะเคลือบบนผิวของโลหะ เทคนิคนี้แบ่งออกเป็น 2 วิธีย่อยคือกระบวนการเคลือบโดยไอทางเคมี (Chemical Vapor Deposition, CVD) และกระบวนการเคลือบโดยไอทางกายภาพ (Physical Vapor Deposition, PVD)

CVD นั้นจะเป็นการทำปฏิกิริยาของแก๊สต่างๆในห้องเคลือบ (Chamber) เกิดเป็นสารเคลือบแล้วควบแน่นลงมาบนผิวของโลหะเนื้อพื้นที่เราต้องการนำมาเคลือบ วิธีนี้สามารถเคลือบได้หลายชั้นขึ้นอยู่กับชนิดของแก๊สที่ใส่เข้าไปในเตา ซึ่งแต่ละชั้นเคลือบมีความหนาประมาณ 2-12 ไมครอน ในปัจจุบันการเคลือบแบบ CVD นั้นในโลหะที่นำมาเป็นชั้นเคลือบบางชนิด เช่น อะลูมิเนียมและทองแดงไม่เป็นที่นิยมในทางการค้าเนื่องจากวิธีนี้มีค่าใช้จ่ายสูง จึงนิยมใช้วิธีการเคลือบด้วยไฟฟ้าเนื่องจากต้นทุนในการผลิตต่ำ

สำหรับวิธี PVD นั้นสารตั้งต้นจะถูกกระทำให้เป็นไอในระบบสุญญากาศ โดยวิธีต่างๆทางกายภาพ แล้วจะกลั่นตัวลงมาเคลือบบนผิวของโลหะเนื้อพื้น โดยจะเป็นแบบทำปฏิกิริยาหรือไม่ทำปฏิกิริยาเพื่อให้ได้สารเคลือบตามที่เราต้องการ วิธี PVD ก็แบ่งออกได้หลากหลายจากกระบวนการการสร้างไอในแบบต่างๆ เช่นการทำให้เป็นไอโดยใช้ความร้อน (Thermal evaporation) สเปตเตอร์ริง (Sputtering) แคโทดิกอาร์กพลาสมา (Cathodic arc plasma deposition) และการเคลือบด้วยไอจากการอาร์ก (Arc vapor deposition) เป็นต้น แต่ละวิธีก็มีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันไป จึงต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับงาน

ข้อดีของวิธีนี้คือการเคลือบผิวแบบฟิล์มบาง (Thin film) ซึ่งสามารถควบคุมอัตราการเคลือบและความหนาของชั้นเคลือบได้ วิธีนี้นิยมนำมาปรับปรุงผิวชิ้นงานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการต้านการสึกหรอ ลดการเสียดสี และเพิ่มอายุการใช้งานของเครื่องมือ เช่น เครื่องมือตัด ไมโครชิพ ฮาร์ดดิสก์ เป็นต้น ข้อเสียของวิธีนี้คือถึงแม้ว่าความหนาของชั้นเคลือบจะอยู่ในระดับ 10 ไมครอนเท่านั้น แต่วิธีนี้จะต้องตั้งค่าเครื่องยุ่งยากและเครื่องมือมีราคาแพง จึงนำมาใช้ผลิตชิ้นส่วนที่มีขนาดเล็กแต่มีราคาสูง นอกจากนี้การเคลือบด้วยวิธีนี้นั้นเกิดความเค้นที่ชั้นเคลือบ เป็นสาเหตุทำให้เกิดการหลุดร่อนของชั้นเคลือบได้

### 2.4.3 การชุบ (Plating)

การชุบคือการทำให้ไอออนของโลหะในสารละลายยกกันตัวตกลงมาครอบคลุมบนผิวของวัสดุทั้งโลหะ (Metallic) และอโลหะ (Non-metallic) เพื่อเพิ่มสมบัติบางประการ เช่น ต้านทานการกัดกร่อน เพิ่มความสามารถในการเชื่อม เพิ่มความแข็ง ต้านทานการสึกหรอ ลดความเสียดทาน เพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้า หรือวัตถุประสงค์อื่นๆ การชุบแบ่งเป็น 2 วิธีหลักๆคือ การชุบแบบไม่ใช้กระแสไฟฟ้า (Electroless plating) และการชุบแบบใช้กระแสไฟฟ้า (Electroplating) วิธีนี้มีข้อดีเมื่อเทียบกับวิธี PVD และ CVD คือสามารถชุบได้โดยไม่จำกัดความหนา ราคาถูกกว่า และไม่ต้องการเครื่องมือที่ซับซ้อน

#### 2.4.3.1 การชุบหรือการเคลือบแบบไม่ใช้ไฟฟ้า (Electroless Plating)

การเคลือบแบบไม่ใช้กระแสไฟฟ้า ที่เรียกอีกชื่อหนึ่งว่าการชุบแบบ Auto-catalytic วิธีนี้จะไม่มีกระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายภายนอก ดังนั้นสิ่งที่จำเป็นคือตัวรีดิวซ์ (Reducing agent) เป็นตัวจ่ายอิเล็กตรอนและทำให้เกิดแรงผลักดัน (Driving force) ในการเกิดการตกตะกอนไอออนของโลหะบนผิวของโลหะที่ต้องการเคลือบ ซึ่งเกิดอย่างเท่าๆกันในทุกบริเวณบนผิวทำให้เกิดชั้นเคลือบที่สม่ำเสมอ วิธีนี้จึงสามารถใช้เคลือบชิ้นงานที่ซับซ้อนได้ ตัวรีดิวซ์ที่นิยมคือ โซเดียมไฮโปฟอสไฟต์ (Sodium hypophosphite) เมื่อไฮดรอกไซด์ไอออนถูกปล่อยออกมาวัสดุจะถูกเหนียวนำไปเป็นประจุลบและไอออนข

องโลหะที่อยู่ในสารละลายจะตกตะกอนลงบนผิววัสดุ โดยทั่วไปแล้ววิธีนี้นิยมใช้ในการชุบนิเกิล โดยอิออนของนิเกิลได้จากสารละลายนิเกิลซัลเฟต (Nickel sulphate) ชั้นเคลือบที่ได้เป็นชั้นเคลือบของสารประกอบนิเกิล-ฟอสฟอรัส (NiP) มีปริมาณของฟอสฟอรัสประมาณ 7-11 เปอร์เซ็นต์

วิธีนี้สามารถสร้างชั้นเคลือบของสารประกอบได้ เช่น ซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) ทังสเตนคาร์ไบด์ (WC) หรือโครเมียมคาร์ไบด์ ( $Cr_xC_y$ ) เป็นต้น ข้อเสียของวิธีนี้คือแพงและจะต้องควบคุมปริมาณสารเคมีในอ่างชุบและอุณหภูมิอย่างเข้มงวด

#### 2.4.3.2 การชุบหรือการเคลือบแบบใช้กระแสไฟฟ้า (Electroplating)

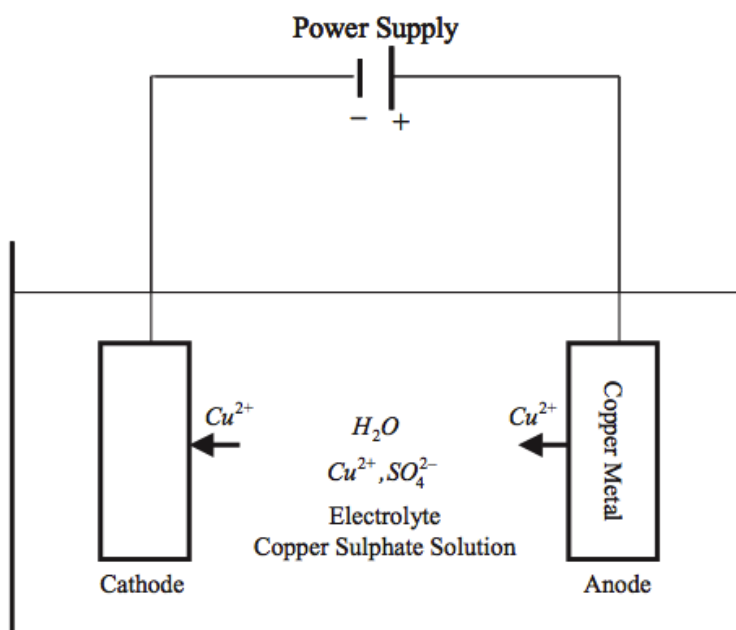
การชุบด้วยไฟฟ้า (Electroplating) หรือกระบวนการอิเล็กโทรดิโพสิชัน (Electrodeposition) เป็นการสร้างชั้นเคลือบบางๆบนผิววัสดุโดยอาศัยกระแสไฟฟ้า วิธีนี้คล้ายกับวิธีเคลือบแบบไม่ใช้กระแสไฟฟ้า (Electroless plating) แต่แตกต่างกันที่วิธีนี้มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าจากแหล่งภายนอก ดังนั้นวัสดุที่นำมาเคลือบด้วยวิธีนี้จะต้องสามารถนำไฟฟ้าได้ เช่น โลหะชนิดต่างๆ หรือโลหะผสม (Alloy) เป็นต้น ซึ่งการเคลือบผิววัสดุนั้นมีจุดมุ่งหมายในด้านต่างๆ เช่น ด้านการตกแต่งเพื่อความสวยงาม หรือเพื่อปรับปรุงให้ได้คุณสมบัติตามต้องการ เนื่องจากในเนื้อวัสดุหลักอาจขาดคุณสมบัติเหล่านี้ ตัวอย่างเช่น คุณสมบัติความต้านทานต่อการสึกกร่อนและการเสียดสี (Abrasion and Wear resistance) การป้องกันการกัดกร่อน (Corrosion protection) เป็นต้น ในปัจจุบันนี้การเคลือบผิววัสดุด้วยวิธีการชุบด้วยไฟฟ้า (Electroplating) นั้นเป็นที่นิยมการอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ เรือ เครื่องบิน เครื่องจักรกล อิเล็กทรอนิกส์ และจิวเวลรี่ เป็นต้น โดยวิธีนี้มีข้อได้เปรียบกว่าการเคลือบด้วยวิธีอื่นๆ หลายประการ คือ เป็นวิธีที่ทำงานง่าย ราคาถูก และสามารถควบคุมความหนาบางของโลหะที่เคลือบได้ดีกว่า โดยควบคุมจากเวลาในการเคลือบ ควบคุมกระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่ผิว และผิวที่เคลือบก็สม่ำเสมอ ทั้งยังสามารถบดขยี้ได้ดีพอสมควรโดยไม่แตกร้าว

วิธีนี้ไม่เพียงแต่สร้างชั้นเคลือบที่เป็นโลหะบริสุทธิ์เท่านั้น ยังสามารถสร้างชั้นเคลือบที่เป็นวัสดุผสมได้เช่นกัน เช่น ทองเหลือง (Brass, Cu-Zn) บรอนซ์ (Bronze, Cu-Sn) คอปเปอร์-นิเกิล (Cu-Ni) และเหล็ก-นิเกิล เป็นต้น

ในกระบวนการอิเล็กโทรดีโพสิชัน (Electrodeposition) จะประกอบไปด้วยขั้วแคโทด (Cathode) และขั้วแอโนด (Anode) โดยขั้วแคโทดนั้นคือวัสดุที่ต้องการนำโลหะอื่นมาเคลือบผิว (ต่อกับขั้วลบของเครื่องจ่ายกระแสไฟ (Power supply)) สำหรับขั้วแอโนดนั้นมีอยู่ 2 ประเภทด้วยกัน ประเภทแรกคือโลหะที่นำมาเคลือบบนผิววัสดุ (Dissolvable anode) ประเภทที่สองคือแอโนดเฉื่อย (Inert anode) หรือแอโนดที่ไม่ทำปฏิกิริยา (Non-reactive anode) มีไว้เพียงเพื่อให้ครบวงจรในการนำไฟฟ้าเท่านั้น ไม่สามารถละลายหรือแทนที่ของโลหะในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ที่หายไประหว่างกระบวนการอิเล็กโทรดีโพสิชันได้ แอโนดประเภทนี้ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายคือแพลทินัม (Platinum, Pt) คาร์บอน (Carbon, C) และเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) เป็นต้น

สารละลายอิเล็กโทรไลต์ เป็นตัวเชื่อมต่อวงจรระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสอง (ขั้วแคโทดและขั้วแอโนด) โดยกลไกการเคลือบผิวคือ ขั้วแคโทดซึ่งก็คือวัสดุที่จะนำมาเคลือบต่อกับขั้วลบของเครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้า (Power supply) ทำให้เป็นการดึงดูดไอออนบวกในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Metal ions) ให้มาเกาะลงบนผิวชิ้นงาน สำหรับแอโนด หากใช้แบบ Dissolvable anode จะละลายลงไปในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในขณะเดียวกันกับที่ไอออนของโลหะบางส่วนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์กำลังเคลือบผิวแคโทด ดังนั้นความเข้มข้นของโลหะในสารละลายอิเล็กโทรไลต์จึงคงที่อยู่เสมอ [28]

การเคลือบผิวด้วยวิธีการชุบด้วยไฟฟ้า (Electroplating) มีข้อดีในแง่ของความสม่ำเสมอ การยึดติดกันระหว่างผิววัสดุกับชั้นเคลือบ และสามารถควบคุมความหนาของชั้นเคลือบได้อย่างค่อนข้างแม่นยำ เพื่อให้ได้ผลดีตามข้างต้นที่กล่าวมา จะต้องควบคุมปัจจัยต่างๆอย่างเข้มงวดทั้งความต่างศักย์ไฟฟ้าและความเข้มของกระแสไฟฟ้า ณ ผิวแคโทด โดยมีหน่วยวัดเป็นแอมแปร์ต่อตารางเมตร สัดส่วนของพื้นที่แอโนดต่อพื้นที่แคโทด เวลาที่ใช้ในการเคลือบผิว รวมทั้งองค์ประกอบและอุณหภูมิของสารละลายอิเล็กโทรไลต์



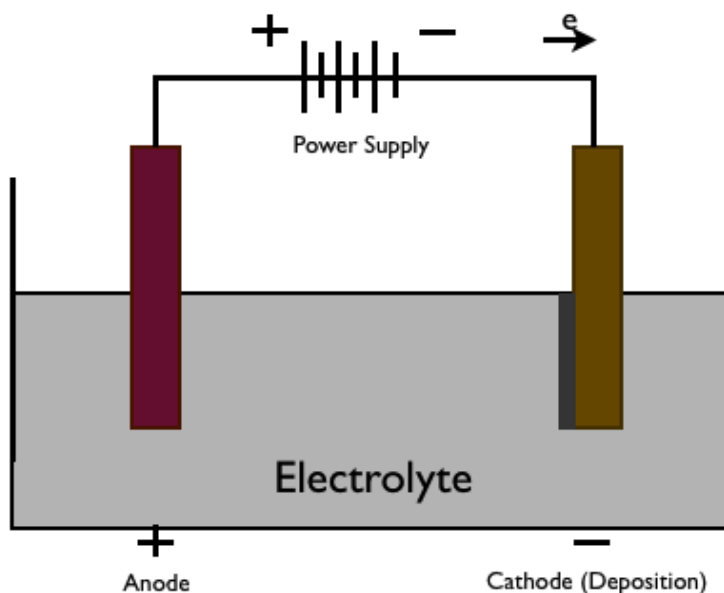
ภาพที่ 2.7 กรรมวิธีการเคลือบผิวโลหะด้วยไฟฟ้าของทองแดง (copper, Cu)  
ด้วยสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต ( $CuSO_4$ ) [29]

เมื่อพิจารณากระบวนการเคลือบผิวที่กล่าวมาทั้งหมด ในการศึกษาจึงเลือกวิธีการชุบด้วยไฟฟ้า ที่จะนำมาใช้ในการเตรียมชิ้นเคลือบบนผิวโพลีเอทิลีน เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถทำได้ง่าย สามารถทำที่อุณหภูมิต่ำได้ สามารถควบคุมความหนาของชั้นเคลือบได้โดยควบคุมกระแสไฟฟ้าและเวลาที่ใช้ในการเคลือบ นอกจากนี้ยังเป็นวิธีที่สามารถใช้ชุบโลหะได้หลากหลายชนิด สำหรับในงานวิจัยนี้เลือกนำโพลีเอทิลีนโครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิดมาเคลือบผิวด้วยนิกเกิล เนื่องจากนิกเกิลมีข้อดีหลากหลายประการเมื่อเทียบกับเนื้อพื้นโพลีเอทิลีน ดังเช่น สามารถทนการกัดกร่อนและการเกิดออกซิเดชันที่ดี มีการนำไฟฟ้าที่ดี เป็นวัสดุที่เหนียวและมีความแข็งแรงสูงกว่าโพลีเอทิลีน

## 2.5 การเคลือบผิวโพลีเอทิลีนด้วยนิกเกิลโดยการชุบด้วยไฟฟ้า (Electroplating)

การเคลือบผิวโพลีเอทิลีนด้วยนิกเกิลโดยวิธี Electroplating นั้นทำได้โดยต่อชิ้นงานโพลีเอทิลีนไว้ที่ขั้วแคโทด แผ่นแพลทินัมเป็นขั้วแอโนด จุ่มขั้วทั้ง 2 ลงในสารอิเล็กโทรไลต์ คือนิกเกิล

ซัลเฟต ( $\text{NiSO}_4$ ) นิกเกิลคลอไรด์ ( $\text{NiCl}_2$ ) กรดบอริก (Boric acid) [30] จากนั้นให้กระแสไฟฟ้า ดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 กรรมวิธีการเคลือบผิวอะลูมิเนียมด้วยนิกเกิล

ผิวชิ้นงานอะลูมิเนียมจำเป็นต้องมีการเตรียมผิวก่อนการชุบด้วยไฟฟ้า เนื่องจากโลหะอะลูมิเนียมนั้นเมื่อสัมผัสกับอากาศจะเกิดออกไซด์ขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ส่งผลต่อการยึดเกาะระหว่างผิวชิ้นงานและชั้นเคลือบได้ ดังนั้นขั้นตอนที่สำคัญในการเคลือบผิวโลหะอะลูมิเนียมคือกระบวนการกำจัดออกไซด์ที่ผิวออกและป้องกันออกไซด์ที่เกิดขึ้นใหม่ โดยในขั้นตอนการกำจัดฟิล์มบางของอะลูมิเนียมออกไซด์บริเวณผิวชิ้นงานทำได้โดยล้างผิวด้วยสารละลายต่าง (สารละลายอัล-คาไลน์, Alkaline cleaner) ที่เป็นมิตรและไม่มีฤทธิ์ในการทำลายผิวชิ้นงานอะลูมิเนียม เช่น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) เป็นต้น แล้วกัดฟิล์มออกไซด์ออกด้วยสารละลายอัลคาไลน์หรือสารละลายกรด แต่เนื่องจากสารละลายอัลคาไลน์เข้มข้นจะไปรบกวนรูปร่างชั้นฟิล์มออกไซด์ของสังกะสีในการทำกระบวนการซิงก์เกท (Zincate) ในขั้นต่อไป ดังนั้นสารละลายที่เหมาะสมในการกัดฟิล์มออกไซด์ของอะลูมิเนียมออกคือกรดไนตริก (Nitric acid) เข้มข้น จากนั้นชิ้นงานต้องผ่าน

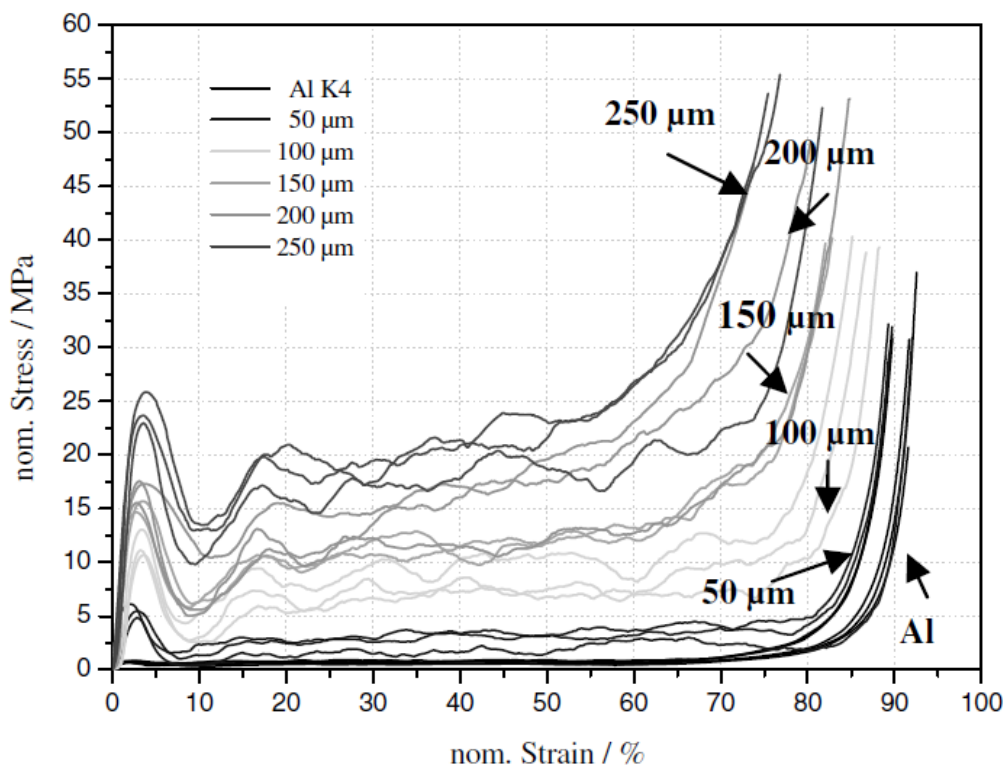
กระบวนการที่เรียกว่ากระบวนการซิงก์เกต (Zincate) เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการเคลือบผิวอะลูมิเนียมด้วยนิกเกิล โดยจะเกิดชั้นฟิล์มสังกะสี (Zinc film) ปกคลุมผิวหน้าชิ้นงานแทนการเกิดฟิล์มบางของอะลูมิเนียมออกไซด์ชั้น [28]

สารละลายซิงก์เกต (Zincate solution) ประกอบด้วยสังกะสีออกไซด์ (ZnO) ปริมาณ 50-100 กรัมต่อลิตร และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ประมาณ 250-500 กรัมต่อลิตร สำหรับการใช้งานในการเตรียมผิวนั้นจะใช้สารละลายซิงก์เกตเจือจาง (Dilute zincate) ที่มีสังกะสีออกไซด์ (ZnO) ปริมาณ 5-10 กรัมต่อลิตรและ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ประมาณ 50-120 กรัมต่อลิตร เมื่อจุ่มชิ้นงานอะลูมิเนียมลงในอ่างสารละลายซิงก์เกตเจือจาง (Dilute zincate) จะเกิดปฏิกิริยานี้ [31]



ทำให้ผิวของอะลูมิเนียมนั้นไม่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับอากาศ กล่าวคือไม่เกิดออกไซด์ขึ้นมาบริเวณผิวอีก ทำให้สามารถนำไปทำในขั้นตอนเคลือบต่อไปได้

มีงานวิจัยมากมายที่ได้ทำการเคลือบผิวโพลีอะลูมิเนียมโดยการชุบด้วยไฟฟ้า ดังเช่นในงานวิจัยของ Anne Jung, et. al. [7, 32] ได้ศึกษาสมบัติทางกลของโพลีอะลูมิเนียมโครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิดที่ทำการเคลือบผิวด้วยนิกเกิลผลึกระดับนาโนโดยการชุบด้วยไฟฟ้า กล่าวว่า หากชั้นเคลือบมีความหนาที่เพียงพอ สมบัติทางกลของโครงสร้างโพลีหลังจากการเคลือบผิว ทั้งในเรื่องของความแกร่ง (Stiffness) และความแข็งแรง (Strength) นั้นจะมีผลมาจากสมบัติของวัสดุที่นำมาใช้ในการเคลือบ และได้กล่าวอีกว่าชั้นเคลือบนิกเกิลหนาเพียง 15 ไมครอน สามารถแสดงให้เห็นการเพิ่มขึ้นของสมบัติทางกลของชิ้นงานโพลีอะลูมิเนียมอย่างเด่นชัด รวมทั้งสมบัติการดูดซับพลังงาน (Energy absorption) ทั้งภายใต้การศึกษารับแรงอัดแบบ Quasi-static และ Dynamic ดังภาพที่ 2.9

