



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการสังเคราะห์ฟิล์มไทเทเนียมคาร์ไบด์
บนโลหะผสมไทเทเนียม

โดย จัทรดนัย บุญเรือง

กรกฎาคม 2552

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการสังเคราะห์ฟิล์มไทเทเนียมคาร์ไบด์
บนโลหะผสมไทเทเนียม

อ.ดร. จักรกฤษณ์ บุญเรือง
ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ มีความคิดริเริ่มที่จะพัฒนาเทคนิคแบบใหม่ในการเคลือบผิววัสดุ ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ใช้ต้นทุนต่ำ ใช้ระบบที่ไม่ยุ่งยาก ใช้พลังงานต่ำ และไม่ก่อมลพิษ แต่ให้ผลลัพธ์ที่เทียบเคียงได้กับการใช้เทคโนโลยีขั้นสูง ซึ่งในเบื้องต้นให้ผลลัพธ์เป็นที่น่าพอใจ ซึ่งผู้วิจัยหวังว่าโครงการวิจัยนี้ จะเป็นส่วนหนึ่งในการพัฒนาเทคโนโลยีการเคลือบผิววัสดุในประเทศไทย โครงการวิจัยนี้ ได้รับการสนับสนุนจาก สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ประจำปี พ.ศ. 2550 ซึ่งผู้วิจัยเห็นว่าการสนับสนุนดังกล่าว มีประโยชน์อย่างยิ่งต่อนักวิจัยรุ่นใหม่ที่กำลังเริ่มต้นในการทำวิจัย แต่ยังคงขาดวัสดุและอุปกรณ์ในการทำวิจัย และยังมีประสบการณ์ในการทำวิจัยไม่มากนัก โดยกำหนดให้มีนักวิจัยที่มีประสบการณ์เป็นผู้ให้คำปรึกษาและคำแนะนำในการดำเนินกิจกรรมการวิจัยต่าง ๆ การสนับสนุนดังกล่าวจึงนับเป็นจุดเริ่มต้นที่ดีสำหรับนักวิจัยรุ่นใหม่ ที่จะก้าวไปสู่การเป็นนักวิจัยที่มีความเชี่ยวชาญ ผู้วิจัยหวังว่า สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย จะยังคงให้การสนับสนุนนักวิจัยรุ่นใหม่เหล่านี้ให้มีการพัฒนาระดับการวิจัย โดยให้การสนับสนุนในการทำวิจัยอย่างต่อเนื่องต่อไป

.....
อาจารย์ ดร. จัตราดนัย บุญเรือง
หัวหน้าโครงการวิจัย

รหัสโครงการ : MRG5080432

ชื่อโครงการ : การสังเคราะห์ฟิล์มไทเทเนียมคาร์ไบด์บนโลหะผสมไทเทเนียม

ชื่อนักวิจัย : อาจารย์ ดร. ฉัตรดนัย บุญเรือง หัวหน้าโครงการวิจัย
ศาสตราจารย์ ดร. สมชาย ทองเต็ม ที่ปรึกษาโครงการวิจัย

อีเมล : chatdanaiboonruang@yahoo.com

ระยะเวลาโครงการ : 2 ปี

คำหลัก : การให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้า; ไทเทเนียมคาร์ไบด์; ความแข็ง; การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์; pin-on-disk

บทคัดย่อ

โลหะผสม Ti-52Al ถูกตัดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 20 มิลลิเมตร หนาประมาณ 1.5 มิลลิเมตร ถูกนำไปขัดจนกระทั่งถึงการขัดโดยใช้อะลูมินาขนาด 0.05 ไมโครเมตร จากนั้นนำไปฝังในผงแกรไฟต์ในท่อแก้วแล้วอัดด้วยความดันประมาณ 10.3 กิโลปาสกาล ในกระบวนการสังเคราะห์ ทำการให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวอย่างเป็นเวลา 10 และ 20 นาที ในบรรยากาศของอาร์กอน โดยควบคุมกำลังไฟฟ้าให้คงที่ในช่วง 100 ถึง 200 วัตต์ จากนั้น ทำการศึกษาลักษณะเฉพาะของตัวอย่าง โดยการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด การกระจายพลังงานรังสีเอ็กซ์ การทดสอบความแข็ง และทำการศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอของตัวอย่างโดยการทดสอบ pin-on-disk ผลการวิเคราะห์และการทดสอบแสดงให้เห็นว่าโลหะผสม Ti-52Al ที่ทำการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 180 วัตต์ ขึ้นไปเป็นเวลา 10 นาที หรือใช้กำลังไฟฟ้า 140 วัตต์ ขึ้นไปเป็นเวลา 20 นาที สามารถทำให้เกิดสารประกอบ TiC และ Ti_2AlC บนโลหะผสม Ti-52Al ได้ ส่งผลให้โลหะผสมดังกล่าวมีความแข็งสูง มีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำ และมีความต้านทานต่อการสึกหรอสูง โดยที่อุณหภูมิการสังเคราะห์ ความหนาของฟิล์มเคลือบ ความแข็ง และความต้านทานต่อการสึกหรอของโลหะผสม Ti-52Al เพิ่มขึ้นตามกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการสังเคราะห์

Project Code : MRG5080432

Project Title : Synthesis of TiC films on Ti alloys

Investigator : Dr. Chatdanai Boonruang Head of Project

Prof.Dr. Somchai Thongtem Mentor

E-mail Address : chatdanaiboonruang@yahoo.com

Project Period : 2 years

Keywords : Current heating technique; titanium carbide; hardness; X-ray diffraction;
pin-on-disk

Abstract

The Ti-52at%Al samples with 20 mm diameter and 1.5 mm thick were polished by 0.05 μm alumina slurry. The sample was placed between the graphite powders pressed against it in the glass tube. In the synthesis, the direct current was applied across the samples with a fixed electric power from 100 to 200 W for 10 min and 120 to 180 W for 20 min in argon atmosphere. The samples were characterized using XRD, SEM, EDS and Knoop hardness test. Wear behaviors of the samples were evaluated in pin-on-disk tribological tests. TiC and Ti_2AlC were formed on the samples treated at 180 W or above for 10 min and that of 140 W or above for 20 min allowing them to have high hardness, low friction coefficients and high wear resistance. Treating temperature, film thickness, hardness and wear resistance increase with increasing applied electric power.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อ	ง
Abstract	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ฅ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาของปัญหาในการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตในการวิจัย	3
บทที่ 2 การทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย	8
3.1 การเตรียมตัวอย่าง	8
3.1.1 วัสดุและอุปกรณ์	8
3.1.2 วิธีการเตรียมตัวอย่าง	9
3.2 การสังเคราะห์	9
3.2.1 วัสดุและอุปกรณ์	9
3.2.2 วิธีการสังเคราะห์	12
3.3 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์	12
3.4 การวิเคราะห์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และการกระจายพลังงานรังสีเอ็กซ์	13
3.5 การทดสอบความแข็งจุลภาค	13
3.5 การทดสอบการสึกหรอแบบ pin-on-disk	13
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปราย	14
4.1 อุณหภูมิ	14
4.2 แบบรูปการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์	16
4.3 การกระจายพลังงานรังสีเอ็กซ์	19
4.4 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	25

4.5 ความแข็งแกร่งภาค	34
4.6 การสีทหรือ	36
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	39
5.1 สรุปผลการวิจัย	39
5.2 วิจารณ์ผลการวิจัย	40
เอกสารอ้างอิง	41
ผลผลิตจากโครงการวิจัย	44
ภาคผนวก	45
ภาคผนวก ก ข้อมูลผลการทดลอง	46
ภาคผนวก ข แบบรูปการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์	49
ภาคผนวก ค ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ	53

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ก.1 อุณหภูมิในการสังเคราะห์โลหะผสม Ti-52Al เมื่อใช้กำลังไฟฟ้าขนาดต่าง ๆ เป็นเวลา 10 นาที	46
ก.2 อุณหภูมิในการสังเคราะห์โลหะผสม Ti-52Al เมื่อใช้กำลังไฟฟ้าขนาดต่าง ๆ เป็นเวลา 20 นาที	47
ก.3 ความแข็งของโลหะผสม Ti-52Al ที่ไม่ผ่านและผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้าขนาดต่าง ๆ เป็นเวลา 10 และ 20 นาที	47
ก.4 ความหนาของผิวเคลือบ และอัตราการสึกหรอของโลหะผสม Ti-52Al ที่ไม่ผ่านและผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้าขนาดต่าง ๆ เป็นเวลา 20 นาที	48

สารบัญภาพ

รูป	หน้า
3.1 แผนภาพห้องสังเคราะห์และระบบต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง	10
3.2 ห้องสังเคราะห์และระบบต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง	10
3.3 ลักษณะภายนอกของห้องสังเคราะห์	11
3.4 ลักษณะภายในของห้องสังเคราะห์	11
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการสังเคราะห์ของโลหะผสม Ti-52Al ที่ใช้เวลาการสังเคราะห์ 10 นาที	14
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการสังเคราะห์ของโลหะผสม Ti-52Al ที่ใช้เวลาการสังเคราะห์ 20 นาที	15
4.3 อุณหภูมิการสังเคราะห์โดยเฉลี่ยเมื่อทำการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้าขนาดต่าง ๆ เป็นเวลา 10 และ 20 นาที	16
4.4 แบบรูปการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของโลหะผสม Ti-52Al ที่ไม่ผ่านและผ่านการสังเคราะห์ โดยใช้กำลังไฟฟ้าขนาดต่าง ๆ เป็นเวลา 10 นาที	17
4.5 แบบรูปการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของโลหะผสม Ti-52Al ที่ไม่ผ่านและผ่านการสังเคราะห์ โดยใช้กำลังไฟฟ้าขนาดต่าง ๆ เป็นเวลา 20 นาที	18
4.6 การกระจายพลังงานรังสีเอ็กซ์ของโลหะผสม Ti-52Al ที่ไม่ผ่านการสังเคราะห์	20
4.7 การกระจายพลังงานรังสีเอ็กซ์ของโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์ โดยใช้กำลังไฟฟ้า 100 W เป็นเวลา 10 นาที	20
4.8 การกระจายพลังงานรังสีเอ็กซ์ของโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์ โดยใช้กำลังไฟฟ้า 120 W เป็นเวลา 10 นาที	21
4.9 การกระจายพลังงานรังสีเอ็กซ์ของโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์ โดยใช้กำลังไฟฟ้า 140 W เป็นเวลา 10 นาที	21
4.10 การกระจายพลังงานรังสีเอ็กซ์ของโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์ โดยใช้กำลังไฟฟ้า 160 W เป็นเวลา 10 นาที	22
4.11 การกระจายพลังงานรังสีเอ็กซ์ของโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์ โดยใช้กำลังไฟฟ้า 180 W เป็นเวลา 10 นาที	22