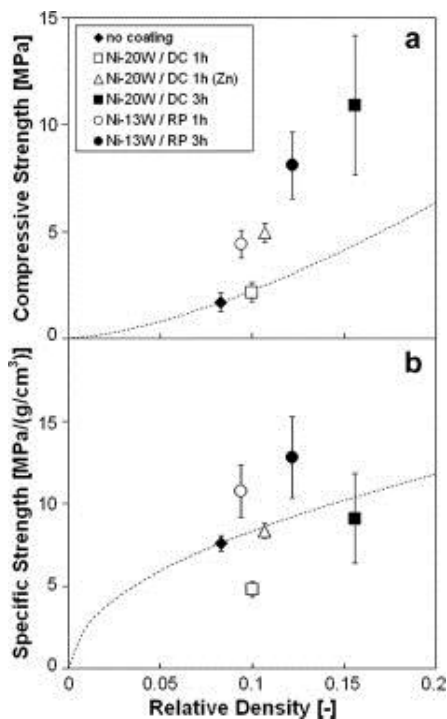


ภาพที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและความเค้นของโฟมอะลูมิเนียมโครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิด ผ่านการชุบนิเกิลด้วยไฟฟ้าโดยใช้กระแสตรง ที่ความหนาของชั้นเคลือบต่างๆ [32]

นอกจากนี้ในงานวิจัยของ Yuttanant Boonyongmaneerat, Christopher A. Schuh และ David C. Dunand [12] ได้ศึกษาสมบัติทางกลของโฟมอะลูมิเนียมโพรงอากาศแบบเปิดที่ทำการเคลือบผิวด้วยนิเกิล-ทังสเทน โดยวิธีการชุบด้วยไฟฟ้า และทำการเปรียบเทียบสมบัติกับชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบผิวใดๆ พบว่าชิ้นงานมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นและสามารถดูดซับพลังงานได้มากขึ้น ซึ่งแปรผันตามความหนาของชั้นเคลือบ เพราะว่ากึ่งก้านของโฟมอะลูมิเนียมที่เกิดการแปรรูปโดยการบิดงอนนั้นสามารถรับความเค้นได้มากขึ้น เนื่องจากชั้นเคลือบนิเกิล-ทังสแตนนั้นมีความแข็งแรงและความแข็งแรงสูง ดังภาพที่ 2.10, 2.11 และ 2.12 ตามลำดับ ภาพที่ 2.10 แสดง (ก) ความแข็งแรงแรงอัด (Compressive Strength) และ (ข) ความแข็งแรงของแรงอัดจำเพาะ (Specific compressive strength) ของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์และโฟมอะลูมิเนียมที่เคลือบผิวด้วยนิเกิล-ทังสแตนท์สภาวะต่างๆ พบว่าค่าความแข็งแรงแรงอัดและค่าความแข็งแรงแรงอัดจำเพาะมีค่าสูงขึ้น

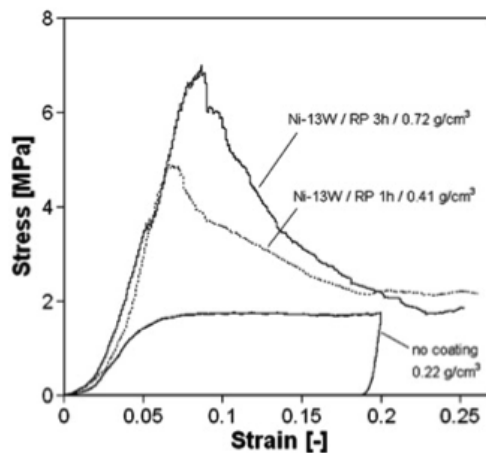


ตามความหนาของชั้นเคลือบ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความแข็งแรงแรงอัดและความแข็งแรงอัดจำเพาะของชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมที่ไม่ได้ทำการเคลือบผิว ณ ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ต่างๆ



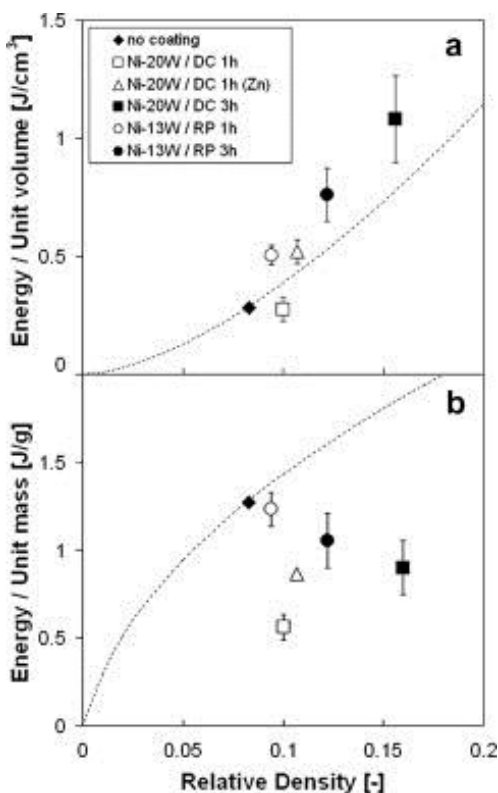
ภาพที่ 2.10 (ก) ความแข็งแรงแรงอัด (Compressive Strength) และ (ข) ความแข็งแรงแรงอัดจำเพาะ (Specific compressive strength) ของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์และโฟมอะลูมิเนียมที่เคลือบผิวด้วยนิกเกิล-ทั้งสแตนที่สภาวะต่างๆ

สำหรับภาพที่ 2.11 คือกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ โฟมอะลูมิเนียมที่ทำการเคลือบผิวด้วยนิกเกิล-ทั้งสแตนเป็นเวลา 1 และ 3 ชั่วโมง จากกราฟสามารถวิเคราะห์ได้ว่าชิ้นงานที่ทำการเคลือบนั้นมี peak stress ที่สูงกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้เคลือบผิวและแปรผันตามความหนาของชั้นเคลือบที่เพิ่มมากขึ้น แต่ในช่วงค่าความเครียดประมาณ 0.2 นั้น ค่าความเค้นมีค่าประมาณเดียวกับค่าความเค้นในช่วง plateau stress ของชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมที่ไม่ได้ทำการเคลือบผิว ซึ่งมีสาเหตุมาจากการหลุดร่อนของชั้นเคลือบนิกเกิล-ทั้งสแตน จึงทำให้โฟมอะลูมิเนียมเป็นส่วนหลักในการรับแรง



ภาพที่ 2.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโพลีอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ โพลีอะลูมิเนียมที่ทำการเคลือบผิวด้วยนิกเกิลทั้งสแตนเป็นเวลา 1 และ 3 ชั่วโมง

และภาพที่ 2.12 แสดงพลังงานที่สามารถดูดซับได้ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรและต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนัก ของโพลีอะลูมิเนียมบริสุทธิ์และโพลีอะลูมิเนียมที่เคลือบผิวด้วยนิกเกิล-ทั้งสแตนที่สภาวะต่างๆ ในช่วงค่าความเครียด 0 - 0.2 ( $\epsilon_{max}=0.2$ ) ซึ่งงานโพลีอะลูมิเนียมที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยนิกเกิล-ทั้งสแตนนั้นมีค่าพลังงานที่สามารถดูดซับต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบผิว ซึ่งคำนวณและเปรียบเทียบค่าพลังงานที่ดูดซับจากพื้นที่ใต้กราฟความเค้น-ความเครียด



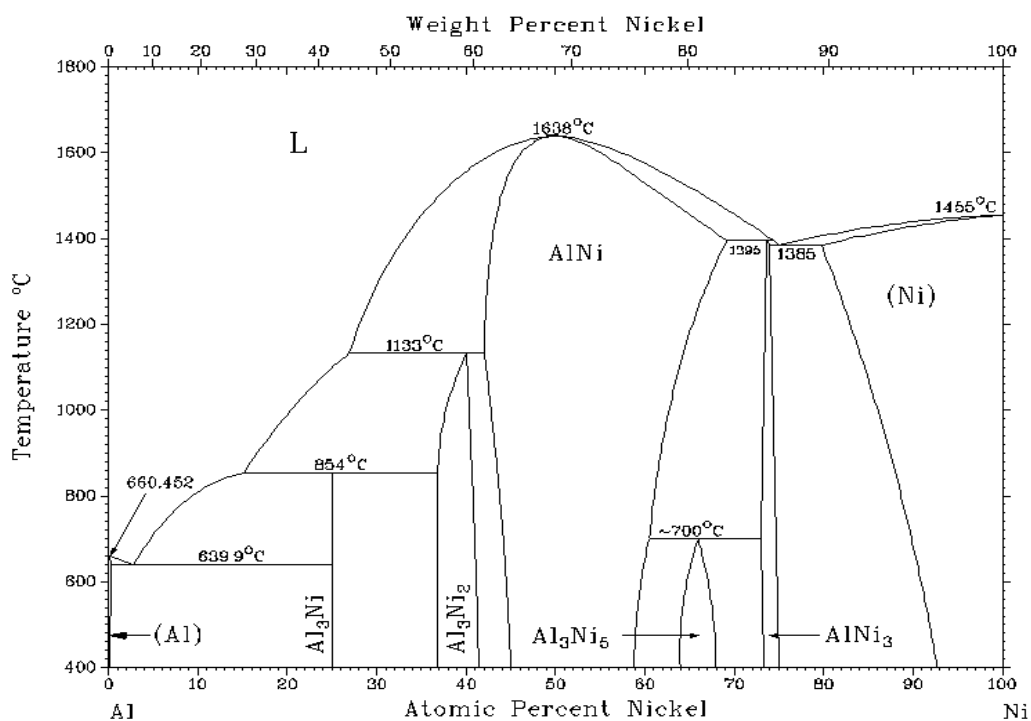
ภาพที่ 2.12 พลังงานที่สามารถดูดซับได้ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรและต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของโพลีอะลูมิเนียมบริสุทธิ์และโพลีอะลูมิเนียมที่เคลือบผิวด้วยนิกเกิล-ทั้งสแตนที่สภาวะต่างๆ

จากที่กล่าวมา แสดงให้เห็นว่าในปัจจุบันมีความพยายามที่จะปรับปรุงสมบัติทางกลของโพลีอะลูมิเนียมโดยการใช้วิธีเคลือบผิว และวิธีหนึ่งที่สามารถนำมาใช้กับชิ้นงานโพลีได้ก็คือการชุบด้วยไฟฟ้า แต่การใช้งานโพลีอะลูมิเนียมโครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิดนั้นนิยมนำมาใช้งานในเรื่องของการจัดการทางความร้อน เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวมาก หากนำชิ้นงานโพลีอะลูมิเนียมที่เคลือบผิวด้วยนิกเกิลมาใช้งานในสภาวะอุณหภูมิสูงอาจเกิดสารประกอบเชิงโลหะระหว่างอะลูมิเนียมและนิกเกิลบริเวณรอยต่อระหว่างเนื้อพื้นอะลูมิเนียมและชั้นเคลือบนิกเกิลได้ ในงานวิจัยนี้จึงนำชิ้นงานโพลีอะลูมิเนียมโครงสร้างโพรงอากาศแบบเปิดที่เคลือบผิวด้วยนิกเกิล โดยการชุบด้วยไฟฟ้ามาผ่าน

กระบวนการทางความร้อน เพื่อศึกษาชนิดของสารประกอบที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นเคลือบและวัสดุพื้น และศึกษาผลของชั้นสารประกอบต่อความแข็งแรงของโครงสร้างโคม

## 2.6 สารประกอบเชิงโลหะระหว่างอะลูมิเนียมและนิกเกิล (Al-Ni Intermetallic Compound)

สารประกอบเชิงโลหะระหว่างอะลูมิเนียมและนิกเกิลมีหลายรูปแบบ ได้แก่ AlNi, AlNi<sub>3</sub>, Al<sub>3</sub>Ni, Al<sub>3</sub>Ni<sub>2</sub>, Al<sub>3</sub>Ni<sub>5</sub> ดังแสดงในภาพที่ 2.13 แผนภูมิสมดุลสำหรับระบบอะลูมิเนียม-นิกเกิล โดยสารประกอบเชิงโลหะระหว่างอะลูมิเนียมและนิกเกิลที่เกิดขึ้นนั้นมีสมบัติที่ดีทั้งสมบัติทางกล สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางเคมี คือมีจุดหลอมเหลวที่สูง ความหนาแน่นต่ำ มีความสามารถในการทนการกัดกร่อนและออกซิเดชันที่ดี ความต้านทานแรงดึงสูง และความแข็งแรงสูง เมื่อเทียบกับอะลูมิเนียมและนิกเกิลบริสุทธิ์ [19]



ภาพที่ 2.13 แผนภูมิสมดุลสำหรับระบบอะลูมิเนียม-นิกเกิล [33]

สารประกอบเชิงโลหะระหว่างอะลูมิเนียมและนิกเกิลที่น่าสนใจคือ  $AlNi$  และ  $AlNi_3$  เพราะสารประกอบทั้งสองชนิดนี้มีจุดหลอมเหลวที่สูง อย่างไรก็ตาม สารประกอบ  $AlNi_3$  นั้นเพราะที่อุณหภูมิห้องเนื่องจากสารประกอบ  $AlNi_3$  มีขอบเกรนที่ไม่แข็งแรง มีผลทำให้เกิดการแตกผ่านเกรน (Intergranular crack) ได้ง่าย และเกิดการแตกหักของวัสดุต่อไปได้ จากที่ได้กล่าวมา สารประกอบเชิงโลหะระหว่างอะลูมิเนียมและนิกเกิลนั้นมีสมบัติที่ดีหลายประการ แต่ก็มีข้อเสียในเรื่องของความเปราะ และมีข้อจำกัดในการใช้งานในด้านต่างๆ จึงเป็นที่สนใจในการศึกษาผลของสารประกอบเชิงโลหะระหว่างอะลูมิเนียมและนิกเกิลที่เกิดขึ้นขณะการใช้งานที่อุณหภูมิสูง ต่อความแข็งแรงการรับแรงอัดของชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมที่ทำการเคลือบผิวด้วยนิกเกิล

## 2.7 กระบวนการทางความร้อน (Heat Treatment) และการเกิดสารประกอบเชิงโลหะระหว่างชั้นเคลือบและโลหะพื้น [34, 35]

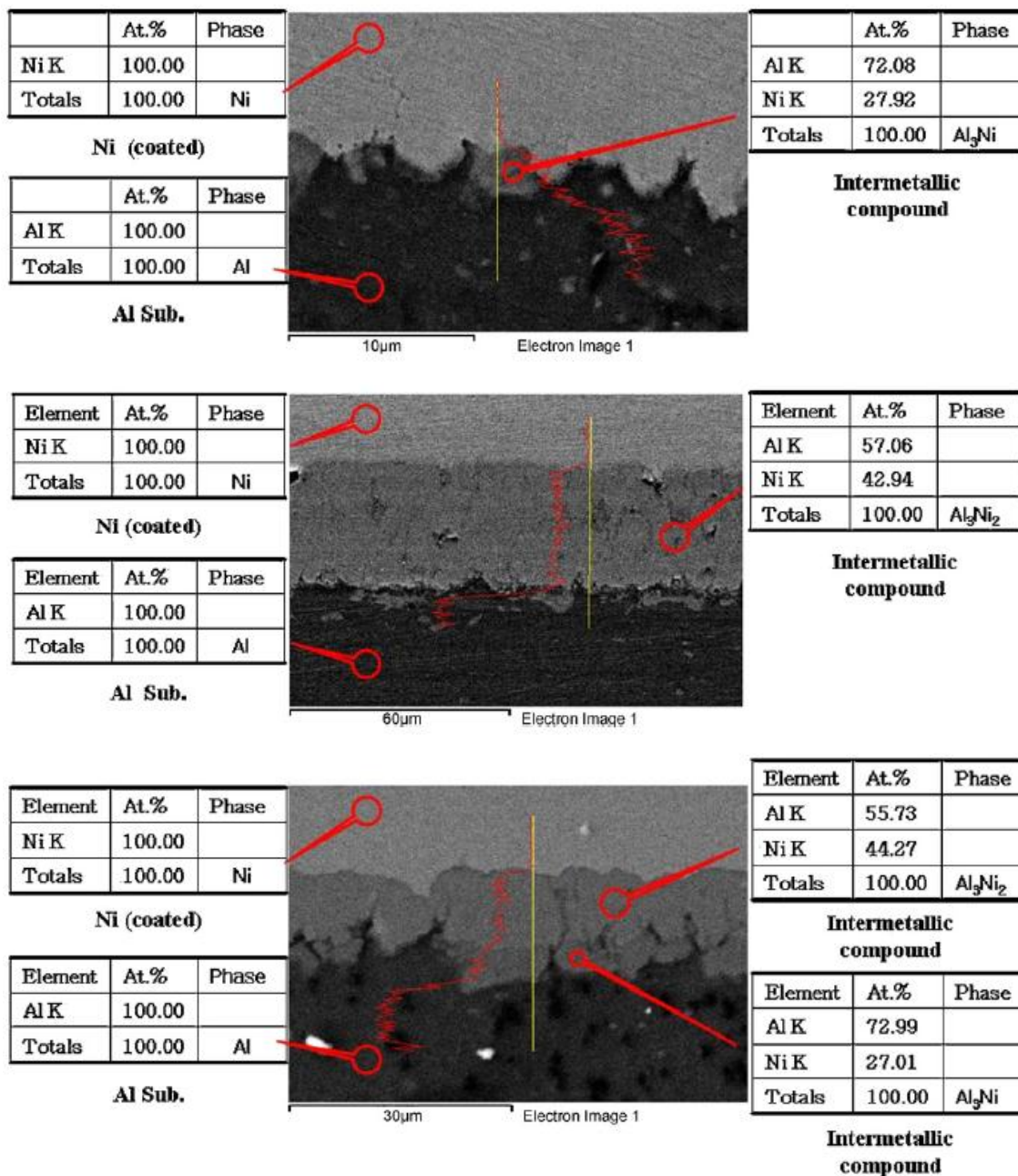
กระบวนการทางความร้อนนั้นมีผลต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกล หรือแม้แต่สมบัติทางเคมี และมักจะเกี่ยวข้องกับโครงสร้างทางโลหะวิทยาของวัสดุ กระบวนการทางความร้อนมีการควบคุมการให้ความร้อนหรือการเย็นตัวของวัสดุ ทั้งนี้เพื่อปรับเปลี่ยนสมบัติให้ตรงกับความต้องการนำไปใช้งานในด้านต่างๆ ในกระบวนการทางความร้อนนี้มีปัจจัยหลายอย่างที่มีผลต่อโครงสร้างภายหลัง ได้แก่ อุณหภูมิ ช่วงเวลาในการผ่านกระบวนการทางความร้อน และอัตราการเย็นตัวลงหลังจากกระบวนการทางความร้อนเสร็จสิ้น โดยทั่วไปแล้วกระบวนการทางความร้อนนี้นำมาปรับปรุงสมบัติของวัสดุในแง่ของการเพิ่มความแข็งแรงหรือความแข็ง เพิ่มความแกร่ง ปรับปรุงความเหนียวรวมทั้งมีความต้านทานต่อการสึกหรอและกัดกร่อนอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยทั่วไปแล้วกระบวนการทางความร้อนนั้นมักนำมาใช้งานในทางโลหะวิทยา อุตสาหกรรมการผลิต การขึ้นรูปรีด และงานเชื่อม เป็นต้น

กระบวนการทางความร้อนนั้นมีหลายวิธี แตกต่างกันไปวัตถุประสงค์ในการนำไปใช้งาน เช่น ทำให้อ่อนตัวลง (Softening) หรือเพิ่มความแข็งขึ้น (Hardening) การตกผลึกของแข็ง (Precipitation) การเสริมสร้างความแข็งแรง (Strengthening) การอบคืนตัว (Tempering) และการลดอุณหภูมิลง

อย่างรวดเร็ว (Quenching) ซึ่งหากเป็นการทำ Softening ทำได้โดยเพิ่มอุณหภูมิและค้างไว้ช่วงเวลาหนึ่งจากนั้นลดอุณหภูมิลงโดยควบคุมอัตราการลดอุณหภูมิ เพื่อลดความแข็งลงเพื่อเพิ่มความเหนียว เพิ่มความแกร่ง ลดความเค้นภายในชิ้นงาน และปรับปรุงขนาดของเกรน หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่าการอบอ่อน (Annealing or Normalizing) สำหรับการทำให้ Hardening จะทำการเพิ่มอุณหภูมิและค้างไว้ช่วงระยะเวลาหนึ่ง หลังจากนั้นทำการลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็ว (Quenching) มีจุดประสงค์ในการเพิ่มความแข็ง โดยทั่วไปมักใช้ปรับปรุงความแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอนที่นำมาใช้งานในด้านการทำเป็นเหล็กกล้าเครื่องมือ (Tool Steels) เพื่อป้องกันการเสียดสีและยืดอายุการใช้งาน การที่จะเลือกกรรมวิธีทางความร้อนนั้นขึ้นอยู่กับว่าชิ้นงานได้ผ่านการขึ้นรูปแบบใดมาและขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ที่ต้องการ ในระหว่างการทางความร้อนทำให้เกิดการแพร่และมีเฟสใหม่เกิดขึ้นได้

จากที่กล่าวมาข้างต้นนั้น เราจึงสนใจที่จะนำกระบวนการทางความร้อนมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ เนื่องจากหากนำชิ้นงานโคมอะลูมิเนียมที่ทำการเคลือบผิวด้วยนิกเกิลมาใช้งานที่อุณหภูมิสูงแล้วนั้น อาจทำให้เกิดสารประกอบเชิงโลหะขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างเนื้อพื้นอะลูมิเนียมและชั้นเคลือบนิกเกิลในขณะใช้งาน ในงานวิจัยนี้จึงใช้กระบวนการทางความร้อนเพื่อจำลองสภาวะการใช้งานของชิ้นงานโคมอะลูมิเนียมที่ทำการเคลือบผิวด้วยนิกเกิลที่อุณหภูมิสูง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาว่าสารประกอบเชิงโลหะที่เกิดขึ้นจากแพร่ระหว่างโลหะเนื้อพื้นอะลูมิเนียมและชั้นเคลือบนิกเกิลว่าส่งผลอย่างไรต่อโครงสร้างโคมอะลูมิเนียม

มีงานวิจัยที่ได้ศึกษาในเรื่องของชนิดของสารประกอบนิกเกิลอะลูมิเนียมที่เกิดขึ้น ดังเช่นงานวิจัยของ H. Lee, S. Lee, H. Shin และ K. Ko ได้ทำการเคลือบผิวอะลูมิเนียมด้วยนิกเกิลโดยวิธี Cold gas dynamic spraying process (CDSP) และนำไปผ่านกระบวนการทางความร้อน พบว่าเมื่อผ่านกระบวนการทางความร้อนที่ 450°C 500°C และ 600 °C พบสารประกอบเชิงโลหะ  $Al_3Ni$  และ  $Al_3Ni_2$  ขึ้นระหว่างเนื้อพื้นอะลูมิเนียมและชั้นเคลือบนิกเกิล และสารประกอบเชิงโลหะดังกล่าวจะพบในปริมาณที่แตกต่างกันไปในแต่ละอุณหภูมิในกระบวนการทางความร้อน ดังภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.14 ภาพถ่าย FESEM และวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วย EDS ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนหลังจากเคลือบผิวอะลูมิเนียมด้วยนิกเกิลโดยวิธี Cold gas dynamic spraying process (CDSP) (ก) 450°C (ข) 500°C (ค) 600°C

จากงานวิจัยที่กล่าวมาแสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิมีผลต่อโครงสร้างจุลภาค โดยเกิดการรวมตัวเกิดขึ้นเป็นสารประกอบเชิงโลหะได้ จึงสนใจที่จะศึกษาสมบัติทางกล เช่น ความแข็งแรงการรับแรงอัด และสมบัติการดูดซับพลังงานของโฟมอะลูมิเนียมโพรงอากาศแบบเปิด โดยนำชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยนิกเกิลมาผ่านกระบวนการทางความร้อน เพื่อให้เกิดสารประกอบเชิงโลหะของอะลูมิเนียมและนิกเกิลขึ้นระหว่างชั้นเนื้อพื้นและชั้นเคลือบ



### บทที่ 3 ระเบียบวิธีการวิจัย

ระเบียบวิธีการวิจัยแบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน ,การเคลือบนิกเกิลลงบนชิ้นงานโพลีอะลูมิเนียมด้วยวิธี Electroplating การวิเคราะห์ผิวหลังจากทำการเคลือบด้วยนิกเกิล กระบวนการอบชุบทางความร้อน (Heat Treatment) การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและเฟส (Phases) ของสารประกอบที่เกิดขึ้นและการวิเคราะห์สมบัติทางกล โดยในแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.1 เครื่องมือและวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

##### 3.1.1 อุปกรณ์ เครื่องมือ สารเคมีที่ใช้สำหรับเตรียมชิ้นงานวัสดุพื้น

3.1.1.1 กระดาษทรายเบอร์ 240, 400, 800, 1000, 1200, 2000, 4000 และผ้าสักหลาด

3.1.1.2 ผงเพชรขนาด 1  $\mu\text{m}$

3.1.1.3 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

3.1.1.4 กรดไนตริก (Nitric acid)

3.1.1.5 สารละลายซิงก์เกท (Zincate solution)

3.1.1.6 เครื่องอุลตราโซนิก

3.1.1.7 เครื่องขัดผิวชิ้นงาน

3.1.1.8 เครื่องชั่งน้ำหนัก 3 ตำแหน่ง

##### 3.1.2 อุปกรณ์ เครื่องมือ สารเคมีที่ใช้ทำการชุบเคลือบวัสดุด้วยไฟฟ้า

3.1.2.1 นิกเกิลซัลเฟต ( $\text{NiSO}_4$ )

3.1.2.2 นิกเกิลคลอไรด์ ( $\text{NiCl}_2$ )

3.1.2.3 กรดบอริก (Boric acid)

3.1.2.4 กรดไนตริก (Nitric acid)

3.1.2.5 น้ำกลั่น

- 3.1.2.6 อุปกรณ์ให้ความร้อน (Hot plate)
- 3.1.2.7 Magnetic stirrer
- 3.1.2.8 แผ่นแพลทินัม
- 3.1.2.9 เครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้า (DC Power Supply)
- 3.1.2.10 บีกเกอร์ (ขนาด 50, 100, 300 และ 1000 ml)
- 3.1.2.11 แท่งแก้วคนสาร

### 3.1.3 อุปกรณ์ เครื่องมือกระบวนการทางความร้อน

- 3.1.3.1 เตาให้ความร้อนแบบท่อ (Tube Furnace)
- 3.1.3.2 แก๊สเฉื่อย (ในงานวิจัยนี้เลือกใช้แก๊สอาร์กอน)
- 3.1.3.3 Crucible ทนความร้อนลักษณะ Boat

### 3.1.4 เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบและทดสอบวัสดุ

- 3.1.4.1 กล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope, OM) เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวางก่อนและหลังกระบวนการทางความร้อน
- 3.1.4.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope, SEM) เพื่อศึกษาลักษณะของชิ้นงานโพลิอะลูมิเนียม
- 3.1.4.3 XRD (X-Ray Diffraction) ใช้ตรวจธาตุและสารประกอบ
- 3.1.4.3 EDS (Energy-dispersive X-ray Spectroscopy) ใช้ตรวจชนิดของธาตุภายในโครงสร้าง เพื่อใช้ประกอบการวิเคราะห์ชนิดของสารประกอบ
- 3.1.4.4 เครื่องทดสอบการรับแรงอัด (Universal Testing Machine, SHIMADSU) ซึ่งมี Load cell 500 N

### 3.2 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงาน

3.2.1 เตรียมชิ้นงานโพลีอะลูมิเนียมโพรงอากาศแบบเปิด บริสุทธิ์ 99.8% ขนาด 20 x 20 x 20 มิลลิเมตร

3.2.2 เตรียมผิวชิ้นงานโพลีอะลูมิเนียมเพื่อที่จะทำการชุบนิเกิลด้วยไฟฟ้า (Electroplating) โดยนำชิ้นงานโพลีอะลูมิเนียมมากำจัดออกไซด์ที่ผิว ขั้นตอนการกำจัดออกไซด์โดย นำชิ้นงานโพลีอะลูมิเนียมมาล้างด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยมวลต่อปริมาตร แล้วกัดผิวออกไซด์ออกด้วยกรดไนตริก (Nitric acid) ความเข้มข้นร้อยละ 70 โดยปริมาตร เมื่อกัดผิวออกไซด์ออกแล้ว จะต้องมีการผ่านกระบวนการซิงก์เกต (Zincated) เพื่อป้องกันการทำปฏิกิริยากับอากาศอย่างรวดเร็วของผิวโพลีอะลูมิเนียม โดยเตรียม Zincate 1 ส่วนต่อน้ำกลั่น 3 ส่วน โดยปริมาตร จุ่มชิ้นงานโพลีอะลูมิเนียมลงไปเป็นเวลา 45 วินาที ผิวของชิ้นงานจะเปลี่ยนเป็นสีเทาดำ

### 3.3 การเคลือบนิเกิลลงบนอะลูมิเนียมโดยการชุบด้วยไฟฟ้า (Electroplating)

3.3.1. ให้ขั้วแคโทดเป็นชิ้นงานโพลีอะลูมิเนียมที่จะนำมาเคลือบ และขั้วแอโนดเป็นแผ่นแพลทินัม

3.3.2 นำขั้วทั้ง 2 นี้ไปจุ่มในอ่างชุบที่มีสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Watt Bath) ซึ่งสารละลายอิเล็กโทรไลต์นี้เป็นสารละลายที่มีประจุของนิเกิลผสมอยู่ สารอิเล็กโทรไลต์คือ นิเกิลซัลเฟต ( $\text{NiSO}_4$ ), นิเกิลคลอไรด์ ( $\text{NiCl}_2$ ), กรดบอริก (Boric acid) [36] ด้วยอัตราส่วนดังนี้

นิเกิลซัลเฟต ( $\text{NiSO}_4$ ) 300 กรัม ต่อ น้ำ 1 ลิตร

นิเกิลคลอไรด์ ( $\text{NiCl}_2$ ) 45 กรัม ต่อ น้ำ 1 ลิตร

กรดบอริก (Boric acid) 45 กรัม ต่อ น้ำ 1 ลิตร

จุ่มชิ้นงานโพลีอะลูมิเนียมลงไปใกล้กับแท่งแม่เหล็กที่ใช้กวนสารละลายบริเวณก้นบีกเกอร์ และวางชิ้นงานในแนวขนานกับแผ่นแพลทินัม

3.3.3 ให้ขั้วแอโนดต่ออยู่กับขั้วบวกของแหล่งจ่ายไฟ และขั้วแคโทดต่อกับขั้วลบของแหล่งจ่ายไฟ

3.3.4 สภาวะในการชุบคือ ความดันค่ากระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 0.165 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ด้วยเครื่อง DC Power Supply คุณหมุมิในอ่างชุบคือ 65 องศาเซลเซียส

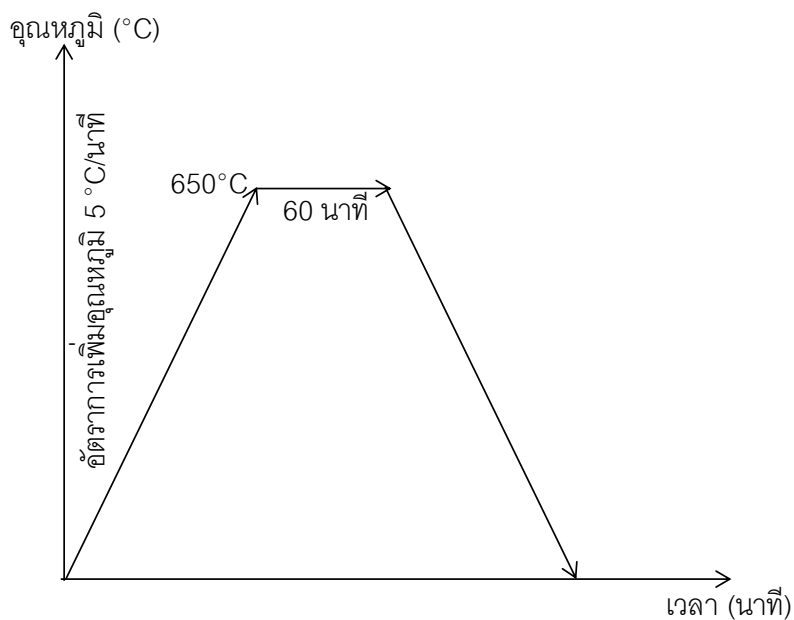
3.3.5 จ่ายกระแสไฟเป็นเวลา 30, 60 นาที

### 3.4 การวิเคราะห์ผิวหลังจากทำการเคลือบด้วยนิกเกิล

ตรวจสอบความสม่ำเสมอและความหนาของชั้นฟิล์มที่เคลือบด้วยนิกเกิล โดยตัดผิวชิ้นงานภาคตัดขวางด้วยกระดาษทรายเบอร์ 320, 400, 600, 800, 1000, 1200, 2000 และ 4000 และผงเพชรขนาด 1 ไมครอน ถ่ายรูปด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope) โดยใช้โปรแกรม DinoXcope และวัดความหนาของชั้นเคลือบนิกเกิล โดยใช้โปรแกรม Semafores

### 3.5 กระบวนการอบชุบทางความร้อน (Heat Treatment)

นำชิ้นงานที่เคลือบเสร็จแล้วมาทำการอบชุบทางความร้อนในเตาที่อุณหภูมิ 620 และ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที ภายใต้บรรยากาศของแก๊สอาร์กอน โดยเพิ่มอุณหภูมิภายในเตาในอัตรา 5 องศาเซลเซียส/นาที จากนั้นจึงปล่อยให้เย็นตัวในเตาภายใต้บรรยากาศอาร์กอน



ภาพที่ 3.1 กรรมวิธีทางความร้อน

### 3.6 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและเฟส (Phases) ของสารประกอบที่เกิดขึ้น

3.6.1 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของภาคตัดขวางชิ้นงานและวัดความหนาบริเวณชั้นผิวโดยตัดผิวชิ้นงานภาคตัดขวางด้วยกระดาษทรายเบอร์ 320 400 600 800 1000 1200 2000 4000 และผงเพชรขนาด 1 ไมครอน ถ่ายรูปด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope) โดยใช้โปรแกรม DinoXcope และวัดความหนาโดยใช้โปรแกรม Semafores

3.6.2 วิเคราะห์สารประกอบที่เกิดขึ้นบริเวณชั้นผิวด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD), Glancing Angle X-ray Diffractometer (GIXD) ที่มุมตกกระทบ 5 และ 10 องศา

### 3.7 การวิเคราะห์สมบัติทางกล

3.6.1 วิเคราะห์ความแข็งของชิ้นสารประกอบที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องวัดความแข็งระดับจุลภาค (Micro vickers)

3.6.2 วิเคราะห์ค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield strength), ค่าโมดูลัสของยัง (Young's modulus) และความแข็งของชั้นสารประกอบที่เกิดขึ้นด้วยการกดระดับนาโน (Nanoindentation testing)

3.6.3 ทดสอบแรงอัด (Compressive testing) ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงแรงอัด (Universal testing machine, SHIMADSU) ที่ Strain Rate  $2.5 \times 10^{-4} \text{ S}^{-1}$  และคำนวณหาค่าความสามารถในการดูดซับพลังงาน (Energy absorption), ความสามารถในการต้านทานแรงอัด (Compressive strength), ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Elastic modulus), Strain Densification และค่าความเค้นช่วงพลาโต (Plateau stress)

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปราย

ในงานวิจัยนี้แบ่งกลุ่มชิ้นงานออกเป็น 3 กลุ่มการทดลองหลักคือ กลุ่มชิ้นงานตั้งต้น กลุ่มชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยนิกเกิลโดยกรรมวิธีทาง และกลุ่มชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยนิกเกิลโดยกรรมวิธีทางไฟฟ้าและผ่านกระบวนการทางความร้อน โดยแบ่งออกเป็น 7 กลุ่มย่อย ดังนี้

กลุ่มที่ 1 คือ ชิ้นงานโพลีเอสเตอร์เหนียวโพรงอากาศแบบเปิด (No coating)

กลุ่มที่ 2 คือ ชิ้นงานโพลีเอสเตอร์เหนียวโพรงอากาศแบบเปิด

เคลือบผิวด้วยนิกเกิลโดยกรรมวิธีทางไฟฟ้าเป็นเวลา 30 นาที (AC30)

กลุ่มที่ 3 คือ ชิ้นงานโพลีเอสเตอร์เหนียวโพรงอากาศแบบเปิด

เคลือบผิวด้วยนิกเกิลโดยกรรมวิธีทางไฟฟ้าเป็นเวลา 60 นาที (AC60)

กลุ่มที่ 4 คือ ชิ้นงานโพลีเอสเตอร์เหนียวโพรงอากาศแบบเปิด เคลือบผิวด้วยนิกเกิลโดยกรรมวิธี

ทางไฟฟ้าเป็นเวลา 30 นาที และผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิ 620

องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที (30HT620)

กลุ่มที่ 5 คือ ชิ้นงานโพลีเอสเตอร์เหนียวโพรงอากาศแบบเปิด เคลือบผิวด้วยนิกเกิลโดยกรรมวิธี

ทางไฟฟ้าเป็นเวลา 60 นาที และผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิ 620

องศาเซลเซียสเป็นเวลา 60 นาที (60HT620)

กลุ่มที่ 6 คือ ชิ้นงานโพลีเอสเตอร์เหนียวโพรงอากาศแบบเปิด เคลือบผิวด้วยนิกเกิลโดยกรรมวิธี

ทางไฟฟ้าเป็นเวลา 30 นาที และผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิ 650

องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที (30HT650)

กลุ่มที่ 7 คือ ชิ้นงานโพลีเอสเตอร์เหนียวโพรงอากาศแบบเปิด เคลือบผิวด้วยนิกเกิลโดยกรรมวิธี

ทางไฟฟ้าเป็นเวลา 60 นาที และผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิ 650

องศาเซลเซียสเป็นเวลา 60 นาที (60HT650)

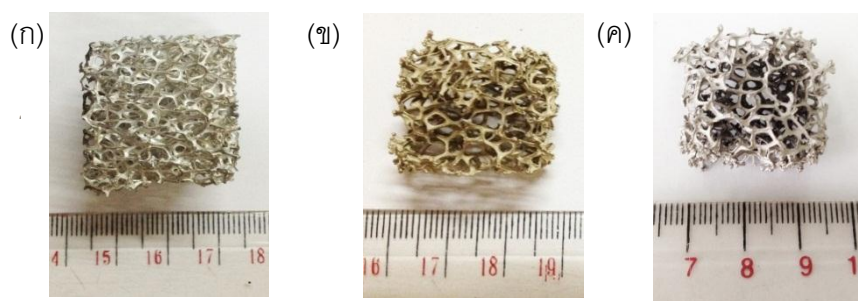
#### 4.1 โครงสร้างมหภาค (Macrostructure)

โฟมอะลูมิเนียมโพรงอากาศแบบเปิดที่ใช้ทดลองในงานวิจัยนี้มีส่วนผสมทางเคมีและรูปร่างเรขาคณิตดังตารางที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียม

	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Cr
wt%	99.8	0.023	0.066	<0.001	0.002	0.019	<0.005	0.006	<0.001
	Pb	Sn	Ti	Na	Sr	Zr			
	<0.005	0.068	0.004	0.0019	<0.001	<0.001			

จากที่กล่าวมาข้างต้นถึงกลุ่มชิ้นงานหลัก 3 กลุ่มในงานวิจัยนี้ ซึ่งตัวอย่างลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานทั้งหมดโดยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ดังแสดงไว้ดังภาพที่ 4.1 และตารางที่ 4.3 ตามลำดับ โดยชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนหลังจากเคลือบผิวด้วยนิกเกิลนั้น เมื่อสังเกตจะพบว่าในบางบริเวณบนผิวของชิ้นงานเปลี่ยนเป็นสีดำเนื่องจากเกิดเป็นสารประกอบ ซึ่งเป็นบริเวณที่ชั้นเคลือบนิกเกิลหมดไป



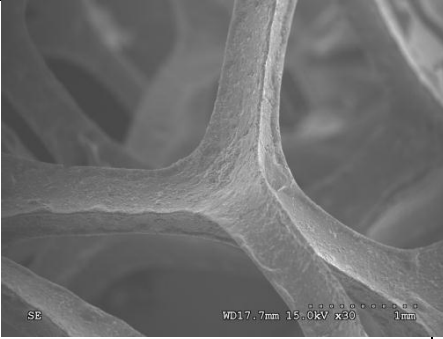
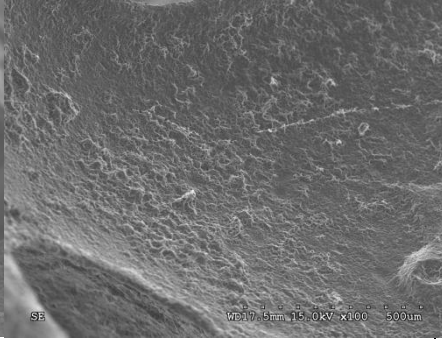

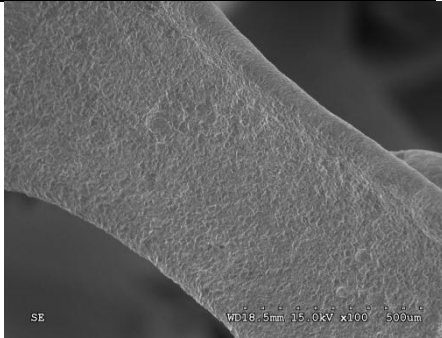
ภาพที่ 4.1 ภาพชิ้นงาน 4.1(ก) คือชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมตั้งต้น ภาพที่ 4.1(ข) คือโฟมอะลูมิเนียมที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยนิกเกิลโดยกรรมวิธีทางไฟฟ้า และภาพที่ 4.1(ค) คือชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยนิกเกิลโดยกรรมวิธีทางไฟฟ้าและผ่านกระบวนการทางความร้อน



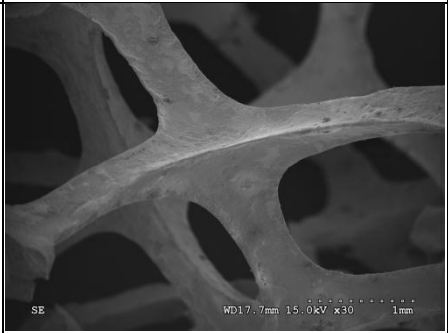
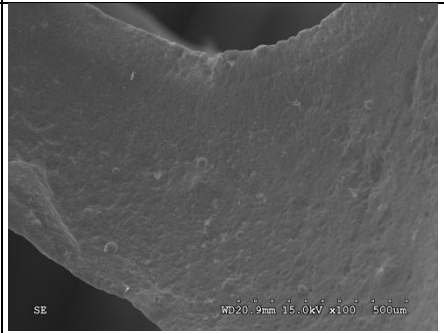
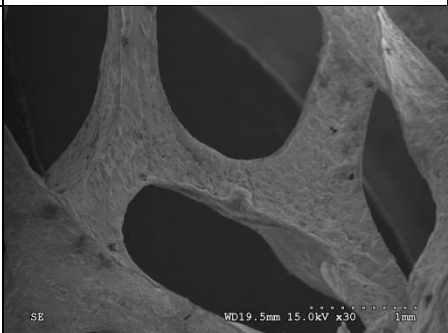
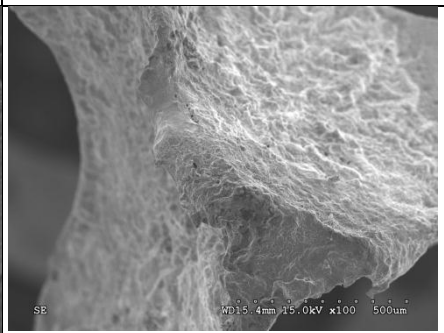
ตารางที่ 4.2 รูปร่างเรขาคณิตของโฟมอะลูมิเนียม

Pore linear Per inch (ppi)	Cell diameter (mm)	Strut width (mm)	Strut wall thickness (mm)
8	0.954	1.326	0.2727
Relative density (%)	Surface area (cm <sup>2</sup> /vol) (ภาคผนวก ก)		
3.45	1.97		

ตารางที่ 4.3 โครงสร้างมหภาคของชิ้นงานกลุ่มต่างๆ

กำลังขยาย กลุ่มชิ้นงาน	30 เท่า	100 เท่า
โฟมอะลูมิเนียม		
โฟมอะลูมิเนียมเคลือบ ผิวด้วยนิกเกิลโดยการ ชุบด้วยไฟฟ้า		

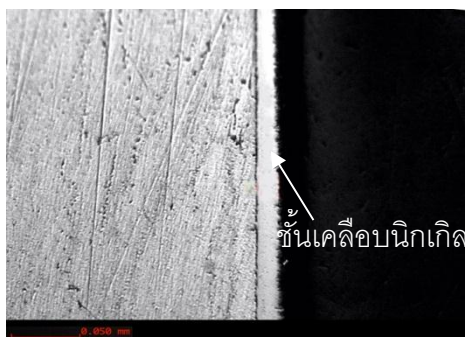
ตารางที่ 4.3 โครงสร้างมหภาคของชิ้นงานกลุ่มต่างๆ (ต่อ)

กำลังขยาย กลุ่มชิ้นงาน	30 เท่า	100 เท่า
โฟมอะลูมิเนียมเคลือบ ผิวด้วยนิกเกิลโดยการ ชุบด้วยไฟฟ้าและผ่าน กระบวนการทางความ ร้อนที่อุณหภูมิ 620 องศาเซลเซียส เป็น เวลา 60 นาที		
โฟมอะลูมิเนียมเคลือบ ผิวด้วยนิกเกิลโดยการ ชุบด้วยไฟฟ้า และผ่าน กระบวนการทางความ ร้อนที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็น เวลา 60 นาที		

#### 4.2 ผลของปัจจัยด้านเวลาในการเคลือบผิวด้วยนิกเกิลโดยการชุบด้วยไฟฟ้าบนชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียม

ในงานวิจัยนี้เริ่มแรกได้ทำการทดลองเคลือบนิกเกิลบนผิวชิ้นงานอะลูมิเนียมแบบก้อน เพื่อหาสภาวะในการเคลือบผิวชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมด้วยนิกเกิลโดยการชุบด้วยไฟฟ้าที่เหมาะสม โดยปรับเปลี่ยนเวลาและค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลือบ และทำการวัดความหนาเฉลี่ยชั้นเคลือบ

(ก)



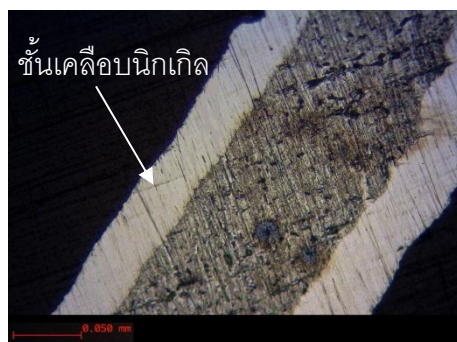
(ข)



(ค)



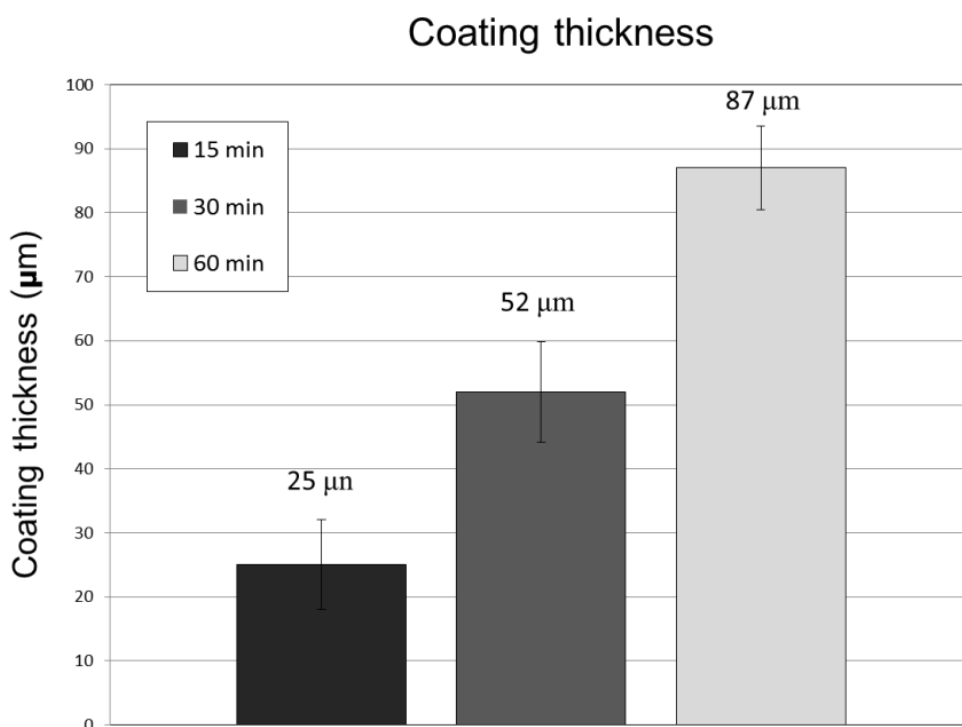
(ง)