รูป	หน้า
4.26 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 180 W เป็นเวลา 20 นาที	30
4.27 ภาพภาคตัดขวางของโลหะผสม Ti-52Al ที่ไม่ผ่านการคาร์บูไรเซชัน	31
4.28 ภาพภาคตัดขวางของโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 120 W เป็นเวลา 20 นาที	32
4.29 ภาพภาคตัดขวางของโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 140 W เป็นเวลา 20 นาที	32
4.30 ภาพภาคตัดขวางของโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 160 W เป็นเวลา 20 นาที	33
4.31 ภาพภาคตัดขวางของโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 180 W เป็นเวลา 20 นาที	33
4.32 ความหนาของฟิล์มเคลือบบนโลหะผสม Ti-52Al ที่ไม่ผ่านและผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 120 140 160 และ 180 W เป็นเวลา 20 นาที	34
4.33 ความแข็งของโลหะผสม Ti-52Al ที่ไม่ผ่านและผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้าขนาดต่าง ๆ เป็นเวลา 10 นาที	35
4.34 ความแข็งของโลหะผสม Ti-52Al ที่ไม่ผ่านและผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้าขนาดต่าง ๆ เป็นเวลา 20 นาที	35
4.35 สัมประสิทธิ์ความเสียหายของโลหะผสม Ti-52Al ที่ไม่ผ่านและผ่านการสังเคราะห์เป็นเวลา 20 นาที	37
4.36 อัตราการสึกหรอของโลหะผสม Ti-52Al ที่ไม่ผ่านและผ่านการสังเคราะห์เป็นเวลา 20 นาที	38
ข.1 แบบรูปการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ TiAl (05-0678)	49
ข.2 แบบรูปการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ Ti ₃ Al (09-0098)	50
ข.3 แบบรูปการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ Ti ₂ Al (47-1410)	50
ข.4 แบบรูปการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ C (75-2078)	51
ข.5 แบบรูปการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ C (18-0311)	51
ข.6 แบบรูปการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ TiC (02-1179)	52
ข.7 แบบรูปการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ Ti ₂ AlC (29-0095)	52

บทที่ 1

บทนำ

เนื้อหาในบทนี้อธิบายถึงที่มาของปัญหาในการวิจัย วัตถุประสงค์ของการวิจัย และขอบเขตของการวิจัย

1.1 ที่มาของปัญหาในการวิจัย

นับจากมีการสังเคราะห์โลหะไทเทเนียม (Ti) ขึ้นเป็นครั้งแรกในช่วงปลายยุค 1930 ไทเทเนียมและโลหะผสมไทเทเนียม (Ti alloys) ถูกพัฒนาและมีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายมากขึ้นเป็นลำดับ การเติบโตของอุตสาหกรรมไทเทเนียมเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรง (strength) สูง มีความทนทานต่อการกัดกร่อน (corrosion) สูง และมีความหนาแน่นต่ำเพียง 55% ของเหล็กกล้า จึงเหมาะที่จะใช้ทำอุปกรณ์หรือส่วนประกอบในอากาศยานที่ใช้งานที่อุณหภูมิสูง เช่น ใช้ผลิตเป็นโครงสร้างของอากาศยาน ดาวเทียม ขีปนาวุธ และใช้ผลิตเป็นส่วนประกอบของเครื่องยนต์ซึ่งได้แก่จรวด ระเบิด วาล์ว และส่วนประกอบอื่น ๆ และในปัจจุบันได้มีการนำโลหะและโลหะผสมไทเทเนียมมาใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์มากขึ้น นอกจากนี้ยังมีการใช้โลหะและโลหะผสมไทเทเนียมในงานด้านต่าง ๆ โดยเฉพาะกับอุปกรณ์ที่ต้องการวัสดุที่มีความต้านทานต่อการกัดกร่อน เช่น ปัมป์ วาล์ว ภาชนะส่งถ่าย และภาชนะบรรจุต่าง ๆ สำหรับอุตสาหกรรมกระดาษ และ ปิโตรเคมี ตลอดจนวัสดุและอุปกรณ์ทางการแพทย์ [1] แต่โลหะและโลหะผสมไทเทเนียมมีข้อจำกัดที่สำคัญประการหนึ่ง คือมีสมบัติทางพื้นผิว (surface properties) ไม่ดีที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการปรับปรุงพื้นผิวโดยการเคลือบด้วยสารประกอบที่มีความแข็งสูง ทนทานต่อการสึกหรอ (wear) และการกัดกร่อน (corrosion) ซึ่งจะช่วยยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์และชิ้นส่วนต่าง ๆ ได้

ไทเทเนียมคาร์ไบด์ (TiC) เป็นสารที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับใช้เคลือบผิว โครงสร้างของ TiC เป็นแบบ FCC ที่มีคาร์บอน (C) อยู่ใน octahedral site [2] พันธะเคมีในโครงสร้างของ TiC มีความพิเศษ เป็นการผสมผสานลักษณะเฉพาะของพันธะโคเวเลนต์ พันธะโลหะ และพันธะไอออนิก [3] จึงทำให้ TiC มีสมบัติที่ดีหลายประการ อันได้แก่ มีความแข็งสูงอยู่ในระดับ 26 – 35 GPa [4,5] เทียบเท่ากับ SiC (27 – 34 GPa) [4] ซึ่งมากกว่าสารเคลือบผิวชนิดอื่น ๆ ไม่ว่าจะเป็น TiN (~20 GPa) ZrN (~16 GPa) ZrC (22 – 23 GPa) หรือ HfC (~26 GPa) นอกจากนี้ยังมีความแข็งแรงและความคงรูปร่าง (rigidity) สูง [6-8] ทำให้มีความต้านทานต่อการสึกหรอสูง และมีสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (friction coefficient) ต่ำ [2-3,6-12] อยู่ในระดับ 0.3 – 0.6 [5] TiC สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงเนื่องจากมีจุดหลอมเหลวสูงถึง 3067 °C [10] มีความเสถียรสูงทั้งในทางความร้อน [2,10,13] และในทางเคมี [3,10] ทำให้มีความต้านทานต่อความเสียหายจากความร้อน (thermal shock) [7] และการกัดกร่อน [2-3,10,13]

นอกจากนี้ยังมีสมบัติการนำไฟฟ้าและการนำความร้อนที่ดี [3,9,10,14] เมื่อเทียบกับสารเคลือบผิวชนิดอื่น ด้วยคุณสมบัติดังกล่าว TiC จึงถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการเคลือบผิววัสดุในงานด้านต่าง ๆ อย่างกว้างขวาง เช่น งานด้านเชิงกล ได้แก่ เครื่องมือตัดและขึ้นรูป [6,10] ลูกปืนในส่วนประกอบที่เคลื่อนที่ได้ของอากาศยาน [12] และเครื่องจักรต่าง ๆ [15] งานด้านความร้อน ได้แก่ ภาชนะบรรจุโลหะเหลว [10] ผนังเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ [3,6,10,12] งานด้านอิเล็กทรอนิกส์ ได้แก่ ชั้นป้องกันการแพร่ (diffusion barriers) ในสารกึ่งตัวนำ [3,10,12] ขั้วจ่ายอิเล็กตรอนใน organic light emitting devices (OLEDs) [3,8] เป็นต้น สำหรับโลหะผสมไทเทเนียมที่จะนำไปใช้ในงานด้านเชิงกล การเคลือบผิวด้วย TiC จะทำให้สมบัติทางพื้นผิวดีขึ้น การสังเคราะห์ฟิล์ม TiC ทำได้หลายวิธี ดังต่อไปนี้

Chemical vapor deposition (CVD) ใช้การทำปฏิกิริยาของแก๊สเกิดเป็นฟิล์ม TiC บนชิ้นงาน (substrate) ซึ่งต้องอาศัยการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิช่วง $850 - 1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ [3-4,11] ซึ่งจะใช้ได้กับชิ้นงานที่ทนอุณหภูมิสูงได้เท่านั้น อย่างไรก็ตาม ฟิล์มที่ได้จะมีสมบัติเชิงกลที่ดี [4] ซึ่งต่อมาได้มีการประยุกต์ใช้สนามไฟฟ้าทำให้แก๊สแตกตัวเป็นพลาสมาแล้วเข้าทำปฏิกิริยาเกิดเป็นสารประกอบ TiC บนชิ้นงาน เรียกวิธีนี้ว่า plasma enhance chemical vapor deposition (PECVD) ซึ่งจะใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ที่ต่ำกว่าวิธี CVD คือ ช่วง $500 - 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ [3-4] แต่ก็เป็นช่วงอุณหภูมิที่ค่อนข้างสูง

Physical vapor deposition (PVD) เป็นการสะสมของสารที่ต้องการบนชิ้นงานโดยตรงเป็นหลักซึ่งอาจมีการทำปฏิกิริยากับแก๊สร่วมด้วย วิธีนี้สามารถทำการสังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิต่ำ แต่ฟิล์มที่ได้จะมีการยึดเกาะ (adhesion) ที่ไม่ดีเท่ากับวิธี CVD [16] การสังเคราะห์ฟิล์ม TiC ด้วยวิธี PVD มีอยู่หลายแบบ ได้แก่ Sputtering เป็นการสังเคราะห์จาก TiC target โดยใช้ radio frequency [2] หรือจาก Ti target และ C target โดยใช้ magnetron [4,17] Plasma based ion implantation (PBII) เป็นการ implant C plasma เข้าไปในฟิล์ม Ti [18] หรือ Ti plasma และ C plasma เข้าไปในชิ้นงาน [11] Ion beam-assisted deposition (IBAD) เป็นการใช้ไอออนชนและถ่ายเทพลังงานให้กับไอของ TiC (ที่ได้จากการใช้อิเล็กตรอนยิงไปบนผง TiC) ให้ไปสะสมอยู่บนผิวของชิ้นงาน [12,16] Plasma immersion ion implantation and deposition (PIIID) เป็นการใช้ Ti plasma ที่สร้างจาก pulsed cathodic arc plasma source ที่เป็น Ti บริสุทธิ์ และ C_2H_2 plasma ที่สร้างจาก radio-frequency glow discharge plasma source (C_2H_2 gas) พลาสมาทั้งสองชนิดจะถูกเร่งโดยความต่างศักย์ให้ไปสะสมเกิดเป็น TiC บนชิ้นงาน [14,19] Pulsed laser deposition (PLD) เป็นการใช้เลเซอร์ยิงไปบน TiC target เพื่อให้เกิดการระเหิดของ TiC แล้วไปสะสมบนชิ้นงาน [8,13,15] หรือใช้เลเซอร์ยิงไปบน Ti target ในบรรยากาศของ CH_4 [6,10] เป็นต้น

Current heating technique เป็นวิธีที่จะใช้ในโครงการวิจัยนี้ เป็นการให้ความร้อนกับชิ้นงานที่ฝังอยู่ในแท่งคาร์บอน โดยการให้เกิดความต่างศักย์ที่ปลายทั้งสองของแท่งคาร์บอน ซึ่ง

จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านและเกิดความร้อนขึ้น ส่งผลให้เกิดการแพร่ของคาร์บอนเข้าไปในชิ้นงานโลหะผสมไทเทเนียม เกิดเป็นฟิล์ม TiC เคลือบบนผิวของชิ้นงานโลหะผสมไทเทเนียม วิธีการนี้ไม่ต้องใช้ระบบควบคุมต่าง ๆ ที่ยุ่งยากและมีราคาแพง และไม่ก่อให้เกิดผลพลอยได้ที่ เป็นมลพิษ เป็นวิธีการใหม่ที่ยังไม่เคยใช้สังเคราะห์ฟิล์ม TiC มาก่อนซึ่งจะก่อให้เกิดการพัฒนา ด้านการสังเคราะห์สาร TiC ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตในการวิจัย

การศึกษานี้ มีวัตถุประสงค์ที่จะทำการสังเคราะห์สารประกอบไทเทเนียมคาร์ไบด์ บนโลหะผสมไทเทเนียมอะลูมิเนียม Ti-52at%Al โดยใช้เทคนิคการให้ความร้อนด้วย กระแสไฟฟ้า ตลอดจนทำการศึกษาลักษณะเฉพาะ สมบัติ และพฤติกรรมการสึกหรอของโลหะผสมดังกล่าว โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD) กล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) การกระจายพลังงานรังสี เอ็กซ์ (energy dispersive spectroscopy, EDS) การทดสอบความแข็งจุลภาค (microhardness test) และการทดสอบการสึกหรอแบบ pin-on-disk

บทที่ 2

การทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้เป็นการสรุปสาระสำคัญของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ฟิล์มไทเทเนียมคาร์ไบด์ด้วยเทคนิคต่าง ๆ ลงบนวัสดุชนิดต่าง ๆ