ภาพที่ 4.2 ภาคตัดขวางของ (ก) ชิ้นงานอะลูมิเนียมแบบก้อนที่เคลือบผิวด้วยนิเกิลเป็นเวลา 15 นาที (ข) (ค) และ (ง) คือชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมโพรงอากาศแบบเปิดที่เคลือบผิวด้วยนิเกิลเป็นเวลา 15 นาที 30 นาที และ 60 นาที ตามลำดับ

พบว่าเวลาที่ใช้ในการเคลือบที่เหมาะสมคือ 15 นาที โดยใช้กระแสไฟฟ้าที่ 0.165 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งได้ชั้นเคลือบที่มีความหนาสม่ำเสมอ มีความหนาประมาณ 20-30 ไมครอน และไม่เกิดการหลุดร่อน ดังภาพที่ 4.2 (ก) จากนั้นนำสภาวะในการเคลือบนี้ไปใช้กับการเคลือบผิวชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมโพรงอากาศแบบเปิด เมื่อนำชิ้นงานไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคจากภาคตัดขวางพบว่า ชั้นผิวเคลือบนั้นมีความหนาเฉลี่ยอยู่ที่ 25 ไมครอน แต่พบว่ามีหลุดร่อน ความสามารถในการเกาะติดไม่ดีและชั้นเคลือบมีความหนาไม่สม่ำเสมอ ดังภาพที่ 4.2 (ข) เนื่องจากลักษณะโครงสร้าง

ของโพลีอะลูมิเนียมโพรงอากาศแบบเปิดนั้นมีความซับซ้อน และพื้นผิวของชิ้นงานตั้งต้นมีความขรุขระ แตกต่างกับชิ้นงานอะลูมิเนียมแบบก่อนที่มีการขัดผิวหน้าด้วยกระดาษทรายจนถึงเบอร์ 2000 ก่อนที่นำไปทำการเคลือบผิวด้วยนิกเกิล ดังนั้นในการทดลองนี้จึงเพิ่มเวลาการเคลือบเป็น 30 นาที และ 60 นาที เมื่อนำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคจากภาคตัดขวาง ดังภาพที่ 4.2 (ค) และ (ง) พบว่าชั้นผิวเคลือบมีความหนาเฉลี่ยอยู่ที่ 52 และ 87 ไมครอน ตามลำดับ มีการเกาะติดที่ดีของชั้นเคลือบและมีความหนาที่สม่ำเสมอในบริเวณใกล้เคียงกัน แต่เนื่องจากโครงสร้างของโพลีอะลูมิเนียมโพรงอากาศแบบเปิดนั้นมีความซับซ้อน จึงส่งผลให้ความหนาของชั้นเคลือบบริเวณภายนอกมีความหนาโดยเฉลี่ยประมาณ 2 เท่าของบริเวณตรงกลางชิ้นงาน ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของโพลีอะลูมิเนียมในแต่ละสภาวะการทดลอง มีค่าดังตารางที่ 4.4 ความหนาของชั้นเคลือบที่ไม่เท่ากับบริเวณใจกลางและภายนอกชิ้นงาน เนื่องมาจากระยะห่างของบริเวณต่างๆบนชิ้นงานและขั้วแอโนดไม่เท่ากัน จึงส่งผลให้ความหนาแน่นของกระแสไฟในแต่ละจุดไม่เท่ากัน นอกจากนี้เนื่องจากชิ้นงานมีลักษณะซับซ้อน ไอออนของนิกเกิลจึงเข้าถึงได้ยากกว่าบริเวณภายนอกชิ้นงาน



ภาพที่ 4.3 ความหนาเฉลี่ยของชั้นเคลือบนิกเกิลบนผิวชิ้นงานโพลีอะลูมิเนียม

ผลของเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิวโพลีอะลูมิเนียมด้วยนิกเกิลโดยการชุบด้วยไฟฟ้าเป็นไปตามภาพที่ 4.3 สรุปได้ว่าเมื่อใช้เวลาในกระบวนการเคลือบผิวที่มากขึ้น ชั้นเคลือบที่ได้มีความหนามากขึ้น ซึ่งเป็นไปตามกฎของฟาราเดย์ (Faraday's law) [36] ดังสมการที่ 4.1 กล่าวคือเวลาในการเคลือบเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อน้ำหนักของโลหะที่มาเคลือบหรือความหนาของชั้นเคลือบ

$$m = 1.095 (a) (I) (t) \quad (4.1)$$

$m$  คือน้ำหนักของนิกเกิลที่เคลือบบนผิววัสดุที่ถูกเคลือบ (กรัม),  $I$  คือ กระแสไฟ (แอมแปร์),  $t$  คือเวลา (ชั่วโมง) และ  $a$  คือ ประสิทธิภาพขั้วแอโนด หากประสิทธิภาพ 100%,  $a$  มีค่าเท่ากับ 1 แต่สำหรับในงานวิจัยฉบับนี้มีประสิทธิภาพขั้วแอโนดเท่ากับ 62%

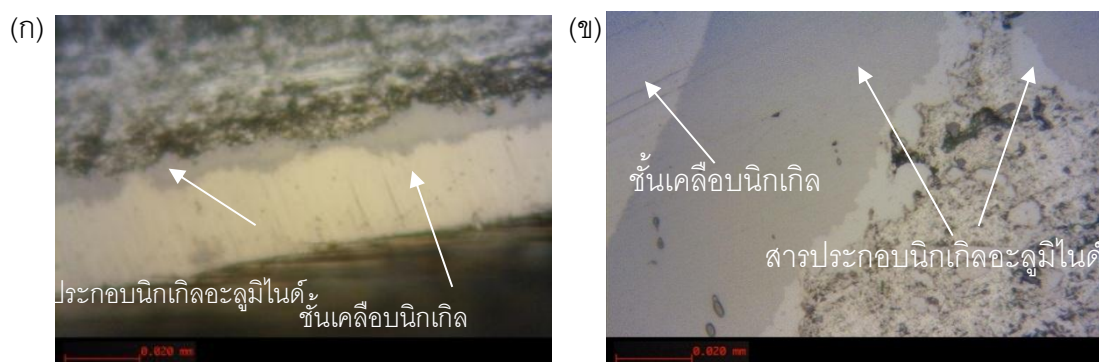
ตารางที่ 4.4 ผลของเวลาในการเคลือบผิวโพลีอะลูมิเนียมด้วยนิกเกิลโดยการชุบด้วยไฟฟ้า ต่อความหนาชั้นเคลือบและความหนาแน่นสัมพัทธ์

	ความหนาชั้นเคลือบ (ไมครอน)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ไมครอน)	ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (%) (ภาคผนวก ข)
No coating	-	-	3.10
As-coated 15 min	25	7.0	3.35
As-coated 30 min	52	7.8	3.56
As-coated 60 min	87	6.5	4.04

#### 4.3 ผลของปัจจัยด้านอุณหภูมิในกระบวนการทางความร้อนต่อโครงสร้างจุลภาค

ชิ้นงานโพลีอะลูมิเนียมโพรงอากาศแบบเปิดที่เคลือบผิวด้วยนิกเกิลโดยการชุบด้วยไฟฟ้าเป็นเวลา 30 และ 60 นาที หลังจากนั้นผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิ 620 และ 650 องศา

เซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวางบริเวณชั้นเคลือบด้วยภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง พบชั้นสารประกอบเชิงโลหะเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอระหว่างเนื้อพื้นอะลูมิเนียมและชั้นเคลือบนิเกิล โดยชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวด้วยนิเกิลและผ่านกระบวนการทางความร้อนที่ 620 องศาเซลเซียสนั้น พบชั้นสารประกอบเชิงโลหะเพียงชั้นเดียวคือชั้นสีเทาเข้ม ดังภาพที่ 4.4 (ก) แต่สำหรับชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวด้วยนิเกิลและผ่านกระบวนการทางความร้อนที่ 650 องศาเซลเซียสนั้น พบชั้นสารประกอบเชิงโลหะ 2 ชั้น คือชั้นสีเทาเข้มและชั้นเทาอ่อน ดังภาพที่ 4.4 (ข)

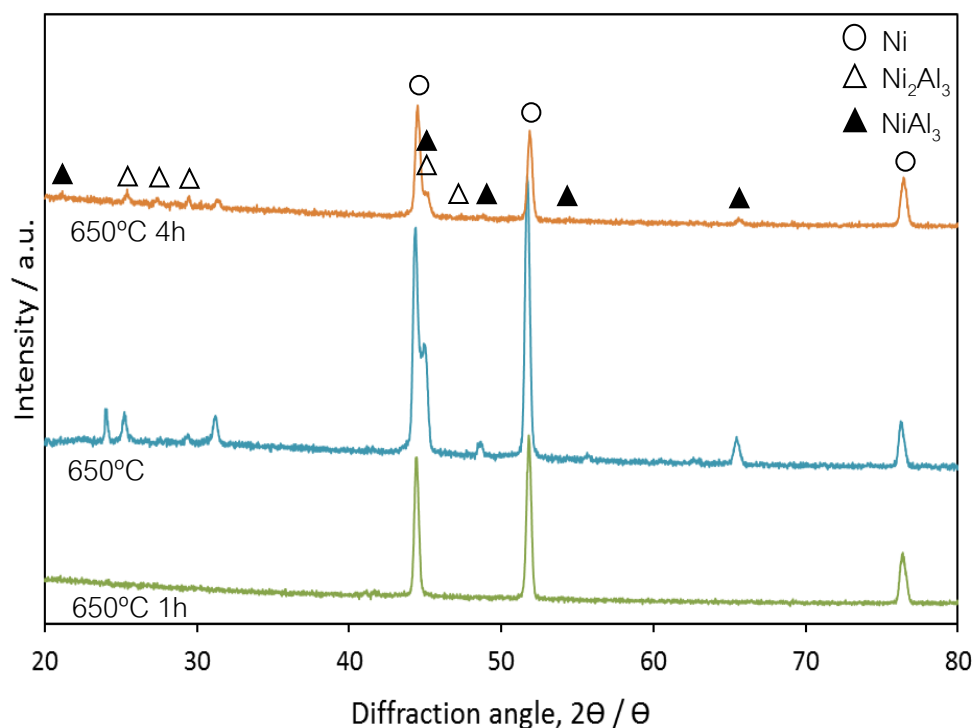


ภาพที่ 4.4 โครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวางของชิ้นงานโม่อะลูมิเนียมโพรงอากาศแบบเปิด (ก) เคลือบผิวด้วยนิเกิลโดยกรรมวิธีทางไฟฟ้าเป็นเวลา 30 นาทีและผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิ 620 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที (ข) เคลือบผิวด้วยนิเกิลโดยการชุบด้วยไฟฟ้าเป็นเวลา 30 นาทีและผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที

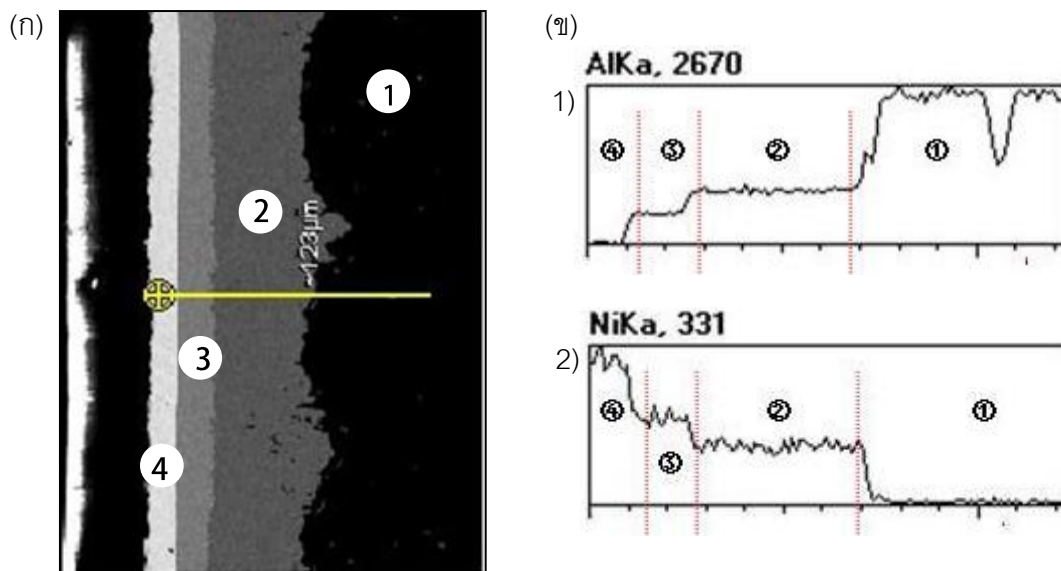
เปรียบเทียบความหนาของชั้นสารประกอบที่เกิดขึ้นได้ ชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวด้วยนิเกิลและผ่านกระบวนการทางความร้อนที่ 620 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที ซึ่งชั้นสารประกอบที่พบมีเพียงชั้นสารประกอบสีเทาเข้มเพียงชั้นเดียว ความหนาของชั้นสารประกอบสีเทาเข้มประมาณ 14.71  $\mu\text{m}$  สำหรับชิ้นงานที่ทำการเคลือบผิวด้วยนิเกิลและผ่านกระบวนการทางความร้อนที่ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที ซึ่งพบชั้นสารประกอบ 2 ชั้นมีสีเทาเข้มและเทาอ่อน ความหนาของชั้นสารประกอบสีเทาเข้มประมาณ 43.73  $\mu\text{m}$  ความหนาของชั้นสารประกอบสีเทาอ่อนประมาณ 10.02

$\mu\text{m}$  กล่าวคือชั้นสารประกอบสีเทาเข้มมีความหนาที่มากขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในกระบวนการทางความร้อนจาก 620 องศาเซลเซียสเป็น 650 องศาเซลเซียส เมื่อใช้เวลาในกระบวนการทางความร้อนที่เท่ากัน แต่สำหรับความหนาของชั้นเคลือบที่ต่างกันในงานวิจัยนี้ไม่ส่งผลต่อความหนาของชั้นสารประกอบที่เกิดขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

จากงานวิจัยในก่อนหน้า [37] ได้ทดลองทำการเคลือบผิวด้วยนิกเกิลโดยใช้กระแสไฟฟ้าบนผิวชิ้นงานอะลูมิเนียมแบบก้อน หลังจากนั้นนำไปผ่านกระบวนการทางความร้อนที่ 650 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 60 นาที พบว่าเกิดชั้นสารประกอบลักษณะเดียวกันกับในชิ้นงานโคมอะลูมิเนียม ณ สภาวะการทดลองเดียวกัน ทำการวิเคราะห์ธาตุและสารประกอบโดย XRD (X-Ray Diffraction) ดังภาพที่ 4.5 และระบุเฟสที่ได้จะอ้างอิงจากองค์ประกอบของธาตุอะลูมิเนียมและนิกเกิลในชั้นเคลือบแต่ละชั้นอย่างละเอียดด้วยวิธี EDS (Energy Dispersive X-ray Spectrometer) จากภาพที่ 4.6 (ก) และ (ข) สรุปได้ว่าชั้นสารประกอบสีเทาอ่อนและสีเทาเข้มที่เกิดขึ้นนั้นคือ  $\text{Al}_3\text{Ni}$  และ  $\text{Al}_3\text{Ni}_2$  ตามลำดับ



ภาพที่ 4.5 XRD ของชิ้นงานโคมอะลูมิเนียมที่ทำการเคลือบผิวด้วยนิกเกิลและผ่านกระบวนการทางความร้อนที่ 650 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1, 2.25 และ 4 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.6 (ก) ภาพ Line scan ของชิ้นงานที่ผ่านการอบชุบทางความร้อนที่

อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที

(ข) กราฟที่ได้จากการทำ Line scan ตามเส้นสีเหลืองของรูปที่ 4.6

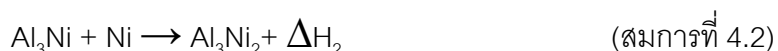
1) ปริมาณอะลูมิเนียม 2) ปริมาณนิกเกิล [37]

อุณหภูมิเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในกระบวนการทางความร้อนที่มีผลต่อการเกิดสารประกอบนิกเกิลอะลูมิเนียม [38, 39] และการรวมตัวกันเกิดเป็นสารประกอบนิกเกิลอะลูมิเนียมที่มีการคายความร้อนเกิดขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4.7 แสดงการเปลี่ยนแปลงสัญญาณ DTA ที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าบริเวณอุณหภูมิ 640 องศาเซลเซียสมีค่าของ  $\Delta T$  เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และการคายความร้อนนี้ส่งผลต่อการเกิดสารประกอบนิกเกิลอะลูมิเนียม ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

เมื่อพิจารณาแผนภาพสมดุลระหว่างอะลูมิเนียมและนิกเกิลจากภาพที่ 2.13 ณ บริเวณอุณหภูมิ 620 องศาเซลเซียสนั้นเป็นบริเวณที่อยู่ใต้เส้น Solidus ในกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมินี้ การเกิดสารประกอบอะลูมิเนียมเป็นไปในรูปแบบของ SHS (Self-propagating high temperature synthesis) กระบวนการทางความร้อนในช่วงอุณหภูมิก่อน 600 องศาเซลเซียส อะตอมของอะลูมิเนียมที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ระหว่างอะตอม (Interdiffusion Coefficient) สูงกว่านิกเกิล

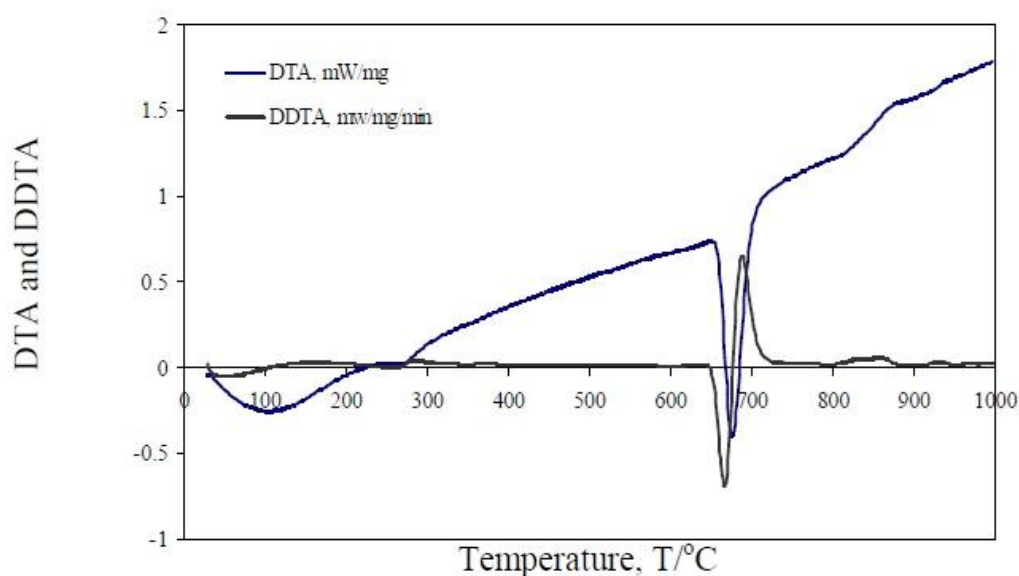


ในช่วงแรกนี้จึงมีการแพร่ของอะตอมอะลูมิเนียมเป็นหลัก [40, 41] และอะตอมของอะลูมิเนียมและนิกเกิลจะเกิดการแพร่ระหว่างกันในสถานะที่เป็นของแข็ง (Solid-solid state diffusion) เมื่อนิกเกิลละลายอยู่ในเนื้ออะลูมิเนียมจนมากเกินขีดจำกัดของการละลาย จึงรวมตัวและตกผลึกออกมาเป็นสารประกอบระหว่างอะลูมิเนียมและนิกเกิล ซึ่งคือฟิล์มบางของ  $Al_3Ni$  [42] ดังสมการที่ 4.1 [43] และมีการคายความร้อน มีผลทำให้อุณหภูมิในบริเวณนั้นสูงขึ้น และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจนใกล้จุด Eutectic ของ  $Al-Al_3Ni$  คือประมาณ 640 องศาเซลเซียส อะตอมของอะลูมิเนียมจะไวต่อการเกิดปฏิกิริยามากขึ้นทำให้มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นอย่าง เกิดเป็นสารประกอบเชิงโลหะคือ  $Al_3Ni_2$  [40, 41, 44, 45] และสารประกอบ  $Al_3Ni$  ที่เกิดขึ้นก่อนหน้านี้นี้เมื่อรวมตัวกับนิกเกิลมากขึ้นเกิดเป็น  $Al_3Ni_2$  ในลำดับต่อมา ดังสมการที่ 4.2 โครงสร้างที่เราพบจึงมีเพียงเฟสของสารประกอบ  $Al_3Ni_2$  ซึ่งการที่เกิดสารประกอบต่างกันเนื่องมาจากกระบวนการการแพร่ที่นั้นถูกควบคุมโดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ระหว่างอะตอมของแต่ละเฟส (Interdiffusion Coefficient) ดังตารางที่ 4.5 ยกตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่กระบวนการทางความร้อน 600 องศาเซลเซียส ซึ่งการทำ Heat treatment ที่อุณหภูมิดังกล่าว สามารถเกิดเฟสของสารประกอบเชิงโลหะระหว่างอะลูมิเนียมและนิกเกิลได้หลากหลาย ดังเช่น  $Al_3Ni$ ,  $\delta-Al_3Ni_2$ ,  $\beta-AlNi$  และ  $\gamma-AlNi_3$  นอกจากนี้ยังมี Solid solution ได้แก่  $Al(Ni)$  และ  $Ni(Al)$  แต่จากการวิเคราะห์พบเพียงเฟสของ  $Al_3Ni$  และ  $Al_3Ni_2$  เนื่องจากเป็นเฟสที่มีความหนามากถึงระดับ 1 - 100 ไมครอน [40]



ตารางที่ 4.5 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่กระบวนการทางความร้อน 600 องศาเซลเซียส [40]

เฟส	Al(Ni)	Al <sub>3</sub> Ni	Al <sub>3</sub> Ni <sub>2</sub>	AlNi	AlNi <sub>3</sub>	Ni(Al)
อ้างอิง	[46]	[17]	[17]	[47]	[46]	[48]
$D_{inter}^{600^{\circ}\text{C}} \text{ (m}^2\text{s}^{-1}\text{)}$	$8 \times 10^{-18}$	$1 \times 10^{-16}$	$1 \times 10^{-14}$	$2 \times 10^{-17}$	$2 \times 10^{-18}$	$1.5 \times 10^{-18}$



ภาพที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงสัญญาณ DTA ที่อุณหภูมิต่างๆ ของอะลูมิเนียมและนิกเกิล [49]

กระบวนการทางความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 600-630 องศาเซลเซียสดังที่กล่าวมาข้างต้น คือ ช่วงที่มีการแพร่ในสถานะที่เป็นของแข็ง (Solid state) พิจารณาภาพที่ 2.13 แผนภาพสมดุลระหว่าง อะลูมิเนียมและนิกเกิล สำหรับกระบวนการทางความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 640 - 650 องศาเซลเซียส นั้น ในช่วงเริ่มต้นเกิดเฟส Al<sub>3</sub>Ni<sub>2</sub> ขึ้นมาก่อน เช่นเดียวกับกระบวนการทางความร้อนที่ 620 องศาเซลเซียส ดังสมการที่ 4.1 และ 4.2 พร้อมทั้งมีการคายความร้อน ( $\Delta H$ ) สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงสัญญาณ DTA ดังแสดงในภาพที่ 4.7 ที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าบริเวณอุณหภูมิ 640 องศาเซลเซียสมีค่า

ของ  $\Delta T$  เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งผลการเปลี่ยนแปลงสัญญาณ DTA ที่ได้ในงานวิจัยนี้ สอดคล้องกับในงานวิจัยของ Gasparyan และ Shteinberg [43] และการคายความร้อนนี้ส่งผลต่อการเกิดสารประกอบนิกเกิลอะลูมิเนียมได้ ส่งผลให้เนื้อพื้นอะลูมิเนียมบางส่วนมีอุณหภูมิสูงกว่า 660 องศาเซลเซียส (จุดหลอมเหลวของอะลูมิเนียม) ทำให้เกิดการหลอมเหลวขึ้น (Local melting) อะตอมของนิกเกิลจะละลายเข้าไปในอะลูมิเนียมผสมที่มีสถานะเป็นของเหลว (Liquid state) ซึ่งมีการแพร่ในสถานะกึ่งของแข็ง (Semi-solid state) [38] การแพร่ในสถานะของเหลวนี้อาจเกิดได้รวดเร็วกว่าการแพร่ที่เกิดขึ้นในสถานะที่อะลูมิเนียมผสมยังมีสถานะของแข็ง (Solid state) ในช่วงต่อมาเมื่ออะลูมิเนียมในส่วนที่เกิดการหลอมเหลวรวมตัวกับ  $Al_3Ni_2$  มากขึ้นจึงเกิดเป็น  $Al_3Ni$  ขึ้น แต่จะเกิดขึ้นช้าๆ ดังสมการที่ 4.3 [50] และเนื่องจาก  $Al_3Ni_2$  สามารถโตได้อย่างรวดเร็ว ควบคู่กับการเกิด  $Al_3Ni$  อย่างช้าๆ เมื่อวิเคราะห์โครงสร้างจึงพบทั้งชั้นของสารประกอบ  $Al_3Ni_2$  และชั้นบางๆของสารประกอบ  $Al_3Ni$



นอกจากปัจจัยในด้านอุณหภูมิที่มีผลต่อโครงสร้างที่เกิดขึ้นแล้ว ยังมีปัจจัยในด้านของอัตราการเพิ่มอุณหภูมิในกระบวนการทางความร้อน (Heating rate) อีกด้วย [51] ในงานวิจัยนี้ใช้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิในกระบวนการทางความร้อนที่ต่ำ คือ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที หากค่าอัตราการเพิ่มอุณหภูมิในกระบวนการทางความร้อนมีค่าต่ำ ปฏิกริยาระหว่างอะลูมิเนียมและนิกเกิลจะเริ่มเกิดขึ้นอย่างช้าๆ อัตราการคายความร้อนน้อยเมื่อเทียบกับอัตราการสูญเสียความร้อน การเกิดสารประกอบจึงถูกควบคุมโดย Solid-solid state diffusion จนกว่าความร้อนที่คายออกมาจะทำให้อุณหภูมิสูงใกล้อุณหภูมิที่จุด Eutectic (ประมาณ 640 องศาเซลเซียส)

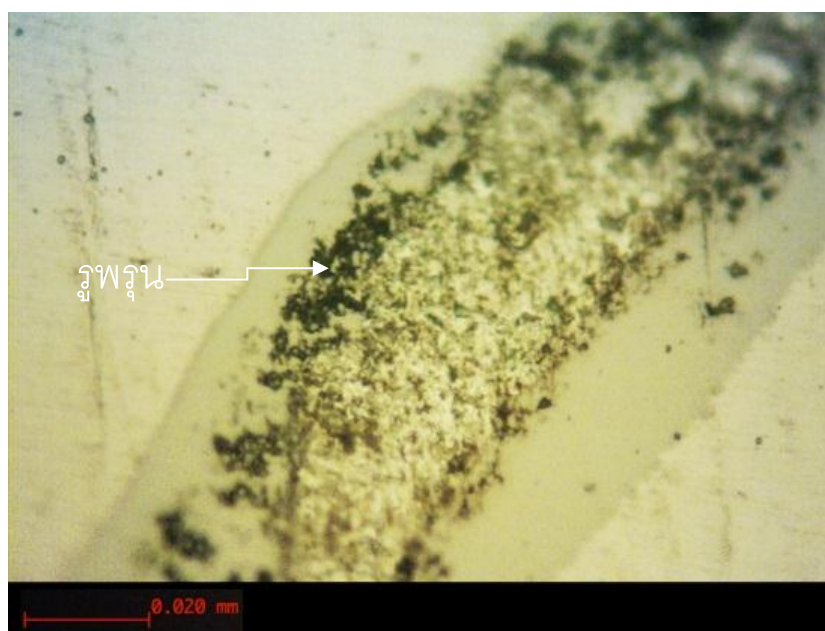
นอกจากชนิดของสารประกอบที่เกิดต่างกันแล้ว ชั้นสารประกอบ  $Al_3Ni_2$  มีความหนาที่ต่างกัน กล่าวคือ ความหนาของชั้นสารประกอบนั้นมีผลจากเวลาและอุณหภูมิ สำหรับในงานวิจัยนี้เวลาในแต่ละสถานะการทดลองคือ 1 ชั่วโมงเท่ากัน ดังนั้นปัจจัยที่ทำให้ความหนาของชั้น  $Al_3Ni_2$  ต่างกันคืออุณหภูมิ ดังสมการที่ 4.3 และ 4.4

$$h_2 = K(t-t_1) \quad (\text{สมการที่ 4.4})$$

$h$  คือความหนาชั้นสารประกอบนิกเกิลอะลูมิเนียมไนต์,  $K$  คือสัมประสิทธิ์อัตราการแพร่ และ  $t$  คือเวลา

$$K = K_0 \exp(-E_g/RT) \quad (\text{สมการที่ 4.5})$$

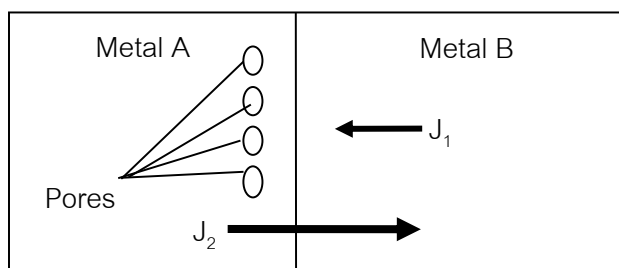
$K_0$  คือค่าคงที่ ( $\mu\text{m/s}$ ),  $E_g$  คือ Activation Energy ของการโตของเฟสใหม่ (J/mol),  $R$  คือค่าคงที่ของแก๊ส และ  $T$  คืออุณหภูมิ



ภาพที่ 4.8 รูพรุนที่พบในภาพตัดขวางชิ้นงานโม่อะลูมิเนียมที่ทำกรเคลือบผิวด้วยนิกเกิลโดยการชุบด้วยไฟฟ้าและผ่านกระบวนการทางความร้อน (บริเวณรอยต่อระหว่างเนื้อพื้นอะลูมิเนียมและชั้นสารประกอบนิกเกิลอะลูมิเนียมไนต์)

จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวางของชิ้นงานหลังจากผ่านกระบวนการทางความร้อน พบรูพรุนบริเวณเนื้ออะลูมิเนียมบริเวณรอยต่อระหว่างเนื้อพื้นอะลูมิเนียมและชั้นสารประกอบนิกเกิลอะลูมิเนียมไนต์ และรูพรุนที่เกิดขึ้นบริเวณภายในชั้นสารประกอบนิกเกิลอะลูมิเนียมไนต์ภาพที่ 4.8 รูพรุนที่เกิดขึ้นในเนื้อของอะลูมิเนียมบริเวณรอยต่อกับสารประกอบนิกเกิลอะลูมิเนียมไนต์คือ การที่อะลูมิเนียม

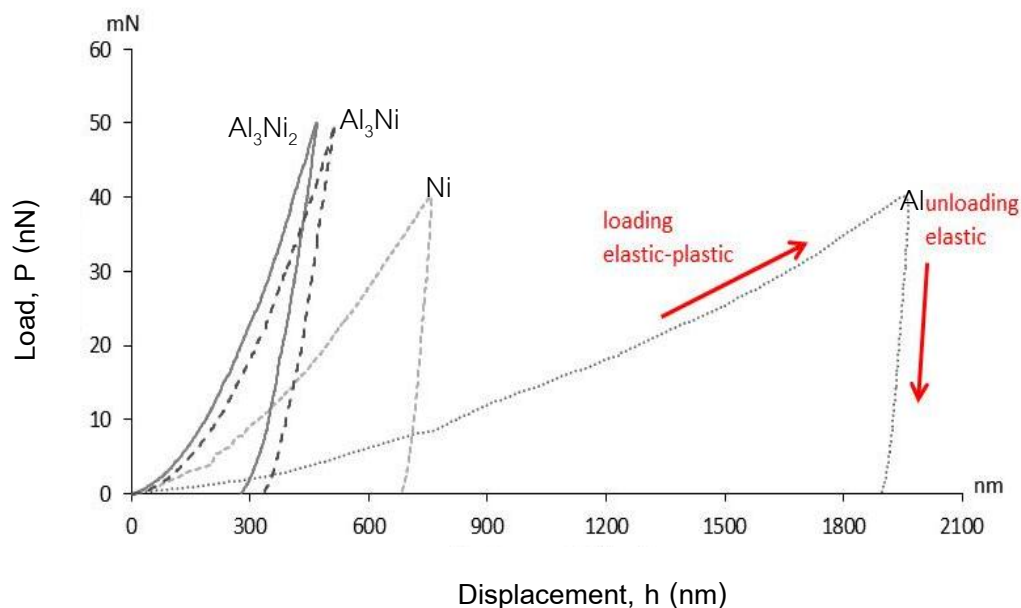
บางส่วนกลายเป็นของเหลว ทำให้เกิดการขยายตัว และเมื่อเย็นตัวลงจึงเกิดเป็นช่องว่างรูพรุน (Shrinkage) บริเวณภายในชั้นสารประกอบนิกเกิลอะลูมิเนียมอีกด้วย [52] นอกจากนี้การเกิดสารประกอบนิกเกิลอะลูมิเนียมในดินนั้นมีผลให้เกิดรูพรุนระดับไมครอน เนื่องจากความไม่เท่ากันในการแพร่ระหว่างอะตอม ซึ่งเกิดจากอะตอมของนิกเกิลที่ละลายอยู่เคลื่อนที่ได้ยากในทิศทางของอะลูมิเนียม [13, 42] ดังภาพที่ 4.9 ภาพจำลองการแพร่ระหว่างโลหะ 2 ชนิดที่มีสัมประสิทธิ์การแพร่ไม่สมดุระหว่างกัน เป็นผลทำให้เกิดรูพรุนในเนื้อโลหะฝั่งที่มีสัมประสิทธิ์การแพร่ที่มากกว่า ซึ่งช่วงอุณหภูมิ 600-650 องศาเซลเซียสนี้ สัมประสิทธิ์การแพร่ระหว่างอะตอม (Interdiffusion) ของอะลูมิเนียมสูงประมาณ 10 เท่าของนิกเกิล [40] จึงส่งผลให้เกิดรูพรุนระดับไมครอนในเนื้อพื้นอะลูมิเนียมบริเวณรอยต่อติดกับชั้นสารประกอบนิกเกิลอะลูมิเนียมที่เกิดขึ้น ดังภาพที่ 4.8



ภาพที่ 4.9 ภาพจำลองการแพร่ระหว่างโลหะ 2 ชนิดที่มีสัมประสิทธิ์การแพร่ต่างกัน โดย  $J_1$  และ  $J_2$  ( $\text{mole m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) คือ intrinsic flux ของโลหะ

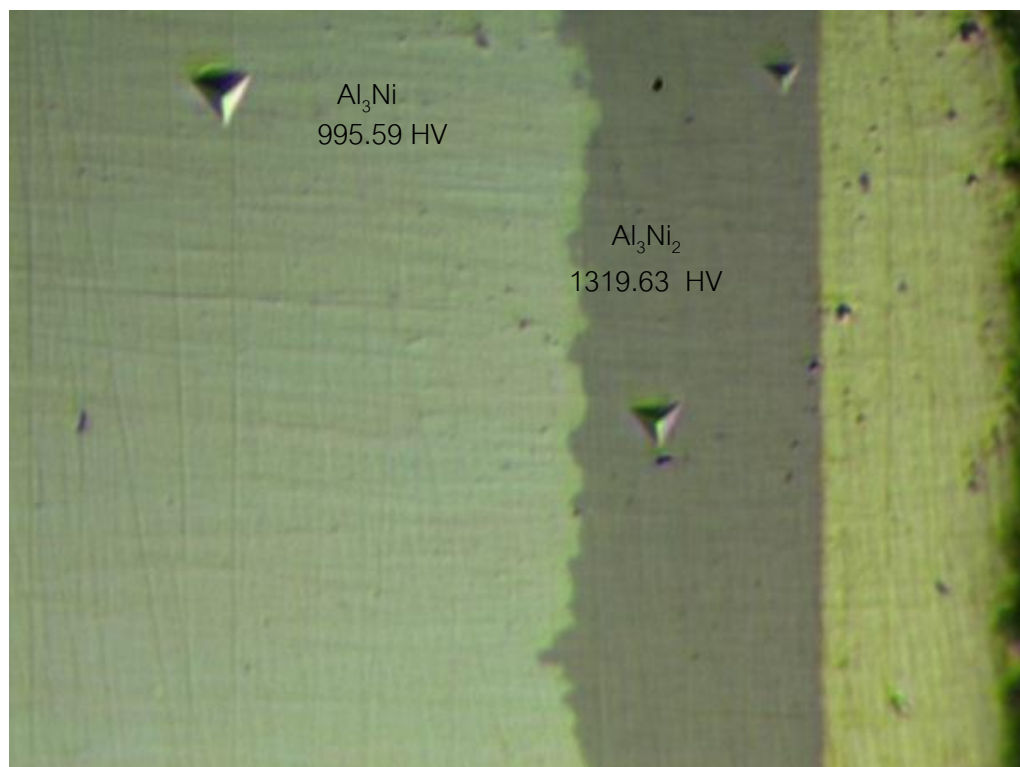
#### 4.4 การทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุ

##### 4.4.1 การทดสอบสมบัติทางกลด้วยเครื่อง Nano-indentation



ภาพที่ 4.10 กราฟแสดงลักษณะความเป็น Elastic-Plastic ของ Al, Ni, Al<sub>3</sub>Ni<sub>2</sub> และ Al<sub>3</sub>Ni ขณะการให้โหลดและการปล่อยโหลด

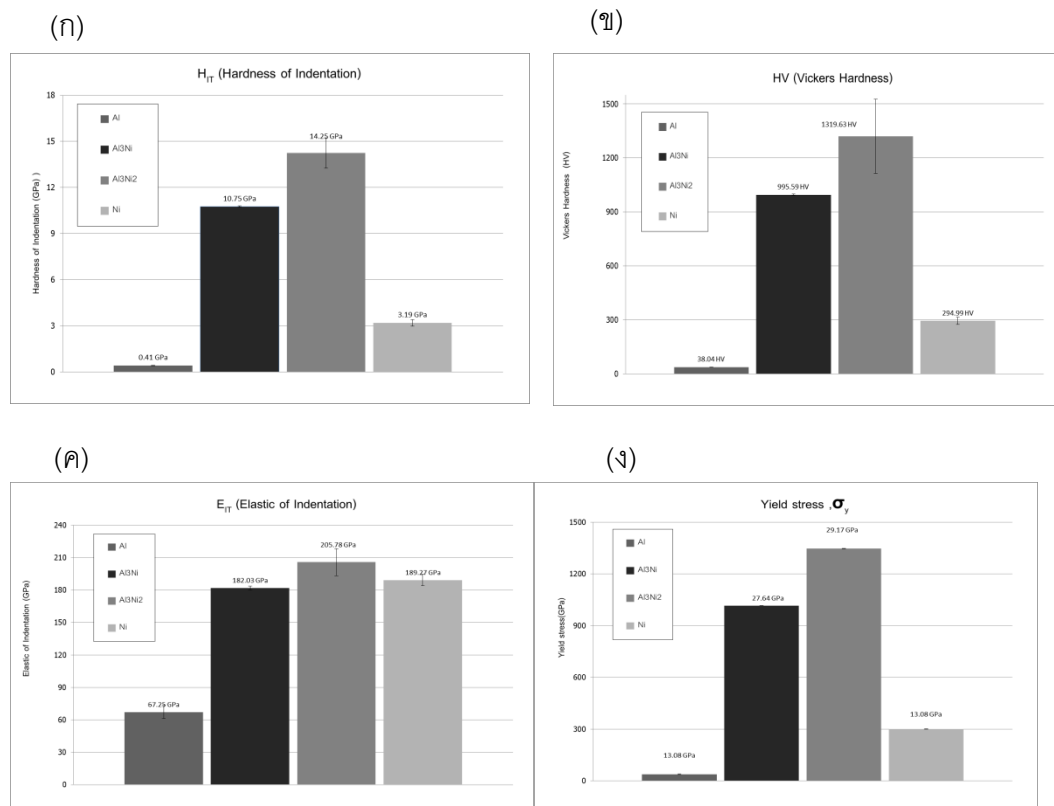
เมื่อพิจารณาภาพที่ 4.10 แกน X คือระยะที่หัวกดตกลงไป และแกน Y คือโหลดที่ให้และปล่อย พบว่าอะลูมิเนียมมีการเกิดการเสียรูปแบบถาวร (Plastic deformation) สูงกว่าวัสดุอื่น สังเกตจากพื้นที่ใต้กราฟคืองานในช่วงพลาสติก ต่างจากสารประกอบนิกเกิลอะลูมิเนียมไนต์ที่มีพื้นที่ใต้กราฟน้อย จากภาพที่ 4.11 คือรอยกดจากการทดสอบ Nano-indentation ภายใต้โหลด 50 กรัม ในการวิเคราะห์สมบัติทางกลจากเครื่อง Nano-indentation แสดงสมบัติต่างๆดังภาพที่ 4.12 และตารางที่ 4.6 ได้แก่ ค่าความแข็ง (HV, Vickers Hardness และ H<sub>IT</sub>, Hardness of indentation), ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (E<sub>IT</sub> : Elastic of Indentations), ค่าความแกร่ง (S, Stiffness) และค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield Strength)



ภาพที่ 4.11 รอยกดจากการทดสอบ Nano-indentation ภายใต้โหลด 50 กรัม

ตารางที่ 4.6 สมบัติทางกลของวัสดุ วิเคราะห์จากเครื่อง Nano-indentation

	Aluminium	Al <sub>3</sub> Ni	Al <sub>3</sub> Ni <sub>2</sub>	Nickel
H <sub>IT</sub> (Hardness of Indentation, GPa)	0.41	10.75	14.25	3.19
HV (Vickers Hardness, HV)	38.04	995.59	1319.63	295.10
E <sub>IT</sub> (Elastic of Indentation, GPa)	67.25	182.03	205.78	232.05
σ <sub>y</sub> (Yield strength ,GPa)	34.35	895.83	1187.44	265.45



ภาพที่ 4.12 สมบัติทางกลของ Al, Al<sub>3</sub>Ni, Al<sub>3</sub>Ni<sub>2</sub> และ Ni (ก) Hardness of Indentation (ข) Vickers Hardness (ค) Elastic of Indentation (ง) Yield stress

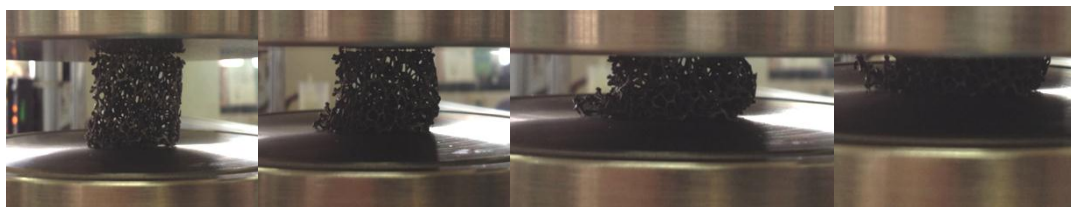
จากการทดสอบสมบัติทางกลโดยเครื่อง Nano-indentation ค่าความแข็งและความแข็งแรง ณ จุดครากของสารประกอบนิกเกิลอะลูมิเนียมไนต์ (Al<sub>3</sub>Ni และ Al<sub>3</sub>Ni<sub>2</sub>) มีค่ามากกว่าความแข็งของอะลูมิเนียมและนิกเกิล และค่าที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยต่างๆ ดังแสดงในภาคผนวก ง

#### 4.4.2 การทดสอบสมบัติการรับแรงอัด (Compressive Test)

จากการทดสอบสมบัติการรับแรงอัดดังภาพที่ 4.13 พบว่าสมบัติการรับแรงอัดของชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมโพรงอากาศแบบเปิดมีลักษณะดังภาพที่ 2.3 ภาพจำลองทางทฤษฎีและภาพที่ 4.14

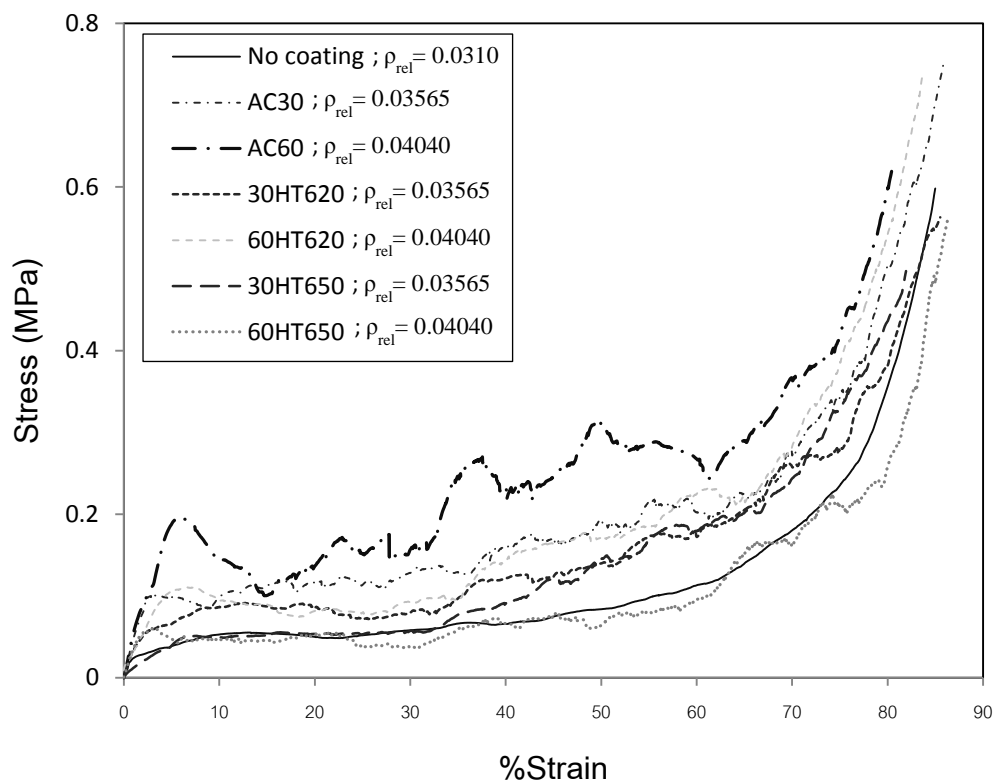


คือภาพจากงานวิจัยนี้ ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) แสดงการเปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงอัดของชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมตั้งต้น



ภาพที่ 4.13 ลักษณะการทดสอบแรงอัดของโฟมอะลูมิเนียมที่ความเครียด 0% 30% 50% และ 70%

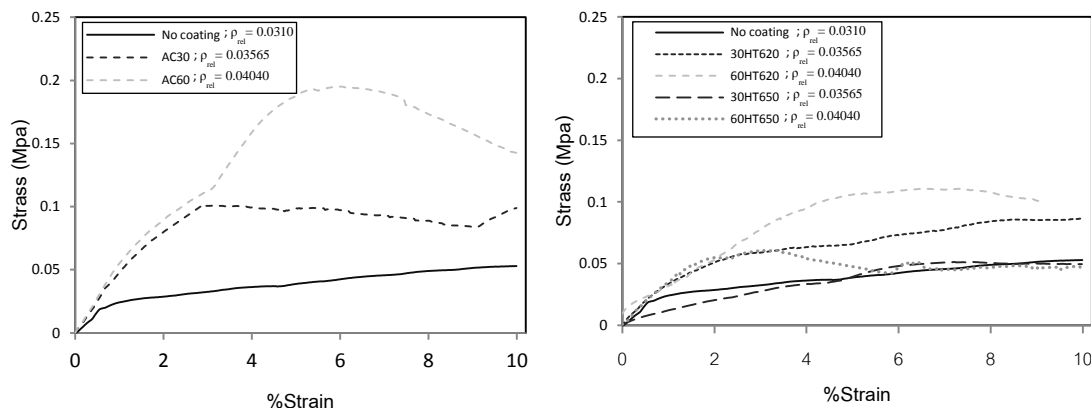
โฟมอะลูมิเนียมที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยนิกเกิลโดยการชุบด้วยไฟฟ้า และโฟมอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนหลังจากการทำกรเคลือบผิวด้วยนิกเกิลโดยการชุบด้วยไฟฟ้า เมื่อพิจารณาพบว่า กราฟแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ช่วงที่ 1 คือช่วงการเปลี่ยนแปลงแบบยืดหยุ่น (Elastic Region) ในช่วงนี้ก้าน (Struts) ของโฟมอะลูมิเนียมเกิดการผิดรูปโดยการดัดงอแบบยืดหยุ่น ช่วงที่ 2 คือช่วงพลาโต (Plateau Region) ) เกิดการผิดรูปแบบพลาสติก (Plastic Deformation) ในช่วงนี้จะเริ่มเสียรูปจากก้านของโฟมที่อ่อนแอที่สุดที่อยู่ติดๆกันและขนานกับแนวแรงกด จนเริ่มอัดตัวกันแน่นจึงเริ่มเข้าสู่ช่วงที่ 3 คือช่วงอัดแน่น (Densification Region) เป็นช่วงที่เนื้อโฟมอัดกันแน่น ทำให้ความเค้นมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว [2, 3, 21] จากภาพที่ 4.14 กราฟของโฟอะลูมิเนียมตั้งต้นมีลักษณะเรียบเนื่องมาจากเป็นวัสดุที่มีสมบัติเหนียว แต่สำหรับชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมที่ทำการเคลือบผิวด้วยนิกเกิลและโฟมอะลูมิเนียมที่ทำการเคลือบผิวด้วยนิกเกิลและนำไฟผ่านกระบวนการทางความร้อนนั้น สังเกตพบว่ากราฟมีความขรุขระและมีลักษณะคล้ายฟันเลื่อยเนื่องมาจากขณะให้โหลดในการทดสอบการรับแรงกดนั้นมีการแตกหักเฉพาะที่ภายในก้านของโฟม [53]