Mani และคณะ [2] ทำการสังเคราะห์ฟิล์มบางของ TiC บน Si substrate โดยวิธี RF sputtering จาก TiC target ได้ทำการศึกษาผลของความดันในการ sputtering ในช่วง 0.35 – 1 Pa ที่มีต่อโครงสร้างและสมบัติเชิงกลของฟิล์ม ผลการวิเคราะห์ x-ray diffraction (XRD) แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของฟิล์มมีการเปลี่ยนแปลงจาก distorted nonhomogeneous TiC ที่ความดันต่ำ ไปเป็น homogeneous TiC ที่เรียงตัวแบบ <111> ที่ความดันสูง ผลการวิเคราะห์ Rutherford backscattering spectroscopy (RBS) แสดงให้เห็นว่า ฟิล์มที่ได้มีองค์ประกอบเดียวกันในทุกกรณี การบิดเบี้ยวของโครงสร้างของ TiC นั้นเกิดขึ้นที่ความดันต่ำ ส่งผลให้เกิดโครงสร้างที่แน่นและมี compressive stress ที่เพิ่มขึ้นเมื่อความดันลดต่ำลง ความแข็งของฟิล์มเพิ่มขึ้นเมื่อความดันลดลง โดยมีค่าสูงสุดเป็น 18.5 GPa เมื่อสังเคราะห์ที่ความดัน 0.35 Pa ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า compressive stress มีความสัมพันธ์กับความแข็ง

Tang และคณะ [14] ทำการสังเคราะห์ฟิล์ม TiC บนเหล็กกล้า AISI440B โดยวิธี PIIBD ซึ่งทำการสร้างพลาสมาของ C_2H_2 และ Ti ขึ้นพร้อมกัน โดย C_2H_2 plasma สร้างจาก radio-frequency plasma source ส่วน Ti plasma สร้างจาก cathodic arc plasma source การวิเคราะห์ XRD ยืนยันถึงการเกิดเฟส TiC ขึ้นในฟิล์ม การทดสอบความแข็งพบว่าหลังจากเคลือบด้วยฟิล์ม TiC แล้วความแข็งของเหล็กกล้าเพิ่มขึ้นสูงสุดถึง 1025 kgf/mm^2 ซึ่งคิดเป็น 70.8 % จากกรณีที่ไม่ได้เคลือบผิว การทดสอบ pin-on-disk พบว่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่า 0.1 ซึ่งลดลงจากกรณีที่ไม่ได้เคลือบผิวที่มีค่า 0.87

Fang และคณะ [9] ทำการศึกษสมบัติเชิงกลระดับนาโนของฟิล์มบาง TiC, TiN และ TiCN ที่เคลือบบน Si (100) substrate ซึ่งสังเคราะห์โดยวิธี PECVD การวิเคราะห์ scanning probe microscopy (SPM) และการทดสอบ nanoindentation พบว่าฟิล์ม TiC มีขนาดเกรนเล็ก มีความขรุขระ (roughness) ต่ำ และมีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ต่ำ เมื่อเทียบกับฟิล์ม TiN และ TiCN นอกจากนี้ยังมีความแข็งและ Young's modulus ที่สูงกว่า ทำให้ฟิล์ม TiC สามารถรองรับความเค้นได้มากกว่าและเกิด surface strain ที่น้อยกว่า

Ma และคณะ [18] ทำการสังเคราะห์ฟิล์ม TiC บนเหล็กกล้าเกรด 45 โดยการ implant Ti ions ที่ได้จาก magnetron sputtering plasma เข้าไปใน substrate ทำให้เกิดชั้น Ti ขึ้นบน

ผิว จากนั้นทำการ implant C ions ที่ได้จาก CH_4 plasma เข้าไปในชั้น Ti เกิดเป็นสารประกอบ TiC การวิเคราะห์ x-ray photoelectron spectroscopy (XPS) พบว่าคาร์บอนมีระดับพลังงานสองค่า ซึ่งเป็นระดับพลังงานของคาร์บอนในรูปของสารประกอบคาร์ไบด์และในรูปของสารละลายของแข็ง (solid solution) และพบว่าในฟิล์มประกอบด้วย TiC เป็นหลัก ซึ่งมีการเรียงตัวแบบ (111)

Suda และคณะ [10] ทำการเตรียมฟิล์มบาง TiC บน Si (100) substrate โดยวิธี PLD จาก Ti target และ TiC target ในบรรยากาศของ CH_4 การวิเคราะห์ด้วย Glancing angle x-ray diffraction (GXR) แสดงให้เห็นว่าฟิล์มเป็น polycrystal ที่ประกอบด้วย TiC และ Ti เมื่อใช้ Ti target และฟิล์มเป็น single phase TiC เมื่อใช้ TiC target และยังพบว่าความดันของ CH_4 มีผลต่อความเป็นผลึกและองค์ประกอบของฟิล์ม การวิเคราะห์ atomic force microscopy (AFM) พบว่า root-mean-square (RMS) roughness ของฟิล์มต่ำกว่า 2 nm นั่นคือฟิล์มที่ได้มีความเรียบและปราศจากรูพรุน

Li และ Xia [11] ทำการเตรียมฟิล์ม TiC_x ที่มีอัตราส่วน C/Ti ต่าง ๆ โดยวิธี PBI การทดสอบ RBS แสดงให้เห็นว่า ฟิล์มมีองค์ประกอบเป็น H มากกว่า 20 at% การวิเคราะห์ XPS พบว่า C ส่วนเกิน(ที่ไม่ได้เกิดพันธะกับ Ti) จะอยู่ในรูปของ interstitial carbon, amorphous hydrogenated carbon, polymer-like carbon และ organic compound ของ Ti การวิเคราะห์ cross-sectional transmission electron microscopy (XTEM) แสดงให้เห็นว่าในฟิล์ม $\text{TiC}_{0.81}$ นั้นประกอบด้วย rod-shaped TiC crystal จัดเรียงตัวอยู่ในแนวการเติบโตของผลึก ในขณะที่ฟิล์ม $\text{TiC}_{1.55}$ มีโครงสร้างจุลภาคที่มีรูปแบบที่ไม่แน่นอน นอกจากนี้ยังพบว่า C ใน C-rich films นั้นเป็น amorphous carbon

Ding และคณะ [3] ทำการสังเคราะห์ฟิล์ม TiC ที่มีความหนาประมาณ 100 nm บน Si (100) substrates โดยวิธี filtered cathodic vacuum arc (FCVA) การทดลองมีการแปรค่า negative bias voltage (V_s) ในช่วง 0 ถึง -1000 V แก่ substrate การวิเคราะห์ RBS, XPS, XRD และ AFM พบว่า การจัดเรียงตัวของผลึกของฟิล์มมีความแตกต่างกันเมื่อค่า V_s ต่างกัน โดยที่ $V_s = 0$ ผลึกของฟิล์มมีการเรียงตัวแบบสุ่ม ที่ $V_s = -40$ ถึง -500 V ผลึกของฟิล์มมีการเรียงตัวแบบ (111) ที่ $V_s = -500$ ถึง -1000 V ผลึกของฟิล์มมีการเรียงตัวแบบ (100) ผลการทดสอบ radius of curvature เพื่อหา compressive internal stress (σ_c) พบว่าฟิล์ม TiC จะมีค่า σ_c ต่ำที่สุดเมื่อใช้ $V_s = -80$ ถึง -120 V

Rawat และคณะ [7] ทำการสังเคราะห์ฟิล์ม TiC บน 304-stainless steel ที่อุณหภูมิห้อง โดยการประยุกต์ใช้ dense plasma focus devices โดยเปลี่ยนใช้ Ti anode แทน hollow copper anode ที่ติดมากับอุปกรณ์ ทำการสังเคราะห์ในบรรยากาศของแก๊สผสม $\text{Ar}:\text{C}_2\text{H}_2$ ในอัตรา 7:3 ณ ความดัน 1.5 mbar ในการสังเคราะห์จะวาง substrate ตามแนวแกนของ anode ห่างจากส่วนบนของ anode เป็นระยะ 11.5 cm ทำการสร้างฟิล์มโดยใช้ focus shot ต่าง ๆ

เป็น 10, 20 และ 30 การวิเคราะห์ XRD พบว่าฟิล์มเป็นผลึก TiC ที่มีการเรียงตัวเป็นระนาบ (111), (200), (220), (311) และ (222) การวิเคราะห์ scanning electron microscopy (SEM) พบว่าผิวของฟิล์มมีความเรียบ และมีกระจุกของ TiC grains เพิ่มขึ้นตามจำนวนของ focus shots ผลการวิเคราะห์ energy dispersive x-ray spectroscopy (EDX) แสดงถึงปริมาณ Ti ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ Fe ของ substrate เมื่อเพิ่มจำนวนของ focus shots ผลของ EDX mapping แสดงให้เห็นถึงการกระจายที่สม่ำเสมอของ TiC บนผิวของ substrate

Kusano และคณะ [4] ทำการเตรียมฟิล์ม TiC โดยการตกสะสมชั้น Ti และ C สลับกัน บน aluminosilicate glass substrate โดยวิธี magnetron sputtering อัตราเร็วในการหมุนของตัวรองรับ substrate เป็น 30 รอบ/นาที ชั้นของ Ti และ C อยู่ในช่วง 0 - 0.15 และ 0 - 0.072 nm ตามลำดับ ขึ้นกับการปรับ cathode current อัตราส่วนขององค์ประกอบ Ti/C ในฟิล์มถูกควบคุมโดยความหนาของชั้น Ti และ C ทำให้สามารถเตรียมได้ทั้งฟิล์ม Ti, TiC และ C การวิเคราะห์ XPS แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบของฟิล์มมีอัตราส่วน Ti:C ตั้งแต่ 1:0 ถึง 0:1 และที่อัตราส่วน Ti:C สูง ๆ จะมี O เจือปน การวิเคราะห์ XRD แสดงให้เห็นว่า โครงสร้างของฟิล์มมีการเปลี่ยนแปลงตามองค์ประกอบ C ที่เพิ่มขึ้น โดยเปลี่ยนจาก HCP- α -Ti (เมื่อ C/Ti flux ratio < 0.1) ไปเป็น FCC-TiC (C/Ti flux ratio = 0.2 - 0.5) และไปเป็น amorphous (C/Ti flux ratio > 0.5) และพบว่า lattice spacing ของ TiC film เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตาม C/Ti flux ratio ที่เพิ่มขึ้น การทดสอบความแข็งพบว่า ความแข็งเพิ่มขึ้นตาม C/Ti flux ratio โดยมีค่าสูงสุดเป็น 17 GPa ใน stoichiometric TiC film การทดสอบการสึกหรอพบว่าฟิล์มที่เตรียมโดยใช้ C/Ti flux ratio > 0.33 จะมี abrasive wear resistance สูง

López [12] ทำการเตรียมฟิล์ม TiC บน Si wafers ที่อุณหภูมิห้องโดยวิธี electron beam evaporation จากผง TiC ทั้งแบบร่วมและไม่ร่วมกับการใช้ low energy bombardment (LEB) ของ Ar ที่ 0 - 450 eV ผลการทดลองพบว่า TiC flux ที่เตรียมได้นั้นมีความแข็งอยู่ในช่วง 12 - 18 GPa โดยฟิล์มที่เตรียมร่วมกับการใช้ LEB ของ Ar ที่ 225 - 450 eV มีความแข็งสูงถึง 16 - 18 GPa และอัตราส่วนการตกสะสมของฟิล์มด้วยวิธีการดังกล่าวมีสูงถึง 1.5 $\mu\text{m}/\text{h}$