ภาพที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของฟิโอมอะลูมิเนียมโพรงอากาศแบบเปิดในสภาวะต่างๆ

กราฟที่ได้จากการทดสอบสมบัติการรับแรงอัดนี้ สามารถนำมาวิเคราะห์สมบัติทางกลของวัสดุได้ และในงานวิจัยนี้สมบัติทางกลที่สนใจศึกษาคือ ความแข็งแรง ณ จุดครากของชิ้นงานโฟม (Yield Strength), ค่าการดูดซับพลังงาน (Energy Absorption) และค่าความเค้นช่วงพลาโต (Plateau Stress)

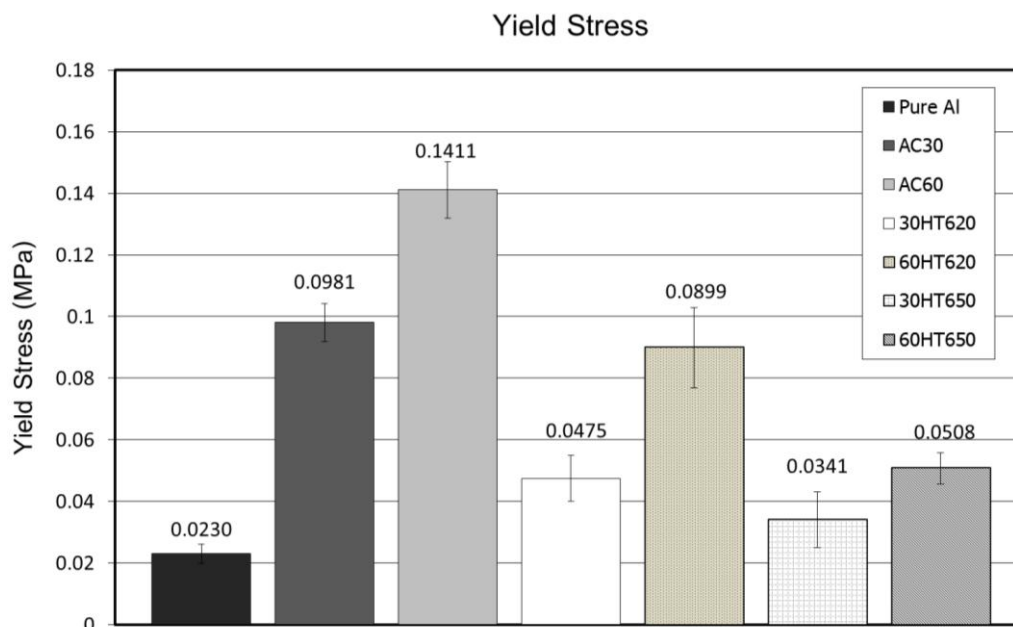
#### 4.4.2.1 ความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield Strength)



ภาพที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของโพลีอะลูมิเนียมตั้งต้น และ (ก) ชิ้นงานโพลีอะลูมิเนียมที่เคลือบผิวด้วยนิกเกิลโดยการชุบด้วยไฟฟ้าเป็นเวลา 30 และ 60 นาที (ข) ชิ้นงานโพลีอะลูมิเนียมที่เคลือบผิวด้วยนิกเกิลโดยการชุบด้วยไฟฟ้าและผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิ 620 และ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที

ชิ้นงานอะลูมิเนียมที่เคลือบผิวด้วยนิกเกิลนั้นมีค่าความแข็งแรง ณ จุดครากเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนตามเวลาที่ใช้ในการเคลือบ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความหนาของชั้นเคลือบนิกเกิล ดังภาพที่ 4.15 จากเดิมชิ้นงานโพลีอะลูมิเนียมตั้งต้นมีความแข็งแรง ณ จุดครากประมาณ 0.023 MPa สำหรับชิ้นงานที่เคลือบผิวเป็นเวลา 30 และ 60 นาที มีค่าความแข็งแรง ณ จุดครากประมาณ 0.0981 MPa และ 0.1411 MPa ตามลำดับ แต่ชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยนิกเกิลและผ่านกระบวนการทางความร้อนนั้นค่าความแข็งแรง ณ จุดครากกลับลดต่ำลงในทุกสภาวะของกระบวนการทางความร้อน โดยชิ้นงานโพลีอะลูมิเนียมที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยนิกเกิลเป็นเวลา 30 นาทีและ 60 นาที ที่มีสภาวะของกระบวนการทางความร้อนที่ 620 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที มีค่าความแข็งแรง ณ จุดครากประมาณ 0.0475 MPa และ 0.0899 MPa ตามลำดับ และชิ้นงานที่มีสภาวะของกระบวนการทางความร้อนที่ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที มีค่าความแข็งแรง ณ จุดครากประมาณ 0.0341 MPa และ 0.0508 MPa ตามลำดับ แต่จะสังเกตได้ว่าในสภาวะกระบวนการทาง

ความร้อนที่อุณหภูมิเดียวกัน ชี้นงานที่เคลือบผิวด้วยนิกเกิลที่ใช้เวลาในการเคลือบ 60 นาที มีความแข็งแรง ณ จุดครากสูงกว่าชี้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยนิกเกิลที่ 30 นาที ดังแผนภาพที่ 4.16



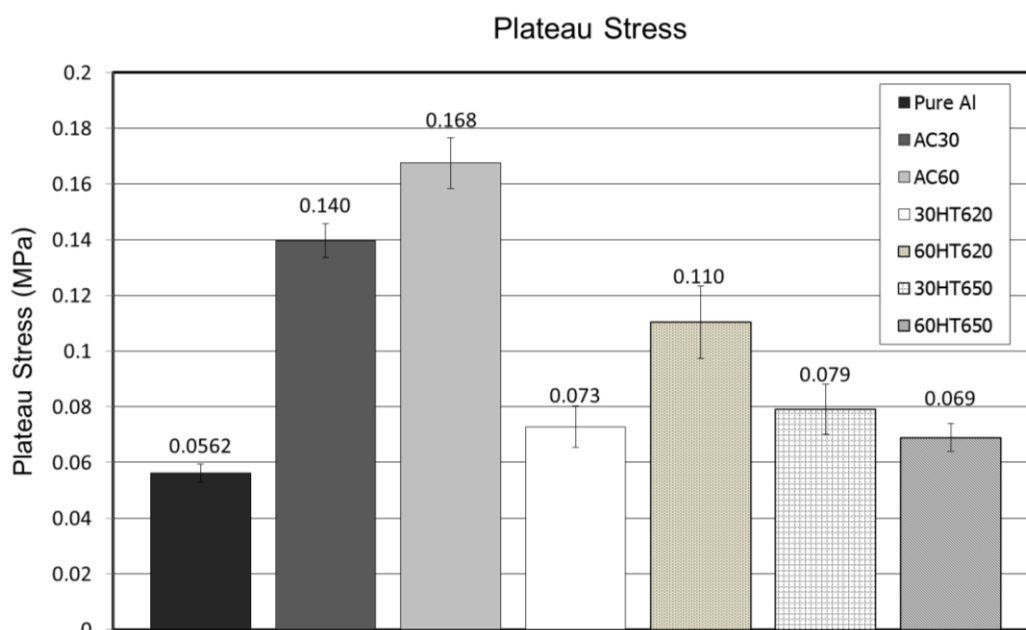
ภาพที่ 4.16 ความแข็งแรง ณ จุดครากของชี้นงานโคมอะลูมิเนียมในสภาวะของกระบวนการต่างๆ

จากการทดลองสรุปได้ว่า ชี้นงานโคมอะลูมิเนียมเมื่อนำไปเคลือบผิวด้วยนิกเกิลโดยกรรมวิธีทางไฟฟ้า เป็นเวลา 30 และ 60 นาที มีค่าความแข็งแรง ณ จุดครากเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับโคมอะลูมิเนียมตั้งต้น ประมาณ 4.3 - 6.1 เท่า แต่หลังจากที่นำโคมอะลูมิเนียมที่เคลือบผิวด้วยนิกเกิลนี้ไปผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิ 620 และ 650 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความแข็งแรง ณ จุดครากลดต่ำลง แต่ยังคงสูงเมื่อเปรียบเทียบกับกับชี้นงานโคมอะลูมิเนียมตั้งต้น อยู่ประมาณ 1.48 - 3.9 เท่า

#### 4.4.2.2 ค่าความเครียดช่วงพลาโต (Plateau Stress)

เมื่อพิจารณาค่าความเครียดช่วงพลาโตดังภาพที่ 4.17 พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก ชี้นงานโคมอะลูมิเนียมที่เคลือบผิวเป็นเวลา 30 และ 60 นาที มีค่าความเครียด

ช่วงพลาโตประมาณ 0.140 MPa และ 0.168 MPa ตามลำดับ สูงกว่าชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมตั้งต้นซึ่งมีค่าประมาณ 0.0562 MPa โดยแปรผันตามเวลาที่ใช้ในการเคลือบ แต่เมื่อนำชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยนิกเกิลไปผ่านกระบวนการทางร้อน จะเห็นได้ชัดว่าค่าความเค้นช่วงพลาโตต่ำลงทั้งที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนที่ 620 และ 650 องศาเซลเซียส โดยในสถานะของกระบวนการทางความร้อนที่ 620 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที หลังจากเคลือบผิวด้วยนิกเกิลเป็นเวลา 30 นาทีและ 60 นาที มีค่าความเครียดช่วงพลาโตประมาณ 0.073 MPa และ 0.110 MPa ตามลำดับ และชิ้นงานในสถานะของกระบวนการทางความร้อนที่ 650 องศาเซลเซียส มีค่าความเครียดช่วงพลาโตประมาณ 0.079 MPa และ 0.069 MPa ตามลำดับ



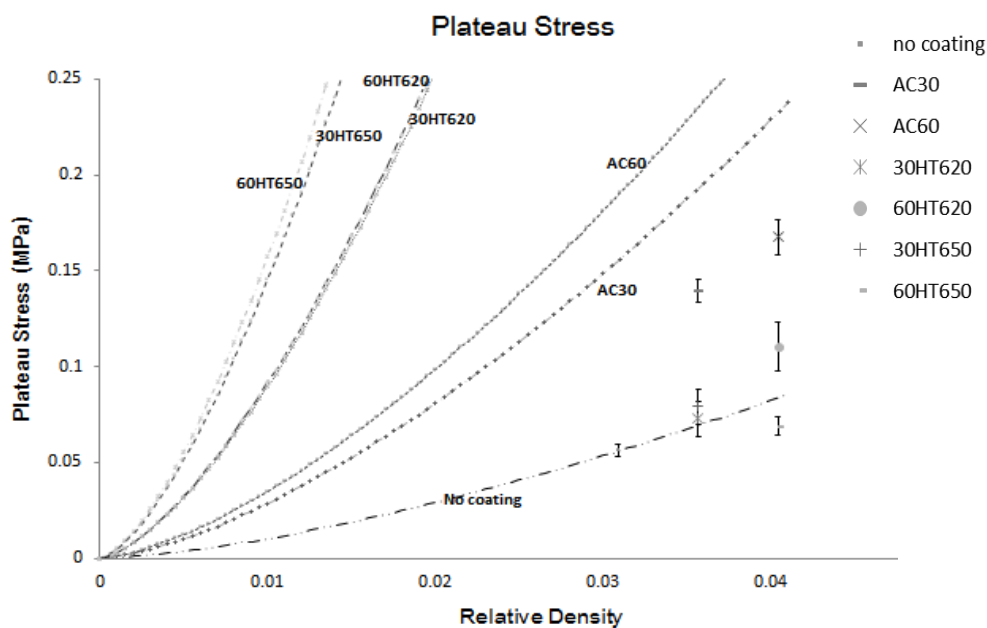
ภาพที่ 4.17 ค่าความเครียดช่วงพลาโตของชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมในสถานะของกระบวนการต่างๆ

การเปรียบเทียบสมบัติทางกลของโฟมอะลูมิเนียมประเภทต่างๆ ในงานวิจัยนี้ ไม่สามารถเปรียบเทียบค่าได้โดยตรง เนื่องจากชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิวมานั้นมีการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ จึงส่งผลให้การเพิ่มขึ้นของความเครียดช่วงพลาโตของโฟมอะลูมิเนียมนั้นมีผลมา

จากการเพิ่มขึ้นของค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ ดังความสัมพันธ์ของ Gibson และ Ashby [21] ดังสมการที่ 4.3

$$\frac{\sigma_{pl}^*}{\sigma_{ys}} \approx C \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{3/2} \quad (\text{สมการที่ 4.6})$$

$\sigma_{pl}^*$  คือความเคียดช่วงพลาโต (MPa)  $\sigma_{ys}$  คือค่าความแข็งแรง ณ จุดครากของวัสดุเนื้อพื้น โฟมโลหะ ค่า C คือค่าคงที่มีค่าอยู่ในช่วง 0.25 - 0.35 ในงานวิจัยนี้ใช้ค่า C=0.3 และค่า  $\rho^*/\rho_s$  คือค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ จากสมการที่ 4.6 นี้สามารถคำนวณและสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสัมพัทธ์และความเคียดช่วงพลาโตของชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมในสถานะของกระบวนการต่างๆได้ แสดงการคำนวณไว้ใน (ภาคผนวก จ) ดังภาพที่ 4.18 และเปรียบเทียบค่าความเค้นช่วงพลาโต ณ ความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่เท่ากัน จากการทดลองและจากการคำนวณแสดงไว้ในตารางที่ 4.7



ภาพที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสัมพัทธ์และค่าความเคียดช่วงพลาโต จากการทดลองและการคำนวณทางทฤษฎี ของชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมในสถานะของกระบวนการต่างๆ

จากการทดลองสรุปได้ว่า ชี้นงานโฟมอะลูมิเนียมเมื่อนำไปเคลือบผิวด้วยนิกเกิลโดยกรรมวิธีทางไฟฟ้า เป็นเวลา 30 และ 60 นาที มีค่าความเครียดช่วงพลาโตเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับโฟมอะลูมิเนียมตั้งต้น ประมาณ 2.49 - 2.98 เท่า แต่หลังจากที่นำโฟมอะลูมิเนียมที่เคลือบผิวด้วยนิกเกิลนี้ไปผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิ 620 และ 650 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความเครียดช่วงพลาโตลดต่ำลง แต่ยังคงสูงเมื่อเปรียบเทียบกับกับชี้นงานโฟมอะลูมิเนียมตั้งต้น อยู่ประมาณ 1.22 - 1.96 เท่า

ตารางที่ 4.7 ค่าความเครียดช่วงพลาโตจากการคำนวณทางทฤษฎีและจากการทดลองของชี้นงานที่ผ่านกระบวนการต่างๆ (ภาคผนวก จ)

	Relative density, $\rho^*$ (%)	Estimated bulk Yield stress, $\sigma_{ys}$ (MPa)	Predicted foam Plateau stress, $\sigma_{pl}^*$ (Mpa)	Experimental foam Plateau stress, $\sigma_{pl}^*$ (MPa)
Al foam	3.10	34.45	0.0562	0.0562
AC30	3.56	95.38	0.1914	0.1396
AC60	4.04	116.38	0.2793	0.1675
30HT620	3.56	305.60	0.6132	0.0728
60HT620	4.04	298.74	0.7170	0.1104
30HT650	3.56	523.87	1.0512	0.0791
60HT650	4.04	484.23	1.1622	0.0689

#### 4.4.2.3 ค่าการดูดซับพลังงาน (Energy Absorption)

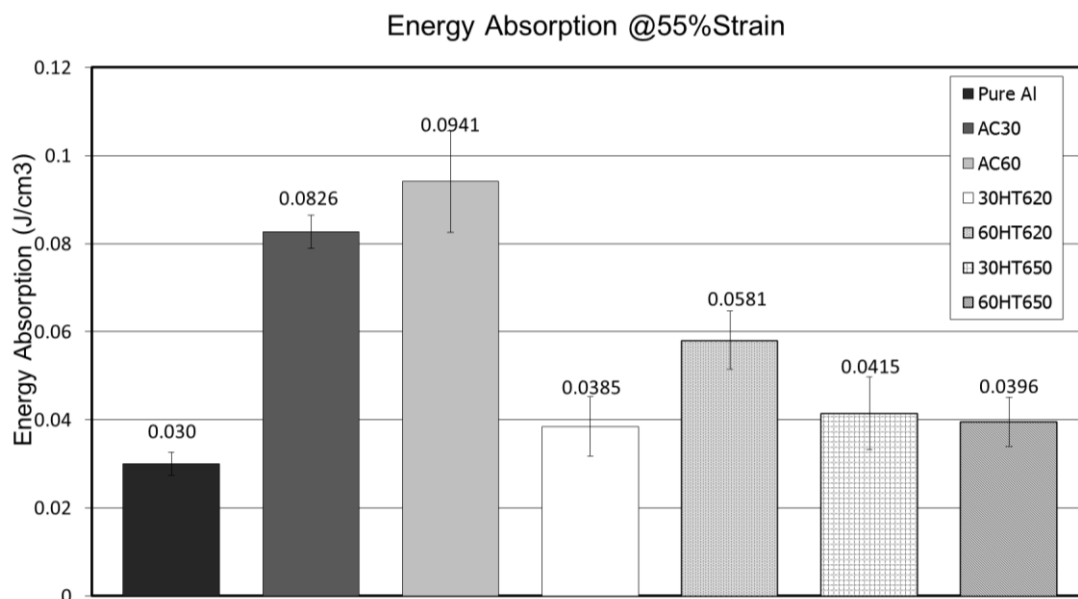
ค่าการดูดซับพลังงานสามารถคำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ดังสมการที่ 4.7

$$W = \int_0^{\varepsilon_d} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (\text{สมการที่ 4.7})$$

เมื่อ  $\sigma$  และ  $\varepsilon$  คือค่าความเค้นและความเครียดจากการรับแรงอัด ค่า  $\varepsilon_d$  คือ ความเครียดช่วงอัดแน่น (Densification strain) โดยในงานวิจัยนี้คำนวณค่าการดูดซับพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดภายใต้ช่วง 0 - 55% ของค่าความเครียด ดังแสดงไว้ดังภาพที่ 4.19 และ 4.20 พบว่าค่าการดูดซับพลังงานมีแนวโน้มเช่นเดียวกับค่าความแข็งแรง ณ จุดครากและค่าความเครียดช่วงพลาโต กล่าวคือค่าการดูดซับพลังงานมีค่าสูงขึ้นเมื่อใช้เวลาในการเคลือบผิวชิ้นงานที่มากขึ้น โดยชิ้นงานโพรเซสซิ่งที่เคลือบผิวด้วยนิกเกิลเป็นเวลา 30 และ 60 นาที มีค่าการดูดซับพลังงานประมาณ 82.65 kJ/m<sup>3</sup> และ 94.16 kJ/m<sup>3</sup> ตามลำดับ และค่าการดูดซับพลังงานนี้มีแนวโน้มลดลง สำหรับชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนทั้งใน 620 และ 650 องศาเซลเซียสเซลเซียส โดยชิ้นงานโพรเซสซิ่งที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยนิกเกิลเป็นเวลา 30 นาทีและ 60 นาที ที่มีสภาวะของกระบวนการทางความร้อนที่ 620 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที มีค่าการดูดซับพลังงานประมาณ 38.46 kJ/m<sup>3</sup> และ 58.09 kJ/m<sup>3</sup> MPa ตามลำดับ และชิ้นงานที่มีสภาวะของกระบวนการทางความร้อนที่ 650 องศาเซลเซียส มีค่าการดูดซับพลังงานประมาณ 41.47 kJ/m<sup>3</sup> และ 39.57 kJ/m<sup>3</sup> ตามลำดับ ดังภาพที่ 4.19

และเช่นเดียวกัน ชิ้นงานโพรเซสซิ่งที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยนิกเกิลมาแล้วนั้นมีความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่มากขึ้น ซึ่งส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าการดูดซับพลังงาน จึงทำการวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบค่าการดูดซับพลังงานของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการต่างๆ ณ ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่เท่ากันระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี โดยนิยามค่าการดูดซับพลังงานคือพื้นที่ใต้กราฟ คำนวณได้จากสมการที่ 4.8 [8] (ภาคผนวก ข)

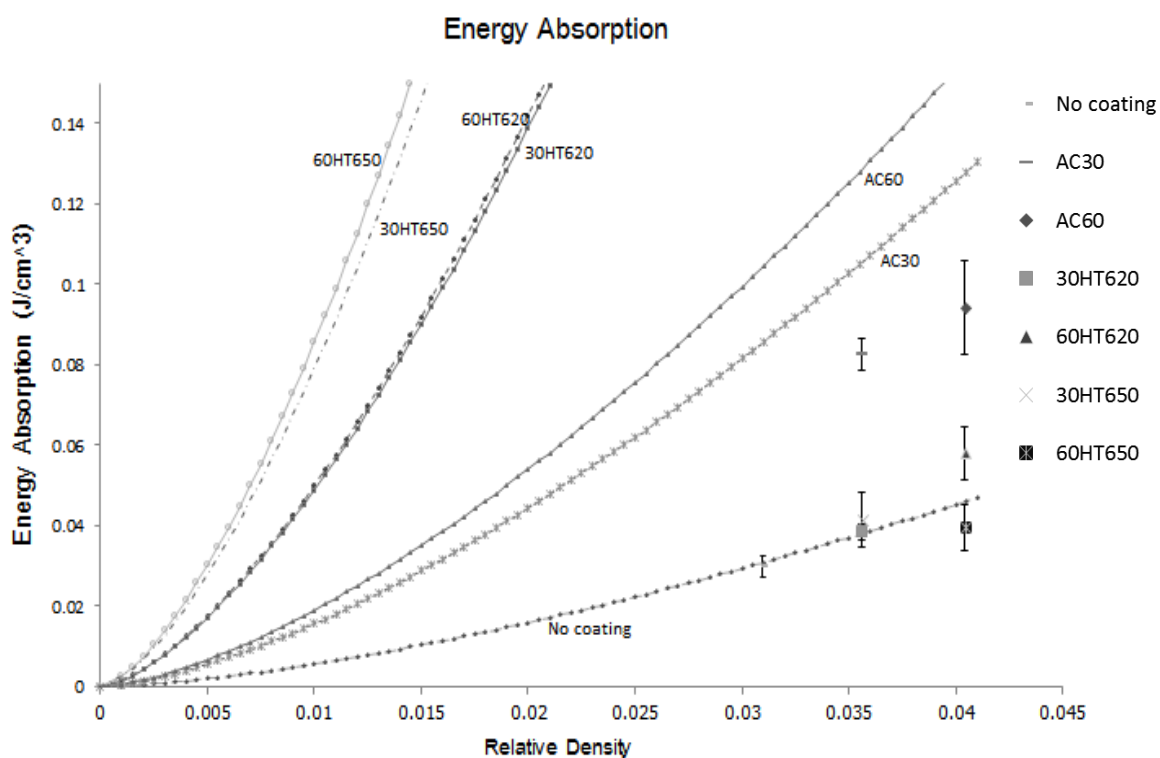




ภาพที่ 4.19 ค่าการดูดซับพลังงานของโฟมอะลูมิเนียมในสถานะของกระบวนการต่างๆ

$$U \approx \sigma_{pl}^* (\epsilon_{max} - 0.5\epsilon_y) \quad (\text{สมการที่ 4.8})$$

U คือค่าการดูดซับพลังงาน ( $J/cm^3$ ),  $\sigma_{pl}^*$  คือค่าความเค้นช่วงพลาโต (MPa) และสมมติว่าความเค้นช่วงพลาโตมีค่าคงที่ โดยคำนวณจากสมการที่ 4.5  $\epsilon_{max}$  คือความเครียดสูงสุดก่อนถึงช่วงการอัดแน่น ซึ่งในงานวิจัยนี้พิจารณาที่ 55%  $\epsilon_y$  คือค่าความเครียด ณ จุดคราก สามารถสร้างเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสัมพัทธ์ และค่าการดูดซับพลังงาน (U) จากการทดลองและการคำนวณทางทฤษฎีของชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมในสถานะของกระบวนการต่างๆ ดังภาพที่ 4.20



ภาพที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสัมพัทธ์และค่าการดูดซับพลังงาน จากการทดลอง และการคำนวณทางทฤษฎี ของชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมในสภาวะของกระบวนการต่างๆ

จากการทดลองสรุปได้ว่า ชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมเมื่อนำไปเคลือบผิวด้วยนิกเกิลโดยการชุบด้วยไฟฟ้า เป็นเวลา 30 โดยการชุบด้วยไฟฟ้าเมื่อเทียบกับโฟมอะลูมิเนียมตั้งต้น ประมาณ 2.75 - 3.14 เท่า แต่หลังจากที่นำโฟมอะลูมิเนียมที่เคลือบผิวด้วยนิกเกิลนี้ไปผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิ 620 และ 650 องศาเซลเซียส พบว่าค่าการดูดซับพลังงานลดต่ำลง แต่ยังคงสูงเมื่อเปรียบเทียบกับกับชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมตั้งต้น อยู่ประมาณ 1.28 - 1.94 เท่า

ตารางที่ 4.8 ค่าการดูดซับพลังงานจากการคำนวณทางทฤษฎีและจากการทดลองของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการต่างๆ [ภาคผนวก ฉ]

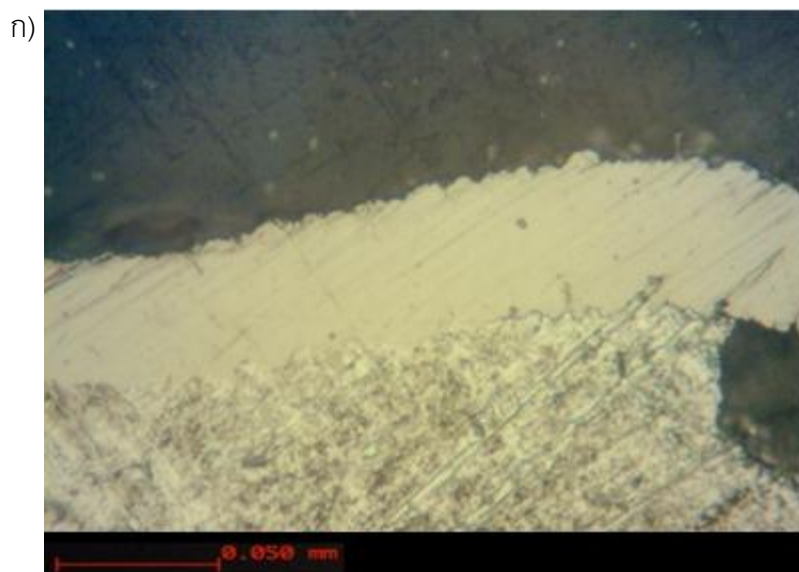
	Relative density, $\rho^*/\rho_s$ (%)	Predicted foam Energy Absorption, U (J/cm <sup>3</sup> )	Experimental foam Energy Absorption, U (J/cm <sup>3</sup> )
No coating	3.10	0.0309	0.030
AC30	3.56	0.1050	0.083
AC60	4.04	0.1560	0.094
30HT620	3.56	0.3358	0.038
60HT620	4.04	0.4002	0.058
30HT650	3.56	0.5512	0.041
60HT650	4.04	0.6486	0.040

จากภาพที่ 4.18 และ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสัมพัทธ์กับค่าความเครียดช่วงพลาโตและค่าการดูดซับพลังงานของชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมในสถานะของกระบวนการต่างๆ เมื่อพิจารณาพบว่าโฟมอะลูมิเนียมที่ทำการเคลือบผิวด้วยนิกเกิลทั้ง 30 และ 60 นาที่มีค่าความเครียดช่วงพลาโตและค่าการดูดซับพลังงานสูงกว่าโฟมอะลูมิเนียมตั้งต้นทั้งจากการเปรียบเทียบโดยผลการทดลองและจากการคำนวณทางทฤษฎีโดยเปรียบเทียบ ณ ความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่เท่ากัน เมื่อพิจารณา ณ ค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ใดๆ จากสมการที่ 4.6 และสมการที่ 4.8 พบว่าค่าความแข็งแรง ณ จุดครากและค่าโมดูลัสในช่วงยืดหยุ่นของวัสดุเนื้อพื้นเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อค่าความเครียดช่วงพลาโตและค่าการดูดซับพลังงานของชิ้นงานโฟม ดังนั้นชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมที่เคลือบผิวด้วยนิกเกิล จะมีแนวโน้มของค่าความแข็งแรง ณ จุดครากและค่าการดูดซับพลังงานของวัสดุเนื้อพื้นที่สูงกว่าค่าของวัสดุอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ ซึ่งเป็นไปตามกฎของการผสม (Rule of mixture) แต่สำหรับโฟมอะลูมิเนียมที่เคลือบผิวด้วยนิกเกิลและผ่านกระบวนการทางความร้อนนั้น ผลการ

ทดลองชี้ว่าค่าความเครียดช่วงพลาโตและค่าการดูดซับพลังงานลดต่ำลง ซึ่งตรงกันข้ามกับค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี แม้ว่าชิ้นงานหลังผ่านกระบวนการทางความร้อนนั้นมีชั้นของสารประกอบเชิงโลหะได้แก่  $Al_3Ni$  และ  $Al_3Ni_2$  เกิดขึ้น เมื่อพิจารณาค่าความแข็งแรง ณ จุดครากของวัสดุเนื้อพื้น ซึ่งเนื้อพื้นคือ Al มีชั้นเคลือบ  $Al_3Ni$ ,  $Al_3Ni_2$  และ Ni จากตารางที่ 4.5 พบว่าค่าความแข็งแรง ณ จุดครากของ  $Al_3Ni$  และ  $Al_3Ni_2$  มีค่าสูงกว่า Al และ Ni ดังนั้นจากการคำนวณตามกฎของการผสมแล้วนั้นควรส่งผลให้ค่าความแข็งแรง ณ จุดครากและค่าโมดูลัสในช่วงยืดหยุ่นของวัสดุเนื้อพื้นเพิ่มสูงขึ้น และค่าความเครียดช่วงพลาโตควรที่จะมีแนวโน้มค่าสูงขึ้นเช่นกัน

ตารางที่ 4.9 ค่าสมบัติทางกลของโฟมอะลูมิเนียมบริสุทธิ์และโฟมอะลูมิเนียม ณ สภาวะของกระบวนการต่างๆ ที่ได้จากรูปความเค้น-ความเครียดจากการทดสอบการรับแรงอัด ดังนั้น ความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield strength) ความเค้นช่วงพลาโต (Plateau stress) และค่าการดูดซับพลังงาน (Energy absorption)

วัสดุ	Yield Strength (MPa)	Plateau Stress (MPa)	Energy Absorption ( $U_{55\%}$ , J/cm <sup>3</sup> )
No coating	0.0230	0.0562	0.0300
AC30	0.0981	0.1396	0.0826
AC60	0.1411	0.1675	0.0941
30HT620	0.0475	0.0728	0.0385
60HT620	0.0899	0.1104	0.0581
30HT650	0.0341	0.0791	0.0415
60HT650	0.0508	0.0690	0.0396



ภาพที่ 4.21 แสดงโครงสร้างจุลภาคของภาคตัดขวางของชิ้นงานโพลีเอทิลีนเหนียวหลังการทดสอบการต้านทานแรงอัด (ก) ชิ้นงานโพลีเอทิลีนเหนียวที่ทำการเคลือบด้วยนิกเกิลโดยการชุบด้วยไฟฟ้า (ข) ชิ้นงานโพลีเอทิลีนเหนียวที่ทำการเคลือบด้วยนิกเกิลโดยการชุบด้วยไฟฟ้าและผ่านกระบวนการทางความร้อน

จากที่ได้กล่าวมาแล้วเมื่อพิจารณาจากภาพที่ 4.22 (ก) แสดงโครงสร้างจุลภาคของภาคตัดขวางของชิ้นงานโคมอะลูมิเนียมที่ทำการเคลือบผิวด้วยนิกเกิลหลังการทดสอบการต้านทานแรงอัด พบว่าชั้นเคลือบนิกเกิลไม่มีการหลุดร่อนจากเนื้อพื้นอะลูมิเนียม แต่สำหรับชิ้นงานโคมอะลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนหลังจากเคลือบผิวด้วยนิกเกิล ดังภาพที่ 4.22 (ข) นั้นมีความเครียดช่วงพลาโตและค่าการดูดซับพลังงานที่ต่ำลงอย่างชัดเจน เนื่องจาก 2 สาเหตุที่เด่นชัด สาเหตุแรกคือสารประกอบ  $Al_3Ni$  และ  $Al_3Ni_2$  ที่เกิดขึ้นนั้นเป็นสารประกอบเชิงโลหะ แม้ว่าจะมีความแข็งแรง ณ จุดครากที่สูง แต่มีความเปราะที่สูง ณ อุณหภูมิห้องด้วยเช่นกัน จึงสามารถรับแรงอัดได้ต่ำ [2] เมื่อชิ้นงานรับแรงอัดส่วนของชั้นสารประกอบ  $Al_3Ni$  ซึ่งอยู่ติดกับเนื้อพื้นอะลูมิเนียม เกิดการแตกขึ้น การแตกที่เกิดขึ้นมีลักษณะแตกแบบผ่านกลางภายในชั้นสารประกอบ สำหรับอีกสาเหตุหนึ่ง ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 4.3 ชิ้นงานหลังจากผ่านกระบวนการทางความร้อน มีการเกิดขึ้นสารประกอบนิกเกิลอะลูมิเนียมในชั้นระหว่างชั้นเคลือบนิกเกิลและเนื้อพื้นอะลูมิเนียม ทำให้เกิดรูพรุนขึ้นทั้งในเนื้อพื้นอะลูมิเนียมบริเวณรอยต่อกับสารประกอบนิกเกิลอะลูมิเนียมและบริเวณภายในชั้นสารประกอบนิกเกิลอะลูมิเนียม ซึ่งรูพรุนที่เกิดขึ้นส่งผลให้บริเวณดังกล่าวเป็นบริเวณที่อ่อนแอและสามารถรับแรงอัดได้ต่ำลง

ความแตกต่างระหว่างค่าจากการคำนวณทางทฤษฎีและค่าจากการทดลองนั้น มาจากการคำนวณทางทฤษฎีนั้นได้นำเพียงตัวแปรหลักมาพิจารณา ซึ่งจากโครงสร้างจุลภาคนั้นมีเพียงเนื้อพื้นอะลูมิเนียม ชั้นสารประกอบเชิงโลหะนิกเกิลอะลูมิเนียม และชั้นเคลือบนิกเกิล แต่ไม่รวมถึงสารประกอบนิกเกิลอะลูมิเนียมที่เกิดในเนื้อพื้นอะลูมิเนียม และจากการคำนวณทางทฤษฎีนั้นกำหนดค่าอัตราส่วนเฉลี่ยโดยปริมาตรของเนื้อพื้นอะลูมิเนียม ชั้นสารประกอบเชิงโลหะ และชั้นเคลือบนิกเกิลไว้ (ภาคผนวก ค) แต่ขณะเดียวกันนั้นในความเป็นจริงจากการทดลอง อัตราส่วนอาจมากกว่าหรือน้อยกว่านี้ในบางบริเวณ นอกจากนี้ยังมีตัวแปรอื่นๆ เช่น Interaction ระหว่างเฟสของสารประกอบกับเนื้อพื้นกับชั้นเคลือบ และรูพรุนที่เกิดขึ้น โดยทั้งหมดนี้ส่งผลต่อความแตกต่างของค่าจากการคำนวณทางทฤษฎีที่ต่างไปจากผลจากการทดลอง [54]

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของตัวแปรในการเคลือบและตัวแปรในกรรมวิธีทางความร้อนต่อโครงสร้างจุลภาคของโพลีอะลูมิเนียมโพรงอากาศแบบเปิด และศึกษาผลของชั้นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างอะลูมิเนียมและนิกเกิลที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของโพลีอะลูมิเนียมต่อสมบัติทางกล ได้แก่ สมบัติการรับแรงอัด สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. ชั้นงานอะลูมิเนียมโพลีตั้งต้นมีความหนาแน่นสัมพัทธ์ 3.10% เมื่อเคลือบผิวโพลีอะลูมิเนียมด้วยนิกเกิลโดยการชุบด้วยไฟฟ้า ที่เวลา 15, 30 และ 60 นาที มีความหนาแน่นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นเป็น 3.48%, 3.56% และ 4.04% ตามลำดับ

2. ชั้นงานที่ทำการเคลือบผิวด้วยนิกเกิลและนำไปผ่านกระบวนการทางความร้อนที่ 620 และ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที เมื่อวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคแล้วพบว่าเกิดชั้นสารประกอบนิกเกิลอะลูมิเนียมในชั้นระหว่างเนื้อพื้นอะลูมิเนียมและชั้นเคลือบนิกเกิล

- ชั้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนที่ 620 องศาเซลเซียส พบเพียงชั้นสารประกอบ  $Al_3Ni_2$  ระหว่างชั้นเคลือบนิกเกิลและเนื้อพื้นอะลูมิเนียม สำหรับกระบวนการทางความร้อนที่ 650 องศาเซลเซียส พบชั้นสารประกอบ  $Al_3Ni$  และ  $Al_3Ni_2$  โดยชั้น  $Al_3Ni_2$  มีสีเทาเข้ม เกิดติดกับชั้นเคลือบนิกเกิล และ  $Al_3Ni$  มีสีเทาอ่อน เกิดติดกับเนื้อพื้นอะลูมิเนียม

3. สารประกอบ  $Al_3Ni$  และ  $Al_3Ni_2$  มีค่าความแข็งประมาณ 996 HV และ 1320 HV ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นประมาณ 182 GPa และ 206 GPa ค่าความแข็งแรง ณ จุดครากประมาณ 900 และ 1190 MPa ตามลำดับ

4. การทดสอบสมบัติการรับแรงอัด

- จากการทดสอบสมบัติการรับแรงอัดของชิ้นงานโพลีอะลูมิเนียมตั้งต้น มีค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield stress) ความเค้นช่วงพลาโต (Plateau stress) และค่าการดูดซับพลังงาน (Energy absorption) คือ 0.023, 0.056 และ 30.00 MPa ตามลำดับ

- ชิ้นงานที่เคลือบผิวด้วยนิกเกิลที่เวลา 30 และ 60 นาที มีแนวโน้มของความแข็งแรงการรับแรงอัดที่สูงขึ้น โดยแปรผันตามความหนาแน่นสัมพัทธ์ กล่าวคือเพิ่มตามเวลาในการเคลือบที่นานขึ้น ซึ่งเพิ่มขึ้นประมาณ 2.5 - 3 เท่า

- ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนที่ 620 และ 650 องศาเซลเซียสหลังจากเคลือบผิวด้วยนิกเกิล มีแนวโน้มของความแข็งแรงการรับแรงอัดที่ต่ำลง

- ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนที่ 620 และ 650 องศาเซลเซียส มีความแข็งแรงการรับแรงอัดที่ต่ำลง แต่ยังคงมีค่าสูงกว่าความแข็งแรงการรับแรงอัดของชิ้นงานโพลีอะลูมิเนียมตั้งต้นประมาณ 1.2 - 2 เท่า

5. สาเหตุที่ทำให้ความแข็งแรงการรับแรงอัดของชิ้นงานโพลีลดต่ำลงหลังจากผ่านกระบวนการทางความร้อน คือ รุพุนที่เนื้อพื้นอะลูมิเนียมบริเวณรอยต่อกับชั้นสารประกอบ และบริเวณภายในชั้นสารประกอบนิกเกิลอะลูมิเนียมไนด์ ซึ่งเกิดจากการขยายตัวของอะลูมิเนียมที่เกิดการหลอมเหลวและหดตัวหลังจากชิ้นงานเย็นตัวลง อีกสาเหตุหนึ่งคืออัตราการแพร่ที่ไม่เท่ากันของ Al และ Ni ทำให้เกิดเป็นรุพุนระดับไมโคร ซึ่งรุพุนดังที่กล่าวมานี้เป็นจุดเริ่มต้นของความเสียหายซึ่งเกิดต่อกันไปในทิศทางขนานกับรอยต่อระหว่างเนื้อพื้นอะลูมิเนียมและชั้นสารประกอบที่เกิดขึ้น

### ข้อเสนอแนะ

1. จากการทดลอง ขณะการทำกรเคลือบผิวชิ้นงานโดยการชุบด้วยไฟฟ้า นั้น มีฟองแก๊สไฮโดรเจนขึ้น ซึ่งอาจมีผลทำให้เกิดรุพุนในชั้นเคลือบ อาจทำ Gas release เพื่อลดจุดบกพร่อง (Defect) ภายในชั้นเคลือบ ก่อนนำมาผ่านกระบวนการทางความร้อน (Heat treatment)

2. ควรควบคุมการกวนสารละลายขณะเคลือบผิวชิ้นงาน เนื่องจากมีฟองแก๊สไฮโดรเจนเกิดขึ้น เพื่อลดรุพุนในชั้นเคลือบ

3. ลดอุณหภูมิและเพิ่มเวลาในการทำ Heat treatment เพื่อลด Defect ที่เกิดจากการหดตัวของเนื้อพื้นอะลูมิเนียมบางส่วน (Shrinkage)



4. น่าสนใจที่จะศึกษาการแพร่ของอะลูมิเนียมภายหลังจากการเกิดสารประกอบเชิงโลหะ บริเวณรอยต่อระหว่างเนื้อพื้นอะลูมิเนียมและชั้นเคลือบนิกเกิล

5. ควรเพิ่มจำนวนขั้วแอโนด (แผ่นแพลทินัม) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเคลือบผิว เนื่องจากชิ้นงานโพนันมีความซับซ้อน ทำให้บริเวณใจกลางชิ้นงานมีความหนาชั้นเคลือบที่น้อยกว่าบริเวณภายนอกชิ้นงาน

## รายการอ้างอิง

- [1] Corp., E.M.a.A. Materials and Applications guide [Online]. 2011; Available from : <http://www.ergaerospace.com/index.html> [2012,Nov 22]
- [2] Gibson, L.J. and M. F.Ashby. Cellular solids : structure and properties. 2<sup>nd</sup> edition. Cambridge Solid State Science Series ,1997.
- [3] M.F. Ashby, A.E., N.A. Fleck, L.J. Gibson, J.W. Hutchinson and H.N.G. Wadley. Metal Foams : A Design Guide : Butterworth Heinemann, Boston, MA, 2000.
- [4] Simancík, F. Metallic foams – ultra light materials for structural applications : INZYNIERIA MATERIALOWA, 5(2001) : 823-828.
- [5] Shim, C., et al. Mitigation of Blast Effects on Protective Structures by Aluminum Foam Panels. Metals (2012) : 170-177.
- [6] Mordechay Schlesinger, M.P. Modern Electroplating. 4<sup>th</sup> edition. United states of America : Wiley-Interscience, 2000.
- [7] Anne Jung, H.N., Stefan Diebels, Erhardt Lach and Rolf Hempelmann. Nanonickel Coated Aluminum Foam for Enhanced Impact Energy Absorption. Advanced Engineering Materials 13 (2011) 23-28.
- [8] Boonyongmaneerat, Y., C.A. Schuh, and D.C. Dunand. Mechanical properties of reticulated aluminum foams with electrodeposited Ni-W coatings. Scripta Materialia 59 (2008) : 336-339.
- [9] Bouwhuis, B.A., et al. Mechanical properties of hybrid nanocrystalline metal foams. Acta Materialia 57 (2009) : 4046-4053.
- [10] Azzi, W.E. A Systematics study in the mechanical and thermal properties of open cell metal foams for aerospace applications. Mechanical engineering (2004) : 114.
- [11] Lee, H., S. Lee, and K. Ko. Annealing effects on the intermetallic compound formation of cold sprayed Ni, Al coatings. Journal of Materials Processing Technology 209 (2009) : 937-943.

- [12] Joseph R. Davis. Properties and selection : Non-ferrous Alloys and Special-purpose materials. The Materials Information Company : ASM Handbook Vol.2,1990.
- [13] Garbala, K. and A. Patejuk. Defects of Al-Ni joints caused by Kirkendall – Frenkel effect. Archives of foundry engineering 10 (2010): 455-458.
- [14] Morsi, K. Review : reaction synthesis processing of Ni–Al intermetallic materials. Materials Science and Engineering 299 (2001) : 1-15.
- [15] Polmear, I.J. Light alloys: metallurgy of the light metals 3<sup>rd</sup> edition. New York : E. Arnold, London, 1995.
- [16] Hatch, J.E. Aluminium : Properties and physical metallurgy 10<sup>th</sup> edition : Aluminum Association, American Society for Metals, 2004.
- [17] Vargel, C. Corrosion of aluminium 1<sup>st</sup> edition. United Kingdom : Advanced Technology,
- [18] Kuhn, Howard; Medlin, Dana. Mechanical Testing and Evaluation Vol. 8 : ASM International, 2000.
- [19] ผศ.ดร.เสกศักดิ์ อัสวะวิสิทธิ์ชัย. เอกสารประกอบการสอนวิชา Cellular Materials. ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.
- [20] Banhart, J. Manufacture characterisation and application of cellular metals and metal foams. Materials Science 46 (2001) : 559–632.
- [21] Ashby, M.F., et al. Metal Foams : A Design Guide : Butterworth Heinemann, 2000.
- [22] Standard Terminology Relating to Electroplating. West ConshohockenPA : ASTM International, 2003.
- [23] Almajali, M., et al. Mechanical properties of copper-coated carbon foams. Carbon 48 (2010) : 1604-1608.
- [24] Abdulla, T., A. Yerokhin, and R. Goodall. Effect of Plasma Electrolytic Oxidation coating on the specific strength of open-cell aluminium foams. Materials and Design 32 (2011) : 3742-3749.
- [25] Glenn O. Mallory, J.B.H. Electroless plating : fundamentals and applications. New York : American Electroplaters and Surface Finishers Society, 1990.

- [26] Kenneth Holmberg, A.M. Coating Tribology 2<sup>nd</sup> edition. Amsterdam, The Netherlands : Properties, Techniques and Applications in surface engineering, 1998.
- [27] สารานุกรมการเคลือบผิว [Online]. 2011. Available from : <http://en.wikipedia.org/wiki/Coating> [2012,Nov 24]
- [28] Kanani, N. Electroplating: Basic Principles, Processes and Practice 1<sup>st</sup> edition : Advanced Technology, 2005.
- [29] สารานุกรมการเคลือบผิวแบบใช้กระแสไฟฟ้า [Online]. 2011. Available from : <http://en.wikipedia.org/wiki/Electroplating> [2012,Nov 24]
- [30] อนันต์ ทองมอญ. ชุบโลหะด้วยไฟฟ้า. กรุงเทพมหานคร : สำนักพัฒนาอุตสาหกรรมสนับสนุน, 2554.
- [31] สารานุกรมซิงก์เคท [Online]. 2011. Available from : <http://en.wikipedia.org/wiki/Zincate> [2012,Nov 24]
- [32] A. Jung, H.N., R. Hempelmann and E. Lach. Nano nickel strengthened open cell metal foams under quasistatic and dynamic loading. DYMAT International Conferences (2009) : 717-723.
- [33] T. B. Massalski, H.O. Binary alloy phase diagrams. Materials Park 1-3 (1990).
- [34] Assistant prof. Batalu Dan, p.C.m.a.G. and prof. Aloman Angel. Critical Analysis of Al-Ni Phase Diagrams. Metalurgia International 11 (2006) : 36-45.
- [35] The Institute of Materials, Minerals and Mining. Aluminium and Aluminium Alloys : Heat Treatment of Aluminium and Aluminium. Alloys. Materials World 12(2004) : 37-38.
- [36] Bari, G.D. ASM Handbook, Volume 5, Surface Engineering. Materials Park : ASM International, 1994.
- [37] อมฤตา อิศริยภัทร์, ภาณุ แสงศักดิ์ และคณะ. ผลของเวลาและอุณหภูมิต่อโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมบริสุทธิ์เคลือบด้วยนิกเกิล. วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.