Wolfe และ Singh [16] ทำการสังเคราะห์ฟิล์ม TiC บน 304 stainless steel โดยวิธี reactive ionbeam-assisted electronbeam-physical vapor deposition (RIBA, EB-PVD) การวิเคราะห์ XRD พบว่าฟิล์มมีการเรียงตัวแบบ (111) เมื่ออุณหภูมิของ substrate ต่ำกว่า 650 °C ต่อมาเมื่อให้อุณหภูมิของ substrate เพิ่มขึ้นเป็น 750 °C พบว่าฟิล์มมีการเรียงตัวแบบ (200) ซึ่งทำให้ฟิล์มมีความแข็งเพิ่มขึ้น จากการวิเคราะห์ SEM พบว่าการสังเคราะห์ฟิล์มที่อุณหภูมิ 650 °C ขึ้นไป ผิวของฟิล์มจะมีลักษณะเป็น texture ซึ่งจะเกิดลักษณะดังกล่าวมากขึ้นเมื่อเพิ่มระดับของ ion bombardment ส่งผลให้มีความแข็งมากขึ้น โดยความแข็งของฟิล์มอยู่ในช่วง 1100 - 3500 VHN_{0.050}

Radhakrishnan และคณะ [15] ทำการสังเคราะห์ฟิล์ม TiC บน 440C และ 52100 bearing steels ที่อุณหภูมิห้องโดยวิธี pulsed laser deposition (PLD) ผลการวิเคราะห์ AFM และ SEM แสดงให้เห็นว่า ฟิล์มมีความเรียบและมีความสม่ำเสมออย่างมาก โดยมี average roughness และ RMS surface roughness เป็น 1.2 และ 1.6 nm ตามลำดับ การวิเคราะห์ selected area electron diffraction (SAED) ใน transmission electron microscope (TEM) พบว่า lattice spacing ของฟิล์ม TiC เป็น 3 - 17 nm การทดสอบ nanoindentation พบว่า ความแข็งของฟิล์มมีค่าประมาณ 30 GPa

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

เนื้อหาในบทนี้อธิบายเกี่ยวกับวัสดุที่นำมาศึกษา การเตรียมตัวอย่าง การสังเคราะห์ ตลอดจนการวิเคราะห์ การทดสอบสมบัติและการทดสอบพฤติกรรมของตัวอย่าง ด้วยเทคนิคต่าง ๆ ได้แก่ การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD) จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) การกระจายพลังงานรังสีเอ็กซ์ (energy dispersive spectroscopy, EDS) การทดสอบความแข็งจุลภาค (microhardness test) และการทดสอบการสึกหรอแบบ pin-on-disk

3.1 การเตรียมตัวอย่าง

3.1.1 วัสดุและอุปกรณ์

- 1) โลหะผสม Ti-52Al ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 20 mm มีองค์ประกอบโดยอะตอมของธาตุที่เจือปนดังนี้คือ Fe 0.027%; Si 0.021%; Cu 0.012%; Ca 0.0015%; Mg 0.0005%
- 2) เครื่องตัด Struer รุ่น Accutom-2
- 4) กระดาษทรายน้ำเบอร์ 100 400 และ 1000
- 5) ครีมหัดอะลูมินาขนาด 5 μm 0.3 μm และ 0.05 μm
- 6) ผ้าขัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 20 cm
- 7) เครื่องขัด
- 8) คีมสำหรับจับตัวอย่าง
- 9) บีกเกอร์ขนาด 50 ml
- 10) อะซิโตน
- 11) อ่างอัลตราโซนิก

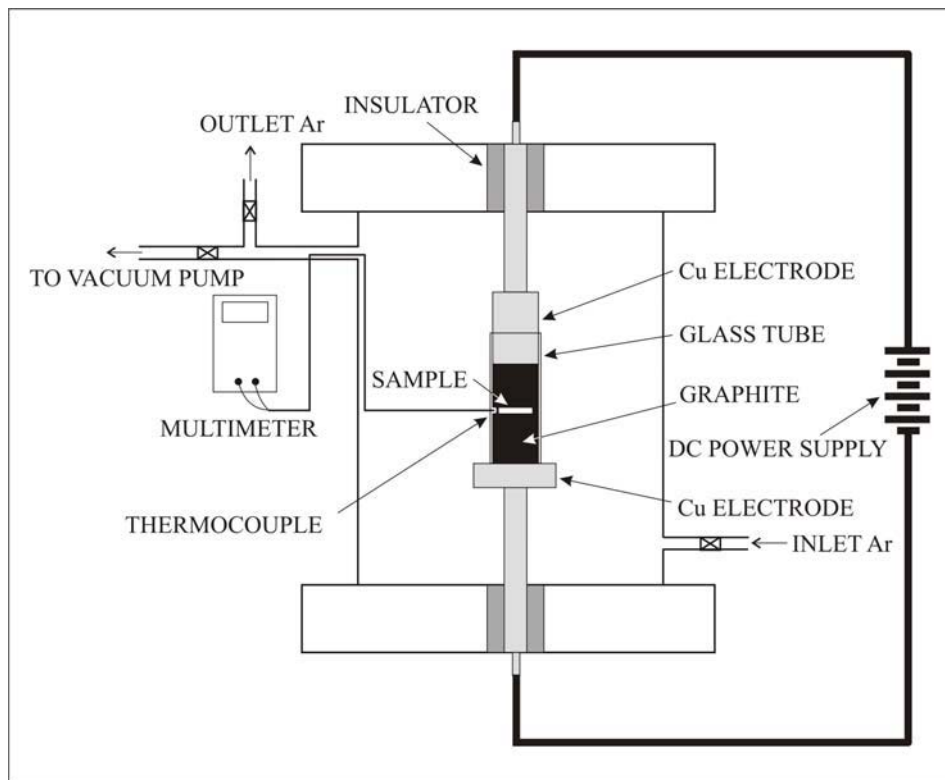
3.1.2 วิธีการเตรียมตัวอย่าง

- 1) ตัดแท่งโลหะผสม Ti-52Al ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 20 mm ให้มีความหนาประมาณ 1.5 mm โดยใช้เครื่องตัด
- 2) นำชิ้นงานที่ตัดแล้ว ไปขัดด้วยกระดาษทรายน้ำ เบอร์ 100 400 และ 1000 ตามลำดับ
- 3) นำชิ้นงานที่ขัดด้วยกระดาษทรายแล้วไปขัดด้วยครีมขัดอะลูมิเนียมขนาด 5 μm 0.3 μm และ 0.05 μm ตามลำดับ
- 4) ทำความสะอาดชิ้นงานด้วยอะซิโตนในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลาประมาณ 2 นาที

3.2 การสังเคราะห์

3.2.1 วัสดุและอุปกรณ์

- 1) ตัวอย่างโลหะผสม Ti-52Al ที่เตรียมไว้
- 2) ท่อแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 cm ยาว 6.0 cm สำหรับบรรจุตัวอย่างเพื่อทำการสังเคราะห์
- 3) เทอร์โมคัปเปิล Type K และมัลติมิเตอร์ สำหรับวัดอุณหภูมิ
- 4) บั๊มสำหรับสูบลำอากาศ และเกจวัดสูญญากาศ
- 5) เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง
- 6) ห้องสังเคราะห์รูปทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm สูง 20 mm ภายในประกอบด้วย ขั้วทองแดงสองขั้ว อยู่ที่ด้านล่าง และที่ฝาปิดห้องสังเคราะห์ มีท่อสำหรับให้แก๊สไหลผ่านเข้าออก ขั้วทองแดงจะเชื่อมต่อเข้ากับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนท่อแก๊สจะเชื่อมต่อเข้ากับระบบสูบลำอากาศและระบบถ่ายเทแก๊สอาร์กอน ดังแสดงในรูป 3.1
- 7) แท่งทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 cm ยาว 12 cm มวล 554.5 g สำหรับอัดตัวอย่างและฝังแกรไฟต์ในท่อแก้ว
- 8) นาฬิกาจับเวลา
- 9) เครื่องชั่งดิจิทัล AND รุ่น HM-300 ความละเอียด 0.0001 g
- 10) ผงแกรไฟต์ขนาด 20 μm
- 11) แก๊สอาร์กอน ความบริสุทธิ์ 99.99%
- 12) บีกเกอร์ขนาด 50 ml
- 13) คีมสำหรับจับตัวอย่าง



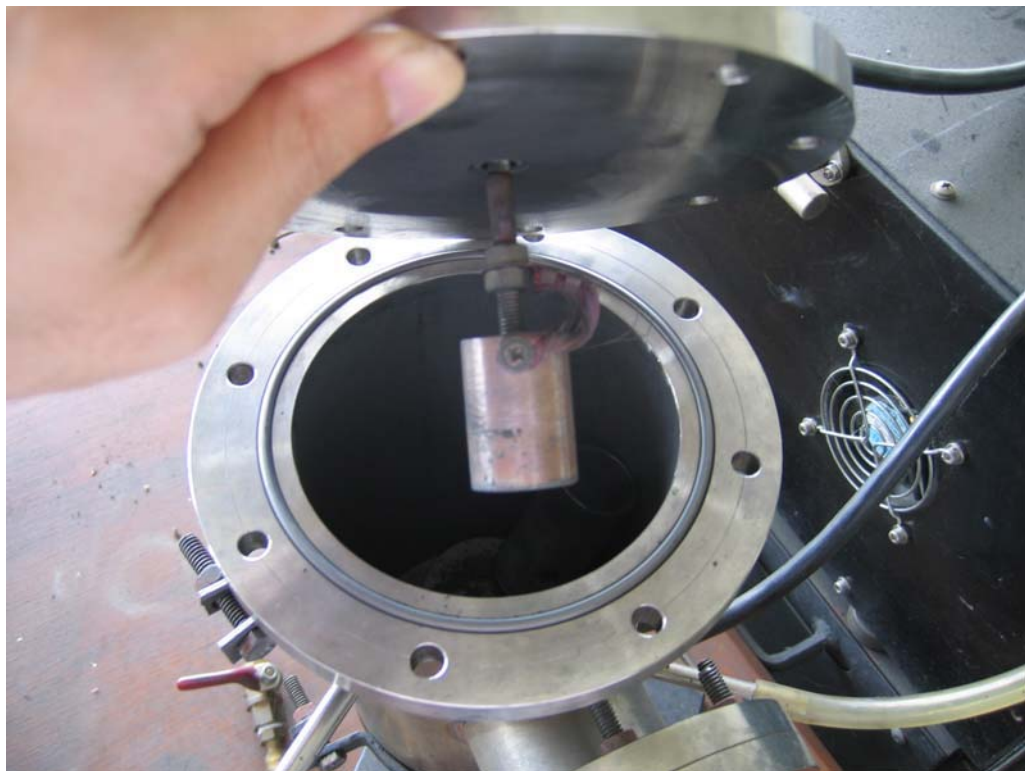
รูป 3.1 แผนภาพห้องสังเคราะห์และระบบต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง



รูป 3.2 ห้องสังเคราะห์และระบบต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง



รูป 3.3 ลักษณะภายนอกของห้องสังเคราะห์



รูป 3.4 ลักษณะภายในของห้องสังเคราะห์

3.2.2 วิธีการสังเคราะห์

1) ชั่งผงแกรไฟต์ 13.5 g ซึ่งเมื่อนำไปอัดในท่อแก้วแล้วจะทำให้มีความยาวที่เชื่อมระหว่างขั้วทองแดงทั้งสองได้พอดี

2) นำตัวอย่างที่จะทำการสังเคราะห์ไปฝังอยู่ในผงแกรไฟต์ภายในท่อแก้วดังในรูป

3.1 โดยใช้แท่งทองแดงอัดด้วยความดันประมาณ 10.3 kPa

3) นำแท่งแกรไฟต์ ไปวางบนขั้วทองแดงด้านล่างในห้องสังเคราะห์ จากนั้น ปิดฝา ด้านบนของห้องสังเคราะห์ จะทำให้ขั้วทองแดงด้านบนเลื่อนลงมาสัมผัสกับแท่งแกรไฟต์ ดังในรูป 3.1 จากนั้นจึงทำการปิดฝาห้องสังเคราะห์ให้สนิท

4) ทำการสูบอากาศในห้องสังเคราะห์ออก โดยใช้ปั๊มสุญญากาศ ซึ่งจะทำให้ความดันในห้องสังเคราะห์ลดลงเหลือประมาณ 65.3 kPa จากนั้นปิดปั๊มแล้วปล่อยแก๊สอาร์กอนให้ไหลเข้าไปในห้องสังเคราะห์ จนกระทั่งความดันภายในห้องสังเคราะห์สูงกว่าความดันบรรยากาศเล็กน้อย แล้วจึงระบายความดันในห้องสังเคราะห์ให้เท่ากับความดันบรรยากาศ จากนั้นควบคุมอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน ให้อยู่ที่ประมาณ 2 ml/min เพื่อควบคุมให้ภายในห้องสังเคราะห์ อยู่ในบรรยากาศของอาร์กอน ตลอดเวลาทำการสังเคราะห์

5) ทำการสังเคราะห์โดยเปิดแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้ไหลผ่านแกรไฟต์และตัวอย่างเป็นเวลา 10 และ 20 min โดยในการสังเคราะห์จะควบคุมกำลังไฟฟ้าให้คงที่ในช่วง 100 ถึง 200 W

3.3 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

ทำการศึกษาสารประกอบที่เกิดขึ้นบนตัวอย่างที่ผ่านการสังเคราะห์ โดยนำตัวอย่างที่ผ่านการสังเคราะห์และไม่ผ่านการสังเคราะห์ ไปทำการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ Bruker ใช้เป้าทองแดงเป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์ ใช้ศักย์เร่ง 40 kV ทำการวิเคราะห์ในช่วง 2θ ตั้งแต่ 25 ถึง 85° โดยใช้อัตราการกวาดรังสี $1^\circ/\text{min}$ จากนั้นทำการวิเคราะห์แบบรูปการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ด้วยโปรแกรม X'Pert Highscore โดยใช้ฐานข้อมูล JCPDS ปี 2002

3.4 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และการกระจายพลังงานรังสีเอ็กซ์

นำตัวอย่างที่ผ่านการสังเคราะห์ไปทำการเคลือบทองโดยใช้เครื่อง SPI module sputter coater ของบริษัท SPI Supplies Inc. จากนั้นทำการศึกษาลักษณะพื้นผิวโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 10,000 และ 20,000 เท่า พร้อมทั้งทำการหาองค์ประกอบธาตุบนตัวอย่างด้วยการวิเคราะห์การกระจายพลังงานรังสีเอ็กซ์ จากนั้นทำการศึกษาภาคตัดขวางของตัวอย่าง ด้วยการถ่ายภาพจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ชนิดปลดปล่อยสนาม JEOL รุ่น JSM-6335F SEM ใช้ศักย์เร่ง 15 kV

3.5 การทดสอบความแข็งจุลภาค

ทำการทดสอบความแข็งจุลภาคของตัวอย่างที่ผ่านและไม่ผ่านการสังเคราะห์ โดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งจุลภาคของบริษัท Matsuzawa Seiki Co. Ltd. รุ่น MXT- α 7 ใช้หัวกดแบบรูป และใช้โหลด 100 gf เป็นเวลา 10 s ทำการทดสอบตัวอย่างแต่ละชิ้น โดยเลือกตำแหน่งแบบสุ่ม เป็นจำนวน 10 ครั้ง

3.6 การทดสอบการสึกหรอแบบ pin-on-disk

นำตัวอย่างมาทำการทดสอบการสึกหรอ โดยใช้เครื่องทดสอบ pin-on-disk ของบริษัท Implant Science Corporation รุ่น ISC 200 หัวกด (pin) เป็นบอลทังสเตนคาร์ไบด์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.35 mm กำหนดโหลด 200 gf รัศมีการเลื่อนไถล 5.0 mm อัตราเร็วการเลื่อนไถล 5.00 cm/s ระยะทางการเลื่อนไถลประมาณ 50 m จากนั้นทำการวัดขนาดความกว้างของรอยสึก แล้วคำนวณอัตราการสึกหรอของตัวอย่างซึ่งเป็นไปตามสมการ 3.1

$$\text{Disk wear rate} = \frac{\pi r_t w_t^3}{6 r_p d_s}, [20] \quad (3.1)$$

เมื่อ r_t คือ รัศมีการเลื่อนไถล (mm)

w_t คือ ความกว้างของรอยสึก (mm)

r_p คือ รัศมีของหัวกด (mm).

d_s คือ ระยะทางการเลื่อนไถล (mm)

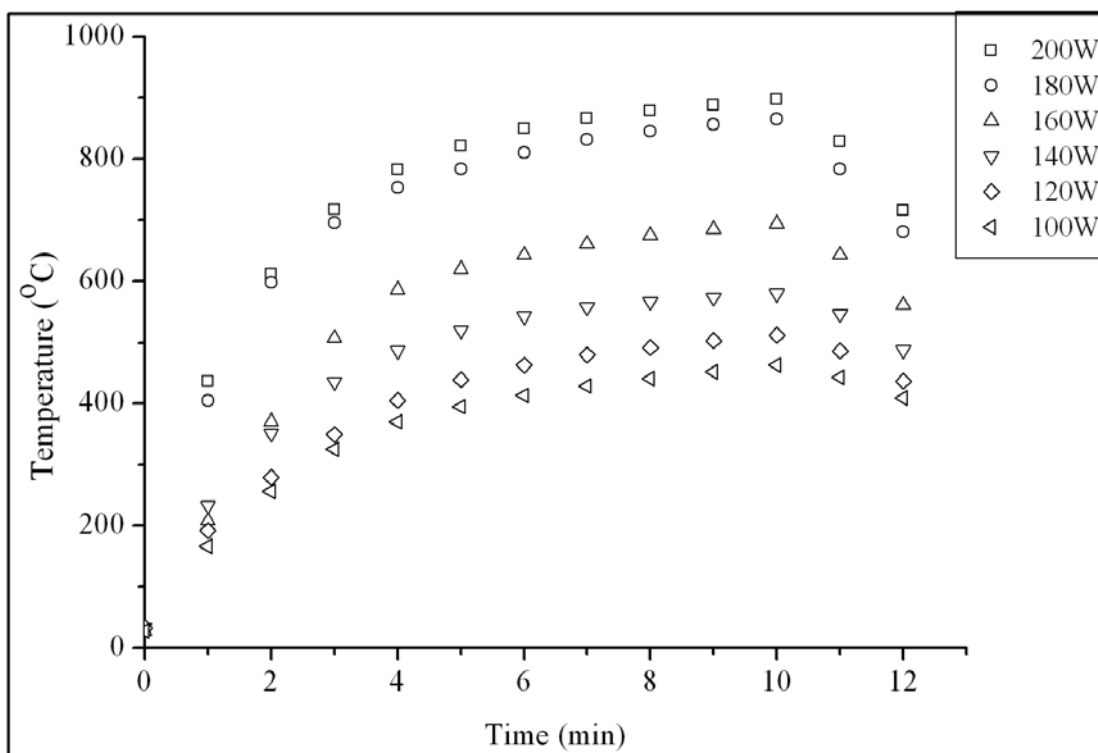
บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปราย

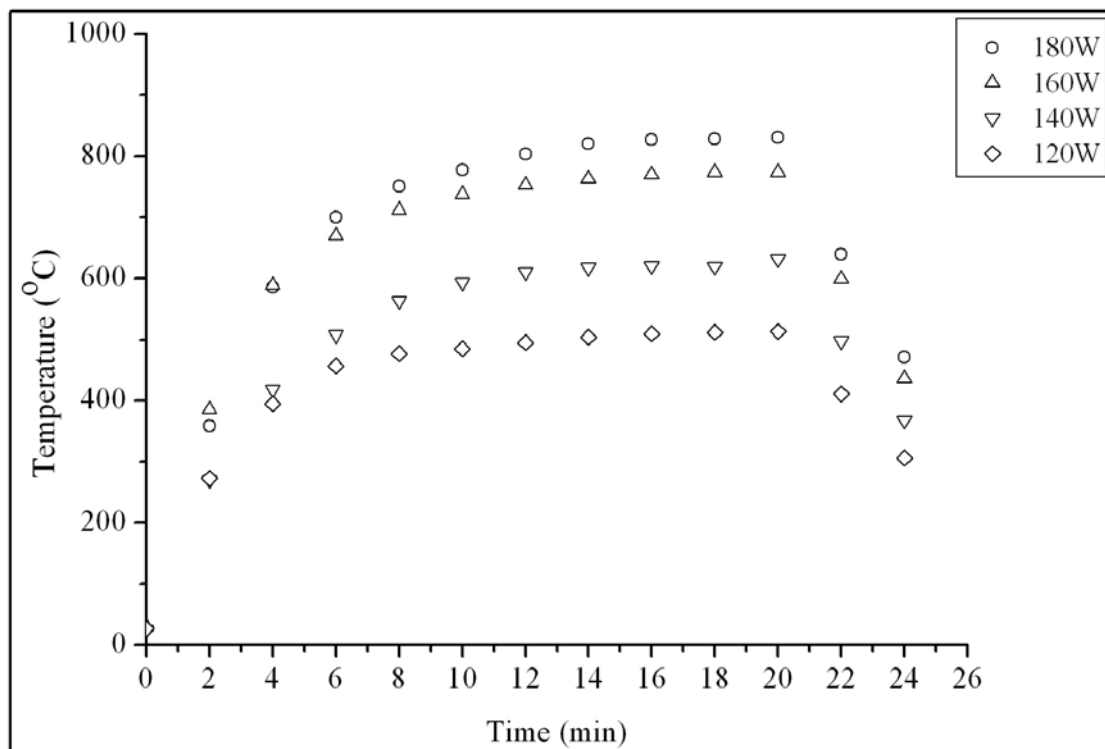
เนื้อหาในบทนี้อธิบายเกี่ยวกับผลการทดลอง ผลการวิเคราะห์ และผลการทดสอบ ตัวอย่างด้วยเทคนิคต่าง ๆ ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิในการสังเคราะห์ การวิเคราะห์แบบรูปการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด การกระจายพลังงานรังสีเอ็กซ์ ความแข็งจุลภาค และ อัตราการสึกหรอ

4.1 อุณหภูมิ

ในการทดลองพบว่า เมื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวอย่าง จะทำให้อุณหภูมิที่บริเวณท่อแก้วที่อยู่ใกล้กับตัวอย่าง ซึ่งถือว่ามีความสมดุลทางความร้อนกับตัวอย่างนั้น เพิ่มขึ้นตามเวลาในการสังเคราะห์ ดังแสดงในรูป 4.1 และ 4.2