- [38] Lee, H., et al. Mechanical matching and microstructural evolution at the coating/substrate interfaces of cold-sprayed Ni, Al coatings. Journal of Alloys and Compounds 478 (2009) : 636-641.
- [39] Voudouris, N., C. Christoglou, and G.N. Angelopoulos. Formation of aluminide coatings on nickel by a fluidised bed CVD process. Surface and Coatings Technology 141 (2001) : 275-282.
- [40] Brossard, J.M., et al. Modelling of aluminized coating growth on nickel. Acta Materialia 55 (2007) : 6586-6595.
- [41] Brossard, J.M., et al., High-Temperature Oxidation of an Aluminized NiCr Alloy formed by a Magnetron-Sputtered Al Diffusion Coating. Oxidation of Metals 64 (2005) : 43-61.
- [42] Janssen MMP, R.G. Reaction Diffusion and Kirkendall Effect in the Nickel-Aluminum Trans Met Soc AIME (1967) : 1372.
- [43] Gasparyan, A.G. and A.S. Shteinberg. Macrokinetics of reaction and thermal explosion in Ni and Al powder mixtures. Combustion, Explosion, and Shock Waves 24 (1988) : 324-330.
- [44] Liu, Joyce C., Mayer, J. W. and Barbour, J.C. Phase formation of NiAl<sub>3</sub> on lateral diffusion couples. Apply Physics (1988) : 654-656.
- [45] Donga, H.X., et al. Formation of porous Ni–Al intermetallics through pressureless reaction synthesis. Journal of Alloys and Compounds 484 (2009) : 907–913.
- [46] V.H. Garcia, P.M. Mors, C. Scherer. Kinetics of phase formation in binary thin films: the Ni/Al case. Acta Mater 48 (2000) :1201.
- [47] Ootoshi Y, F.K., Horita Z, Nemoto N. Formation of Ni<sub>5</sub>Al<sub>3</sub> Phase in Ni<sub>3</sub>Al/NiAl Diffusion Couples. Materials Transactions 39 (1998) : 225-229.
- [48] Susan DF. Ni-Al composite coatings: diffusion analysis and coating lifetime estimation. Acta Materialia 49 (2001) : 1153-1163.

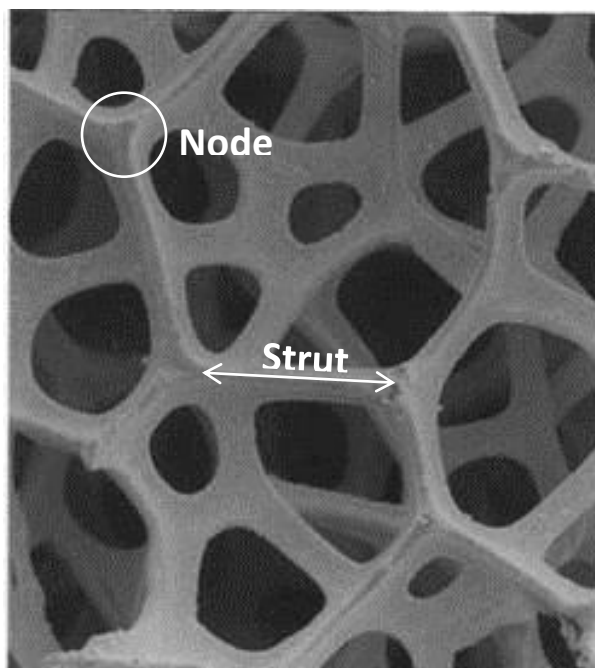
- [49] Issariyapat, A., et al. Effects of Heat Treatment on the Interfacial Structure of Nickel-Aluminum Coating Composites. Advanced Materials Research 154-155 (2010) : 1462-1467.
- [50] Dieter M. Herlach, D.M.M. Solidification of Containerless Undercooled Melts. USA : Wiley, 2012.
- [51] Dong, S., et al. Synthesis of intermetallic NiAl by SHS reaction using coarse-grained nickel and ultrafine-grained aluminum produced by wire electrical explosion. Intermetallics 10(2002) : 217-223.
- [52] Dunand, D.C. Reactive synthesis of aluminide intermetallics. Materials and Manufacturing Processes 10 (1995) : 373-403.
- [53] Choe, H. and D.C. Dunand. Synthesis, structure, and mechanical properties of Ni-Al and Ni-Cr-Al superalloy foams. Acta Materialia 52 (2004) : 1283-1295.
- [54] Vendra, L. and A. Rabiei. Evaluation of modulus of elasticity of composite metal foams by experimental and numerical techniques. Materials Science and Engineering 527 (2010) : 1784-1790.
- [55] C.J. S. Smithells metals reference book 8<sup>th</sup> edition. Boston, MA : Oxford, 1992.
- [56] Zhang, Z., et al. Synthesis of nanocrystalline aluminum matrix composites reinforced with in situ devitrified Al-Ni-La amorphous particles. Scripta Materialia 54 (2006) : 869-874.
- [57] Ke, L., et al. Al-Ni intermetallic composites produced in situ by friction stir processing. Journal of Alloys and Compounds 503 (2010) : 494-499.
- [58] Naiborodenko, Y.S., et al. Phases and reactive-diffusion kinetics for mixed Al-Ni powders. Russian Physics Journal 16 (1973) : 1507-1511.

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

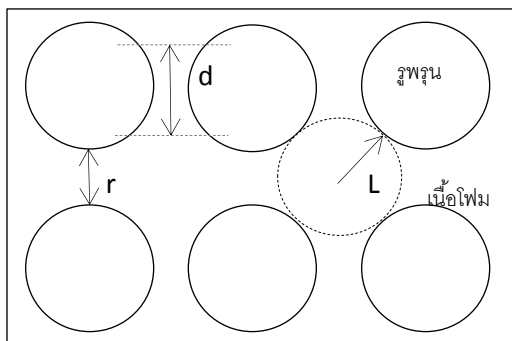
วิธีการหาพื้นที่ผิวของชิ้นงานโฟม

$$\frac{\text{Surface Area}}{V_s} = \frac{8\pi r d + 2L^2 + 8rL - 4\pi r^2}{4\pi r^2 d + 2L^2 r} \cdot \rho_{rel} \quad (\text{ก.1})$$



ภาพที่ ก.1 ภาพโครงสร้างโฟมอะลูมิเนียม





ภาพที่ ก.2 ภาพจำลองโครงสร้างโฟมอะลูมิเนียม

$d$  (ระยะห่างระหว่าง strut) = 1.326 mm,  $r$  (รัศมีของ strut) = 0.2727 mm และ  $L$  (รัศมีของ node) = 0.954 mm แทนค่าลงในสมการที่ ก.1

$$\text{Surface Area} = (69.46 \rho_{\text{rel}}) V_s$$

\*ค่า  $\rho_{\text{rel}}$  และ  $V_s$  ได้จากค่าตามตารางที่ ข.1

ดังนั้น Surface area = 1.97 cm<sup>3</sup>/หน่วยปริมาตร

## ภาคผนวก ข

### การหาความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานโฟม

การหาความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานโฟม สามารถคำนวณได้ตามสมการ 2.2 [3]

$$\rho_{\text{rel}} = \frac{\rho_f}{\rho_s} = \frac{V_f}{V_s} \quad (2.2)$$

$\rho_{\text{rel}}$  คือความหนาแน่นสัมพัทธ์,  $\rho_f$  และ  $V_f$  คือความหนาแน่นและปริมาตรของชิ้นงานโฟม และ  $\rho_s$  และ  $V_s$  คือความหนาแน่นของวัสดุเนื้อพื้นและปริมาตรตามขนาดของชิ้นงานโฟม โดย

$$V_f = \frac{m_{\text{Al foam}}}{\rho_s} \quad (ข.1)$$

$m_{\text{Al foam}}$  คือน้ำหนักของชิ้นงานโฟม (กรัม)

### 1) ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของโฟมอะลูมิเนียมโพรงอากาศแบบเปิด (ในงานวิจัยนี้)

ตารางที่ ข.1 แสดงการคำนวณความหนาแน่นสัมพัทธ์ของโฟมอะลูมิเนียมตั้งต้น

น้ำหนักเฉลี่ย ของโฟม อะลูมิเนียม (m)	ปริมาตรเฉลี่ย ของชิ้นงานโฟม $(V_f = \frac{m}{\rho_s})$	ปริมาตรเฉลี่ยตาม ขนาดของโฟม อะลูมิเนียม $(V_s, \text{cm}^3)$	ความหนาแน่น สัมพัทธ์เฉลี่ยของโฟม อะลูมิเนียม $\rho_{\text{rel}} = \frac{V_f}{V_s}$
0.920	0.341	11.206	0.0310

\*  $\rho_s(\text{Al}) = 2.7 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ ,  $\rho_s(\text{Ni}) = 8.9 \text{ (g/cm}^3\text{)}$

2) ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของโฟมอะลูมิเนียมโพรงอากาศแบบเปิดที่เคลือบผิวด้วยนิกเกิล (ในงานวิจัยนี้)

คำนวณความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมที่เคลือบผิวด้วยนิกเกิล ได้ตั้งสมการที่ 2.2 ซึ่งค่า  $\rho_{\text{foam}}$  และ  $\rho_s$  สามารถหาได้ดังนี้

$$\rho_{\text{foam}} = \frac{\text{นน.โฟมหลังเคลือบผิว}}{\text{ปริมาตรตามขนาดของชิ้นงานโฟม}} \quad (\text{ข.2})$$

คำนวณหาค่าความหนาแน่นของวัสดุเนื้อพื้นแบบผสมโดยใช้กฎการผสม (Rule of mixture)

$$\rho_s = \frac{(\text{Al volume ratio} \times 2.7) + (\text{Ni volume ratio} \times 8.9)}{v_s} \quad (\text{ข.3})$$

ตารางที่ ข.2 แสดงการคำนวณความหนาแน่นของชิ้นงานโฟม

	นน.โฟมหลังเคลือบผิว (กรัม)	ปริมาตรตามขนาดของ ชิ้นงาน (cm <sup>3</sup> )	$\rho_{\text{foam}}$
As-coated 30 min.	1.209	9.633	0.154
As-coated 60 min.	1.987		0.196

ตารางที่ ข.3 แสดงการคำนวณความหนาแน่นของวัสดุเนื้อพื้นแบบผสม

	Volume (Al)	Volume (Ni)	Al volume ratio $= \frac{\text{Volume}_{\text{Al}}}{\text{Volume}_{\text{Al}} + \text{Volume}_{\text{Ni}}}$	Ni volume ratio = $\frac{\text{Volume}_{\text{Ni}}}{\text{Volume}_{\text{Al}} + \text{Volume}_{\text{Ni}}}$	$\rho_s$
As-coated 30 min.	0.207	0.073	0.741	0.264	4.318
As-coated 60 min.	0.264	0.143	0.645	0.356	4.900

จากการคำนวณดังที่กล่าวมาสรุปว่า

$$\rho_{\text{rel}}(\text{Al foam}) = 0.0310$$

$$\rho_{\text{rel}}(\text{As-coated 30 min}) = 0.0356$$

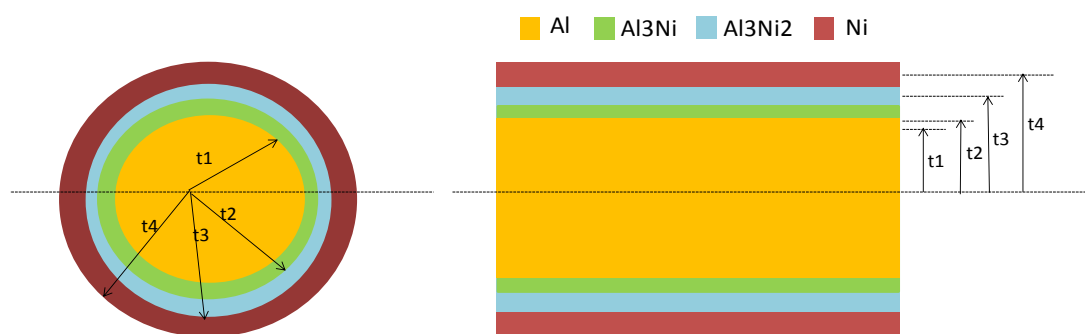
$$\rho_{\text{rel}}(\text{As-coated 60 min}) = 0.0404$$

\* สำหรับชิ้นงานโฟมอะลูมิเนียมที่ทำการเคลือบผิวด้วยนิกเกิลและผ่านกระบวนการทางความร้อนหาความหนาแน่นสัมพัทธ์โดยหลักอาร์คิมิดีส

### ภาคผนวก ค

#### วิธีการหาอัตราส่วนเนื้อพื้นอะลูมิเนียม ชั้นเคลือบนิเกิล และชั้นสารประกอบนิเกิลอะลูมิเนียม

สมมติว่าหน้าตัดของก้านโคมอะลูมิเนียมเป็นวงกลม,  $t_1$  คือรัศมีของพื้นที่หน้าตัดเนื้อพื้นอะลูมิเนียม,  $t_2$  คือรัศมีรวมของพื้นที่หน้าตัดเนื้อพื้นอะลูมิเนียมและชั้น  $Al_3Ni$ ,  $t_3$  คือรัศมีรวมของพื้นที่หน้าตัดเนื้อพื้นอะลูมิเนียม ชั้น  $Al_3Ni$  และชั้น  $Al_3Ni_2$  และ  $t_4$  คือรัศมีรวมของพื้นที่หน้าตัดเนื้อพื้นอะลูมิเนียม ชั้น  $Al_3Ni$  ชั้น  $Al_3Ni_2$  และชั้นเคลือบนิเกิล



ภาพที่ ค.1 ภาพจำลองโครงสร้างจุลภาคภาคตัดขวาง

ตารางที่ ค.1 แสดงรัศมีของก้านโคมอะลูมิเนียมตั้งต้น ความหนาของชั้นสารประกอบและชั้นเคลือบนิเกิล

ชิ้นงาน	Al ( $\mu\text{m}$ )	$Al_3Ni$ ( $\mu\text{m}$ )	$Al_3Ni_2$ ( $\mu\text{m}$ )	Ni ( $\mu\text{m}$ )
No coating	136.35	0	0	0
AC30	136.35	0	0	52
AC60	136.35	0	0	87

ตารางที่ ค.1 แสดงรัศมีของก้านไฟมอะลูมิเนียมตั้งต้น ความหนาของชั้นสารประกอบและชั้นเคลือบ  
นิกเกิล (ต่อ)

30HT620	104.885	0	17.250	40.980
60HT620	105.112	0	17.859	67.068
30HT650	107.507	14.665	43.959	41.467
60HT650	103.651	10.718	48.931	66.137

ตารางที่ ค.2 แสดงอัตราส่วนพื้นที่ของแต่ละเฟส

ชิ้นงาน	ชื่อพื้นที่	พื้นที่	อัตราส่วนพื้นที่
No coating	Al	0.058	1
	Al <sub>3</sub> Ni	0	0
	Al <sub>3</sub> Ni <sub>2</sub>	0	0
	Ni	0	0
AC30	Al	0.058	0.524
	Al <sub>3</sub> Ni	0	0
	Al <sub>3</sub> Ni <sub>2</sub>	0	0
	Ni	0.053	0.476

ตารางที่ ค.2 แสดงอัตราส่วนพื้นที่ของแต่ละเฟส (ต่อ)

AC60	Al	0.058	0.373
	Al <sub>3</sub> Ni	0	0
	Al <sub>3</sub> Ni <sub>2</sub>	0	0
	Ni	0.098	0.627
30HT620	Al	0.035	0.413
	Al <sub>3</sub> Ni	0	0
	Al <sub>3</sub> Ni <sub>2</sub>	0.012	0.147
	Ni	0.037	0.439
60HT620	Al	0.0347	0.306
	Al <sub>3</sub> Ni	0	0
	Al <sub>3</sub> Ni <sub>2</sub>	0.013	0.113
	Ni	0.066	0.581
30HT650	Al	0.036	0.268
	Al <sub>3</sub> Ni	0.011	0.078
	Al <sub>3</sub> Ni <sub>2</sub>	0.040	0.294
	Ni	0.049	0.360

ตารางที่ ค.2 แสดงอัตราส่วนพื้นที่ของแต่ละเฟส (ต่อ)

60HT650	Al	0.034	0.204
	Al <sub>3</sub> Ni	0.007	0.044
	Al <sub>3</sub> Ni <sub>2</sub>	0.042	0.258
	Ni	0.082	0.493

\*สมมติให้อัตราส่วนโดยพื้นที่เท่ากับอัตราส่วนโดยปริมาตร



## ภาคผนวก ง

ตารางที่ ง.1 สมบัติทางกลของ Aluminium, Nickel, Al<sub>3</sub>Ni และ Al<sub>3</sub>Ni<sub>2</sub>

ชนิดของสารประกอบ	Mechanical Properties				อ้างอิง
	H <sub>IT</sub> (Hardness of Indentation, GPa)	HV (Vickers Hardness, HV)	E <sub>IT</sub> (Elastic of Indentation, GPa)	Yield strength, $\sigma$ (MPa)	
Aluminium	-	≈ 15 -19	-	20-25	[55]
	-	19-44	69	30	[12]
	0.41	38.04	67.25	34.35	ในงานวิจัยนี้
Nickel	-	114	204	148	*Commercially pure wrought nickel [12]
		130 - 200	-	-	[36]
	3.19	295.10	232.05	265.45	ในงานวิจัยนี้
Al <sub>3</sub> Ni	-	766.9±38.5HV	-	-	17
	11.33	-	200	-	[56]
	-	841	-	-	[57]
	10.75	995.59	182.03	895.83	ในงานวิจัยนี้
Al <sub>3</sub> Ni <sub>2</sub>	-	1283	-	-	[57]
	-	1142	-	-	[58]
	14.25	1319.63	205.78	1187.44	ในงานวิจัยนี้

## ภาคผนวก จ

คำนวณค่าทางทฤษฎีและสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสัมพัทธ์และค่าความเครียดช่วงพลาโต

จากสมการที่ 4.5 และ ค่า  $C = 0.3$  ได้สมการดังนี้

$$\sigma_{pl}^* \approx 0.3 \sigma_{ys} \left( \frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{\frac{3}{2}}$$

ในการคำนวณค่าความเค้นช่วงพลาโต ตั้งสมมติฐานว่า

- การเคลือบผิวชิ้นงานโพลีอะลูมิเนียมด้วยนิกเกิลโดยการชุบด้วยไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ มีความหนาของชั้นเคลือบที่เท่ากัน โดยชิ้นงานที่ใช้เวลาเคลือบ 30 นาที มีความหนาชั้นเคลือบ 52 ไมครอน และชิ้นงานที่ใช้เวลาเคลือบ 60 นาที มีความหนาชั้นเคลือบ 87 ไมครอน
- ในทางทฤษฎีนั้นสมมติฐานของโมเดลว่าเป็น perfect elasticity และไม่มีพิจารณาถึง plastic deformation ของเนื้อพื้น ชั้นสารประกอบเชิงโลหะ และชั้นเคลือบนิกเกิลขณะเริ่มต้นให้โหลด
- พิจารณาเพียงตัวแปรหลักซึ่งมีเพียงเนื้อพื้นอะลูมิเนียม ชั้นสารประกอบเชิงโลหะ และชั้นเคลือบนิกเกิล โดยไม่ได้พิจารณาถึงตัวแปรย่อยอื่นๆเช่น Interaction ระหว่างชั้นแต่ละชั้น และไม่พิจารณาถึงรูพรุนที่เกิดขึ้นภายใน
- คำนวณค่าความแข็งแรง ณ จุดครากของชิ้นงานบัลก์ ( $\sigma_y$ ) โดยใช้กฎการผสม (Rule of mixture)

$$\begin{aligned} \sigma_{ys} = & (\text{Al}(\% \text{vol}) * \sigma_{ys(\text{Al})}) + (\text{Ni}(\% \text{vol}) * \sigma_{ys(\text{Ni})}) + \\ & (\text{Al}_3\text{Ni}(\% \text{vol}) * \sigma_{ys(\text{Al}_3\text{Ni})}) + (\text{Al}_3\text{Ni}_2(\% \text{vol}) * \sigma_{ys(\text{Al}_3\text{Ni}_2)}) \end{aligned} \quad (จ.1)$$

ตารางที่ ๑.1 แสดงค่าความแข็งแรง ณ จุดครากของชิ้นงานโฟมที่ผ่านกระบวนการต่างๆ ซึ่งได้จากการคำนวณโดยใช้กฎการผสม

Estimated bulk Yield stress, $\sigma_{ys}$ (MPa)	
$\sigma_{ys}$ (No coating Al foam)	34.45
$\sigma_{ys}$ (AC30)	95.38
$\sigma_{ys}$ (AC60)	116.38
$\sigma_{ys}$ (30HT620)	305.60
$\sigma_{ys}$ (60HT620)	298.74
$\sigma_{ys}$ (30HT650)	523.87
$\sigma_{ys}$ (60HT650)	484.23

\*สามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative density,  $\frac{\rho^*}{\rho_s}$ ) และค่าความเค้นช่วงพลาโต (Plateau Stress,  $\sigma_{pl}^*$ ) ดังภาพที่ 4.18

### ภาคผนวก จ

#### คำนวณค่าทางทฤษฎีและสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสัมพัทธ์และค่าการดูดซับพลังงาน

คำนวณค่าการดูดซับพลังงาน ดังสมการที่ จ.1 [8] ซึ่งเป็นที่ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ได้จากการทดสอบแรงอัด แสดงดังภาพ 2.3

$$U \approx \sigma_{pl}^*(\epsilon_{max} - 0.5\epsilon_y) \quad (จ.1)$$

$U$  คือค่าการดูดซับพลังงาน ( $J/cm^3$ ),  $\sigma_{pl}^*$  คือค่าความเค้นช่วงพลาโต (MPa) และสมมติว่าความเค้นในช่วงพลาโตมีค่าคงที่ โดยคำนวณจากสมการที่ 4.5  $\epsilon_{max}$  คือค่าความเครียดสูงสุดก่อนถึงช่วงการอัดแน่น ซึ่งในงานวิจัยนี้พิจารณาที่ 55%  $\epsilon_y$  คือค่าความเครียด ณ จุดคราก สำหรับค่าความเครียด ณ จุดครากคำนวณจาก

$$\epsilon_y = \frac{\sigma_{pl}^*}{E^*} \quad (จ.2)$$

$E^*$  คือค่าโมดูลัสในช่วงยืดหยุ่น (Elastic Modulus, GPa) คำนวณได้จากสมการที่ จ.3 ดังนี้

$$\frac{E^*}{E_s} \approx C\left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^2 \quad (จ.3)$$

ค่า  $C = 0.3$  และค่า  $E_s$  หรือ  $E_{\text{composite bulk}}$  คำนวณโดยใช้ Scaling law ดังสมการ จ.4 และ จ.5 [54]

เพื่อหาค่า  $E^*$  หรือ  $E_{\text{composite foam}}$  จากนั้นสามารถหาค่า  $E_s$  ได้เนื่องจากทราบค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ดังตารางที่ จ.1

#### Upper Bound

$$E_{\text{composition foam}} = [Al (\%vol)*E_{Al}] + [Ni(\%vol)*E_{Ni}] + [Al_3Ni(\%vol)*E_{Al_3Ni}] + [Al_3Ni_2(\%vol)*E_{Al_3Ni_2}] \quad (จ.4)$$

Lower Bound

$$E_{\text{composition foam}} = \left[ \frac{\text{Al}(\% \text{vol})}{E_{\text{Al}}} + \frac{\text{Ni}(\% \text{vol})}{E_{\text{Ni}}} + \frac{\text{Al}_3\text{Ni}(\% \text{vol})}{E_{\text{Al}_3\text{Ni}}} + \frac{\text{Al}_3\text{Ni}_2(\% \text{vol})}{E_{\text{Al}_3\text{Ni}_2}} \right]^{-1} \quad (2.5)$$

ตารางที่ ๓.1 แสดงค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานโฟมที่ผ่านกระบวนการต่างๆ

	Relative density, $\frac{\rho^*}{\rho_s}$ (%)	Estimated foam Elastic Modulus, $E^*$ (GPa) หรือ $E_{\text{composite foam}}$	Estimated bulk Elastic Modulus, $E_s$ (GPa) หรือ $E_{\text{composite bulk}}$
No coating Al foam	3.10	0.054	62.250
AC30	3.56	0.073	57.776
AC60	4.04	0.085	51.869
30HT620	3.56	0.132	104.246
60HT620	4.04	0.175	107.034
30HT650	3.56	0.201	158.244
60HT650	4.04	0.271	165.824

\*เมื่อหาค่า  $E_s$  หรือ  $E_{\text{composite bulk}}$  ได้แล้ว จากนั้นสามารถคำนวณและสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสัมพัทธ์และค่าการดูดซับพลังงานได้ ดังกราฟที่ 4.21

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวอมฤดา อิศริยภัทร์ เกิดวันอังคารที่ 11 สิงหาคม พ.ศ. 2530 ที่โรงพยาบาลยะลา จ.ยะลา จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้น ที่โรงเรียนคณะราษฎรบำรุง จังหวัดยะลา จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย ที่โรงเรียนเตรียมอุดมศึกษา จบการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต เกียรตินิยมอันดับสอง สาขาวิศวกรรมโลหการและวัสดุ จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2552 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ในสาขาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2553