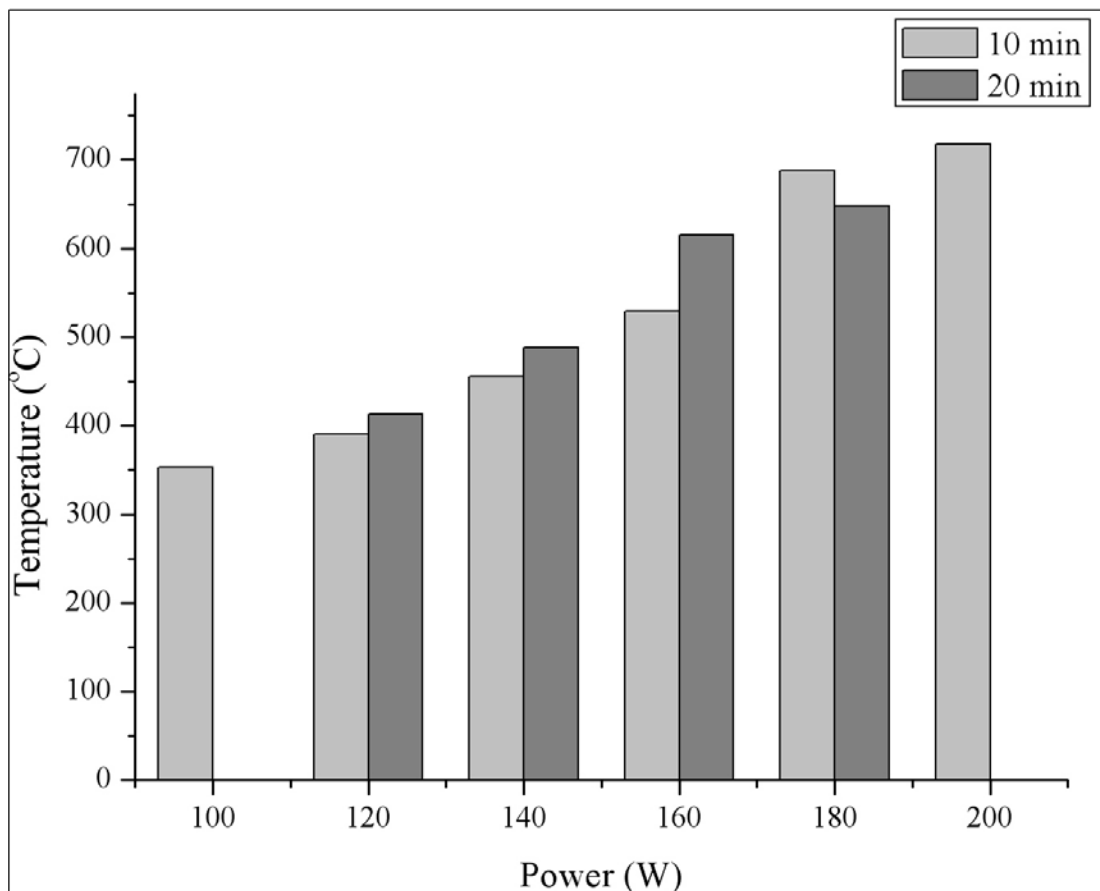


รูป 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการสังเคราะห์ของโลหะผสม Ti-52Al ที่ใช้เวลาการสังเคราะห์ 10 นาที



รูป 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการสังเคราะห์ของโลหะผสม Ti-52Al ที่ใช้เวลาการสังเคราะห์ 20 นาที

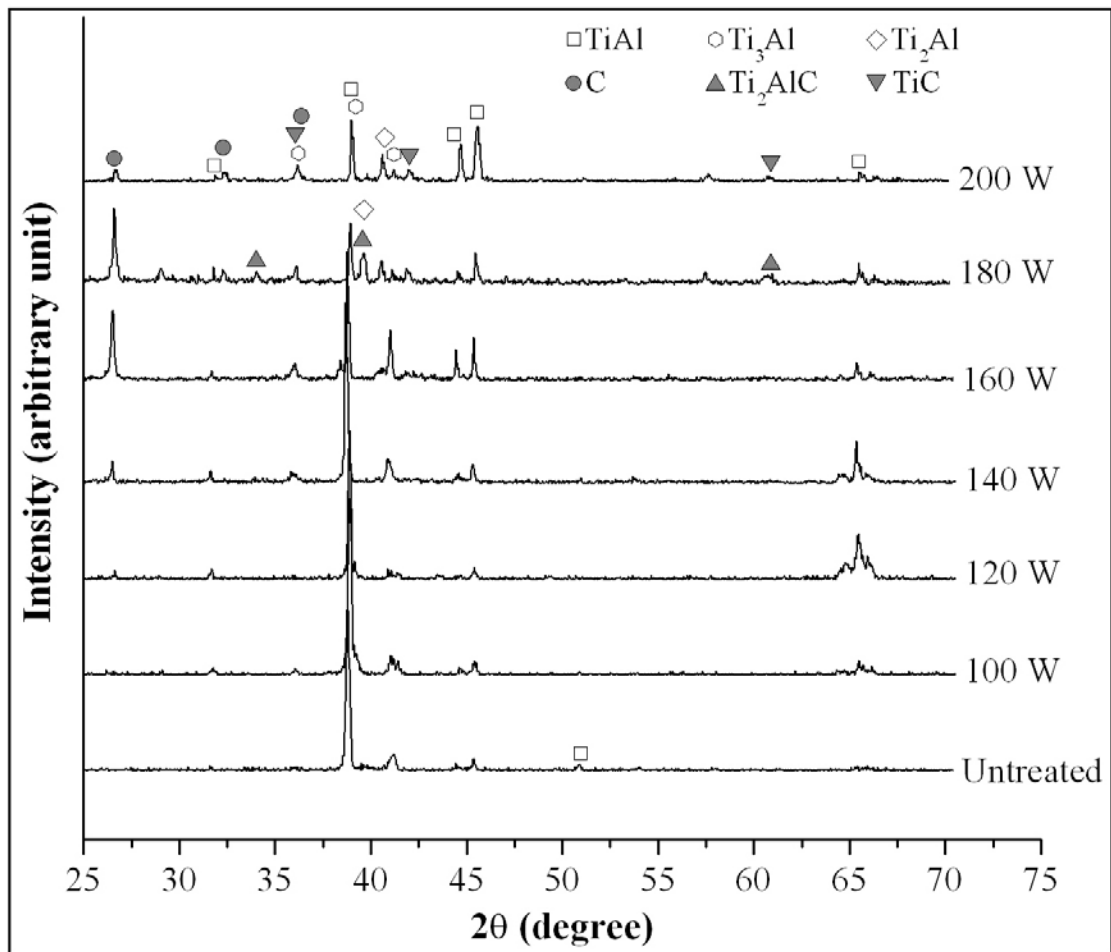
โดยลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของทั้งกรณีที่ใช้เวลาในการสังเคราะห์ 10 นาที และ 20 นาทีนั้น ต่างก็มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้น จากนั้นอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นได้ช้าลงเรื่อย ๆ สำหรับกรณีที่ใช้เวลาในการสังเคราะห์ 20 นาที อุณหภูมิจะเริ่มคงที่ในช่วงท้ายของการสังเคราะห์ หลังจากนั้นเมื่อทำการสังเคราะห์ครบตามเวลาที่กำหนดได้ทำการหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้า ทำให้อุณหภูมิลดลง ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิการสังเคราะห์นั้นเพิ่มขึ้นตามกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการสังเคราะห์ โดยค่าอุณหภูมิการสังเคราะห์โดยเฉลี่ยแสดงในรูป 4.3 เมื่อพิจารณาแนวโน้มโดยรวม พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยกรณีที่ใช้เวลาในการสังเคราะห์ 20 นาทีนั้น ที่มีค่าสูงกว่ากรณีที่ใช้เวลาในการสังเคราะห์ 10 นาที เล็กน้อย



รูป 4.3 อุณหภูมิการสังเคราะห์โดยเฉลี่ยเมื่อทำการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้าขนาดต่าง ๆ เป็นเวลา 10 และ 20 นาที

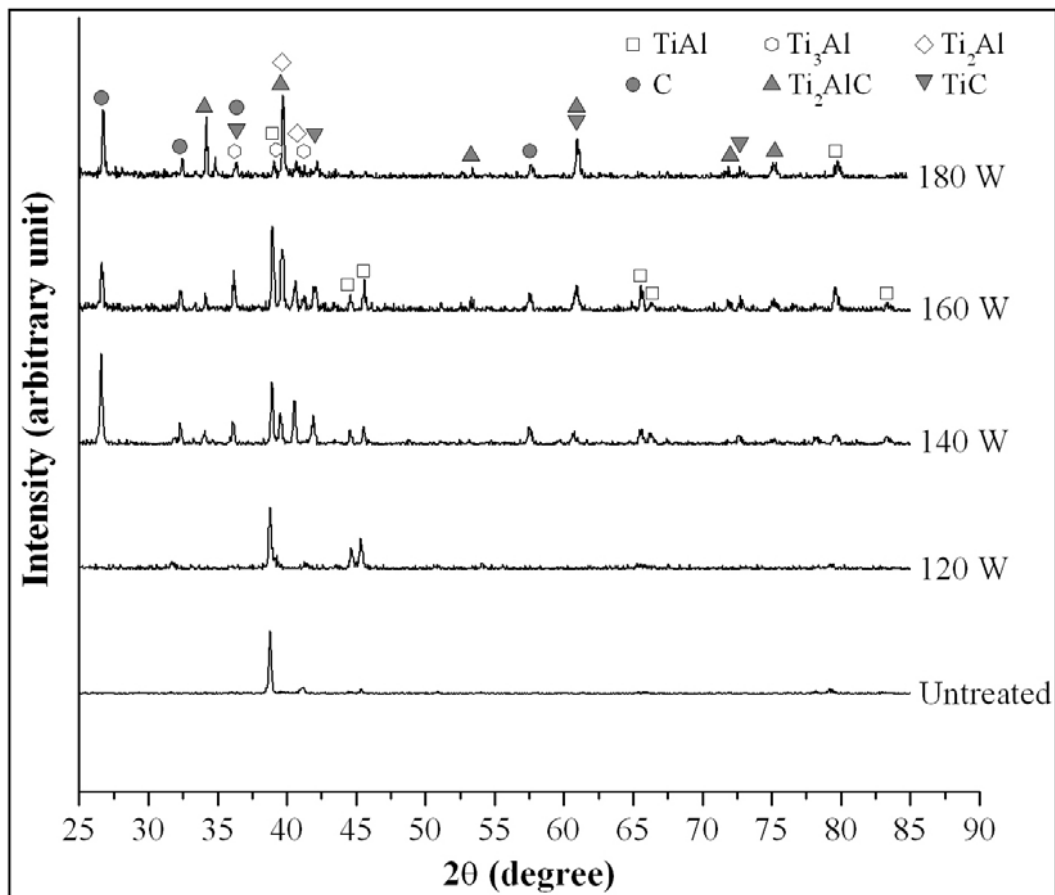
4.2 แบบรูปการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

รูป 4.4 และ 4.5 แสดงแบบรูปการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของโลหะผสม Ti-52Al ที่ไม่ผ่านและผ่านการสังเคราะห์โดยใช้เวลาในการสังเคราะห์ 10 และ 20 นาที ตามลำดับ รูป 4.4 แสดงให้เห็นว่า แบบรูปการเลี้ยวเบนของตัวอย่างที่ไม่ได้ผ่านการสังเคราะห์นั้นปรากฏพีคของ TiAl ขึ้นที่ตำแหน่ง 38.958° 44.370° 45.547° และ 65.495° นอกจากนี้ยังพบพีคของ Ti_3Al ที่ตำแหน่ง 40.894° ซึ่งสันนิษฐานว่าน่าจะเกิดจากอิทธิพลของธาตุต่าง ๆ ที่เจือปนในโลหะผสม สำหรับโลหะที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 100 W นั้น พบว่ามีพีคของ TiAl เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 31.820° นอกเหนือจากตำแหน่งที่เกิดขึ้นในโลหะผสมที่ไม่ได้ผ่านการสังเคราะห์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า โลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 100 W มีการเรียงตัวในระนาบ (110) มากขึ้น ส่วนแบบรูปการเลี้ยวเบนของโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 120 140 และ 160 W นั้นนอกจากปรากฏพีคของ TiAl เช่นเดียวกับกรณีของโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 100 W แล้ว ยังปรากฏพีคของ C (แกรไฟต์) ขึ้นที่ตำแหน่ง 26.603° และพีคของ Ti_3Al ที่ตำแหน่ง 38.784° และ 40.894°



รูป 4.4 แบบรูปการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของโลหะผสม Ti-52Al ที่ไม่ผ่านและผ่านการสังเคราะห์ โดยใช้กำลังไฟฟ้าขนาดต่าง ๆ เป็นเวลา 10 นาที

กรณีของโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 180 W นั้น นอกจากปรากฏฟีกของเฟส TiAl Ti_3Al และ C เช่นเดียวกับการณีของโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 160 W แล้ว ยังปรากฏฟีกของ Ti_2Al ที่ตำแหน่ง 39.637° และ 41.721° ฟีกของ Ti_2AlC ที่ตำแหน่ง 34.002° 39.546° และ 60.899° และฟีกของ TiC ที่ตำแหน่ง 36.343° 41.989° และ 60.899° ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้กำลังไฟฟ้าในการสังเคราะห์ 180 W จะทำให้มีอุณหภูมิในการสังเคราะห์ที่สูงมากพอที่จะทำให้เกิดการแพร่ของคาร์บอนเข้าสู่โลหะผสมมากขึ้น และมีปริมาณของคาร์บอนในโลหะผสมในระดับที่ทำให้เกิดเฟส Ti_2AlC และ TiC ได้ ส่วนกรณีของโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 200 W นั้น ได้ปรากฏฟีกของเฟส TiC เช่นเดียวกับการณีที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 180 W แต่ไม่ปรากฏฟีกของเฟส Ti_2AlC ขึ้น ซึ่งเชื่อว่าเป็นผลมาจากการที่มีปริมาณคาร์บอนในโลหะผสมมากขึ้นจึงทำให้เฟส TiC มีความเสถียรมากกว่าเฟส Ti_2AlC เนื่องจากเฟส TiC มีสัดส่วน C / Ti ที่สูงกว่า คือเป็น 1 / 1 ในขณะที่ของเฟส Ti_2AlC จะเป็น 1 / 2



รูป 4.5 แบบรูปการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของโลหะผสม Ti-52Al ที่ไม่ผ่านและผ่านการสังเคราะห์ โดยใช้กำลังไฟฟ้าขนาดต่าง ๆ เป็นเวลา 20 นาที

รูป 4.5 แสดงให้เห็นว่าแบบรูปการเลี้ยวเบนของโลหะผสม Ti-52Al ที่ไม่ได้ผ่านการสังเคราะห์นั้นปรากฏพีคของ TiAl ที่เด่นชัดขึ้นที่ตำแหน่ง 38.958° ซึ่งแสดงให้เห็นว่า โลหะผสม Ti-52Al ที่ยังไม่ได้ทำการสังเคราะห์นั้นมีการเรียงตัวในระนาบ (111) ส่วนแบบรูปการเลี้ยวเบนของโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 120 W นั้น มีพีคของ TiAl ปรากฏขึ้นที่ตำแหน่ง 44.370° และ 45.547° นอกเหนือจากที่ตำแหน่ง 38.958° ซึ่งแสดงให้เห็นว่า มีการเรียงตัวในระนาบ (002) และ (200) มากขึ้น

ในกรณีของโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 140 และ 160 W นั้น มีพีคของ TiAl ปรากฏขึ้นที่ตำแหน่ง 65.495° 66.388° 79.631° และ 83.307° นอกเหนือจากที่ตำแหน่ง 38.958° 44.370° และ 45.547° ซึ่งแสดงให้เห็นว่า โลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 140 และ 160 W นั้นมีการเรียงตัวในระนาบ (202) (220) และ (311) มากขึ้น นอกจากนี้ยังปรากฏพีคของ Ti_3Al ที่ตำแหน่ง 36.206° 39.205° และ 41.207° พีคของ Ti_2Al ที่ตำแหน่ง 39.637° และ 41.721° พีคของ Ti_2AlC ที่ตำแหน่ง 34.002° 39.546° 53.288° 60.899° 71.994° และ 75.206° พีคของ TiC ที่ตำแหน่ง 36.343° 41.989°

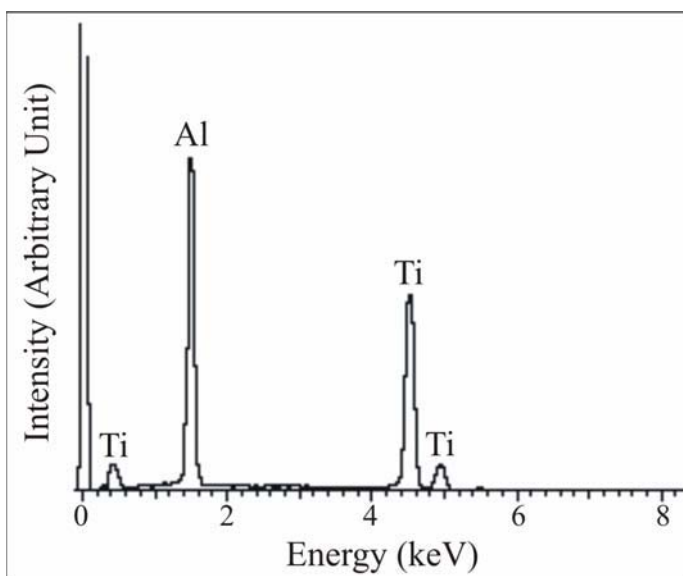
60.899° และ 72.675° และพีคของ C ที่ตำแหน่ง 32.292° 36.389° 60.899° และ 57.559° ตามลำดับ ซึ่งการปรากฏพีคของเฟสต่าง ๆ เหล่านี้ในโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 140 และ 160 W ล้วนเป็นผลมาจากการแพร่ของคาร์บอนเข้าสู่โลหะผสม Ti-52Al มากขึ้น เนื่องจากมีอุณหภูมิในการสังเคราะห์ที่สูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับ ผลการศึกษาของ Perdrix และคณะ [21] ที่พบว่าเมื่อมีปริมาณคาร์บอนในเฟส TiAl มากขึ้นจะทำให้มีสัดส่วนโดยปริมาตรของ Ti_3Al / TiAl มากขึ้น และเกิดเฟส Ti_2AlC ขึ้นเมื่อมีปริมาณคาร์บอนสูงเกินขีดจำกัดการละลายของเฟส Ti_3Al ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Tian และ Nemoto [22] โลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 180 W นั้นมีพีคของเฟสต่าง ๆ ปรากฏขึ้นเช่นเดียวกับในกรณีของ โลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 140 และ 160 W แต่พีคของ TiAl ที่ปรากฏที่ตำแหน่งต่าง ๆ กลับมีความเข้มต่ำเมื่อเทียบกับความเข้มของเฟสอื่น ๆ ซึ่งเชื่อน่าจะเกิดจากการแพร่ของคาร์บอนเข้าไปในโลหะผสม Ti-52Al มากขึ้น ส่งผลให้มีการเกิดเฟสอื่น ๆ บนโลหะผสมมากขึ้น จึงทำให้ปริมาณเฟส TiAl ที่บริเวณผิวมีน้อยลง

เมื่อพิจารณาแบบรูปการเลี้ยวเบนของโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 180 W เป็นเวลา 10 และ 20 นาที จะสังเกตได้ว่าพีคของ เฟส Ti_2AlC นั้นมีความเข้มที่สูงเมื่อเทียบกับโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้าขนาดอื่น ๆ ที่เวลาเท่ากัน ซึ่งจากผลดังกล่าวทำให้เชื่อได้ว่าการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 180 W มีอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเกิดเฟส Ti_2AlC

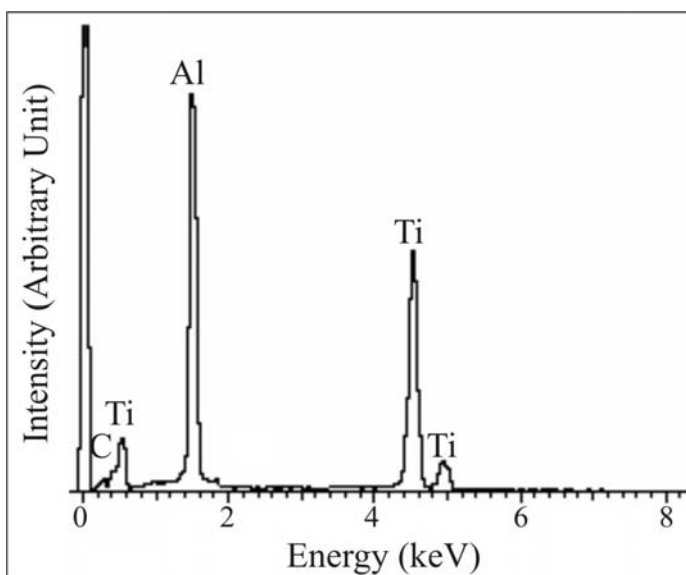
4.3 การกระจายพลังงานรังสีเอ็กซ์

รูป 4.6 ถึง 4.16 แสดงการกระจายพลังงานรังสีเอ็กซ์ของโลหะผสม Ti-52Al ที่ไม่ผ่านการสังเคราะห์ ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 100 120 140 160 180 และ 200 W เป็นเวลา 10 นาที และผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 120 140 160 และ 180 W เป็นเวลา 20 นาที ตามลำดับ จากการวิเคราะห์พบว่าโลหะผสม Ti-52Al ที่ไม่ผ่านการสังเคราะห์นั้นประกอบด้วยไทเทเนียมและอะลูมิเนียม ส่วนโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์นั้นจะประกอบด้วยไทเทเนียม อะลูมิเนียม และ คาร์บอน ซึ่งการปรากฏพีคของคาร์บอนขึ้นนั้นแสดงให้เห็นว่ามีการแพร่ของคาร์บอนเข้าสู่โลหะผสม Ti-52Al ในระหว่างการสังเคราะห์ โดยโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 100 120 และ 140 W เป็นเวลา 10 นาที และ 120 W เป็นเวลา 20 นาทีนั้น มีความเข้มพีคของคาร์บอนที่ต่ำมาก ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่ามีปริมาณคาร์บอนที่ต่ำ ในขณะที่โลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 160 180 และ 200 W เป็นเวลา 10 นาที และ 140 160 และ 180 W เป็นเวลา 20 นาทีนั้น มีความเข้มพีคของคาร์บอนที่สูงมากกว่าอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่ามีปริมาณคาร์บอนที่สูงกว่า ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าคาร์บอนสามารถแพร่เข้าสู่โลหะผสม Ti-52Al ได้มากขึ้นเมื่อ

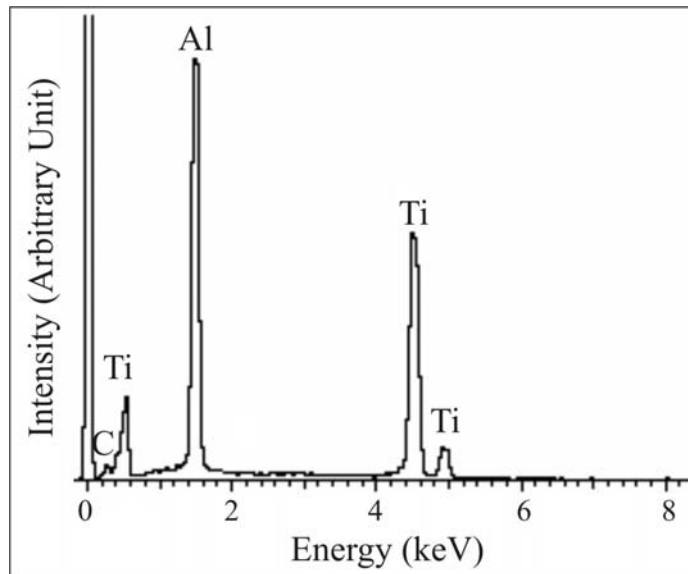
ใช้กำลังไฟฟ้าในการสังเคราะห์สูงขึ้น และ/หรือ ใช้เวลาในการสังเคราะห์มากขึ้น โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ในรูป 4.4 และ 4.5 จะเห็นได้ถึงความสอดคล้องกัน ส่วนกรณีที่แบบรูปการเลี้ยวเบนของโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 200 W เป็นเวลา 10 นาที มีความเข้มพีคของ C (แกรไฟต์) ที่ต่ำ แต่ในสเปกตรัมการกระจายพลังงานรังสีเอ็กซ์กลับมีความเข้มพีคของคาร์บอนที่สูงนั้น แสดงให้เห็นว่าคาร์บอนส่วนใหญ่อยู่ในรูปของอสัณฐาน มีเพียงส่วนน้อยที่ปรากฏในรูปของแกรไฟต์



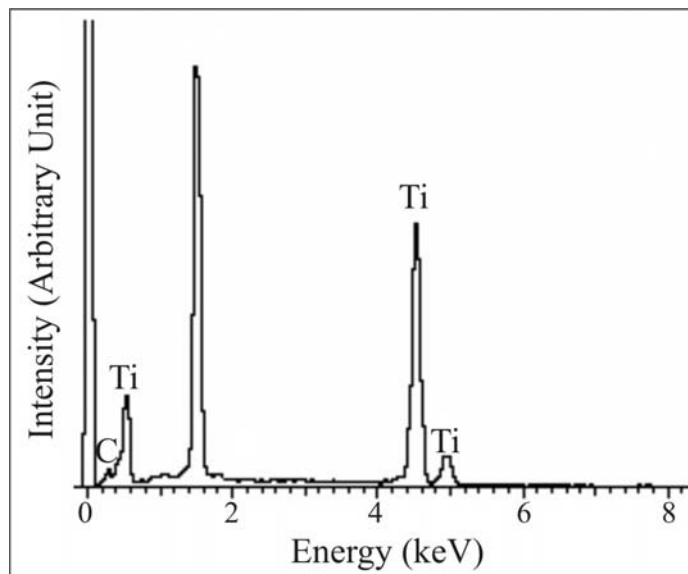
รูป 4.6 การกระจายพลังงานรังสีเอ็กซ์ของโลหะผสม Ti-52Al ที่ไม่ผ่านการสังเคราะห์



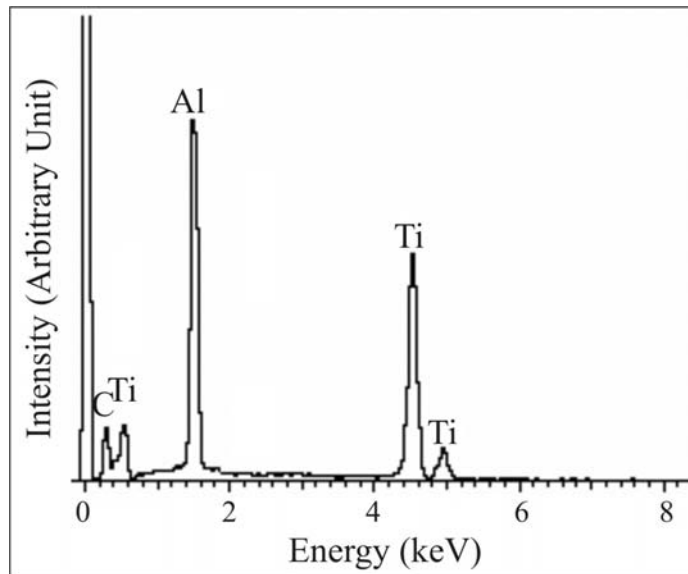
รูป 4.7 การกระจายพลังงานรังสีเอ็กซ์ของโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 100 W เป็นเวลา 10 นาที



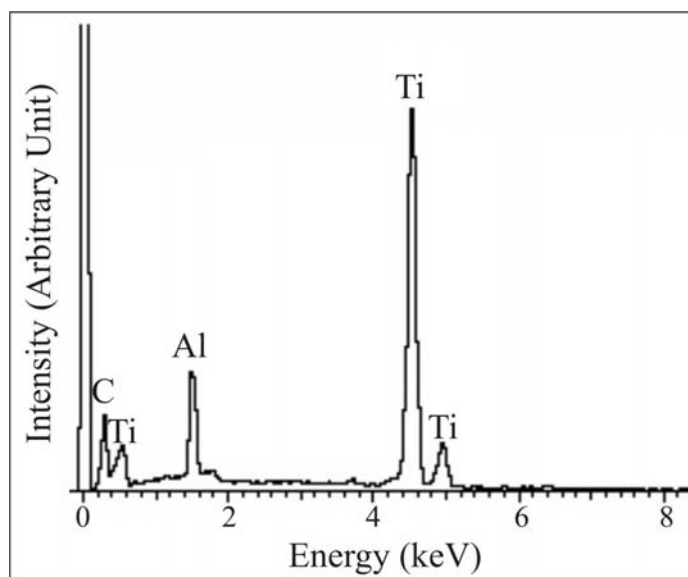
รูป 4.8 การกระจายพลังงานรังสีเอ็กซ์ของโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 120 W เป็นเวลา 10 นาที



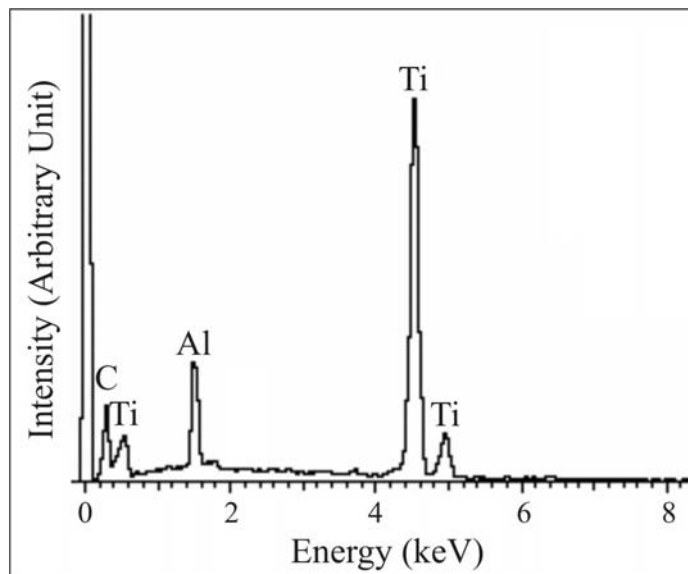
รูป 4.9 การกระจายพลังงานรังสีเอ็กซ์ของโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 140 W เป็นเวลา 10 นาที



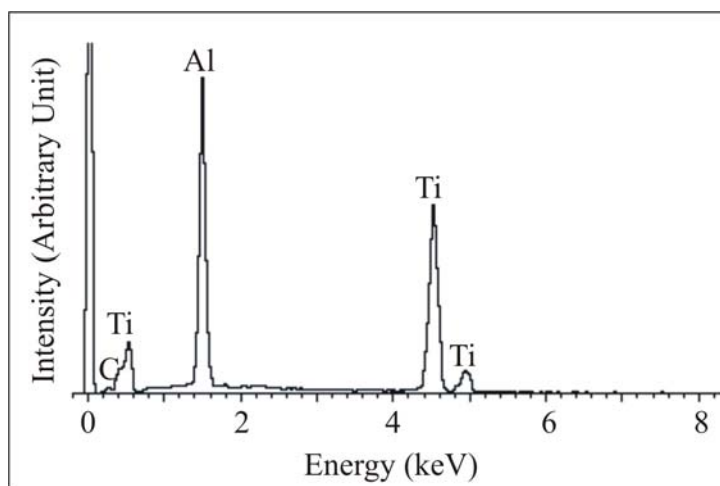
รูป 4.10 การกระจายพลังงานรังสีเอ็กซ์ของโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 160 W เป็นเวลา 10 นาที



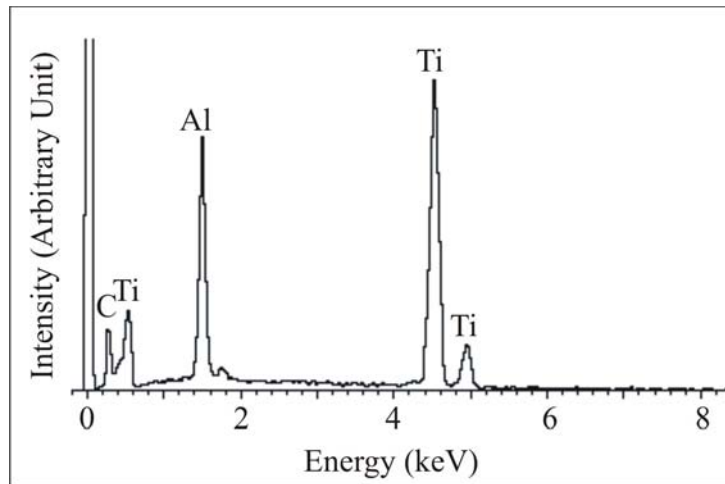
รูป 4.11 การกระจายพลังงานรังสีเอ็กซ์ของโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 180 W เป็นเวลา 10 นาที



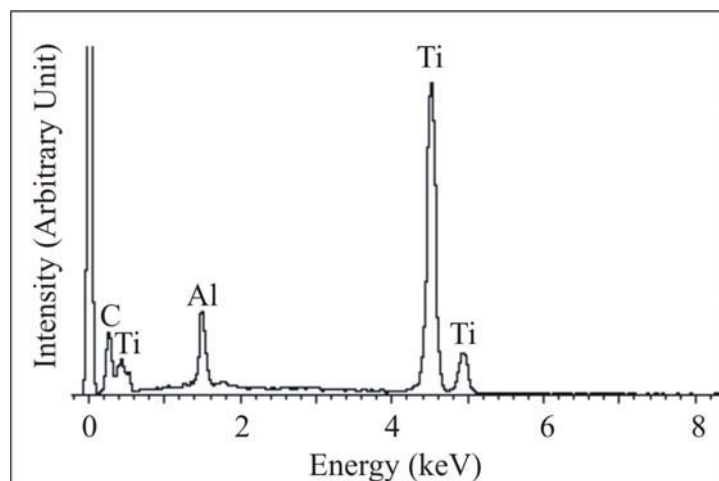
รูป 4.12 การกระจายพลังงานรังสีเอ็กซ์ของโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 200 W เป็นเวลา 10 นาที



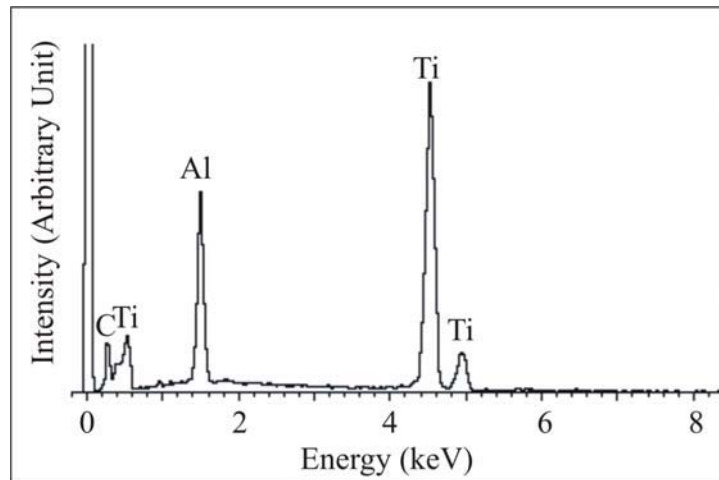
รูป 4.13 การกระจายพลังงานรังสีเอ็กซ์ของโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 120 W เป็นเวลา 20 นาที



รูป 4.14 การกระจายพลังงานรังสีเอ็กซ์ของโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 140 W เป็นเวลา 20 นาที



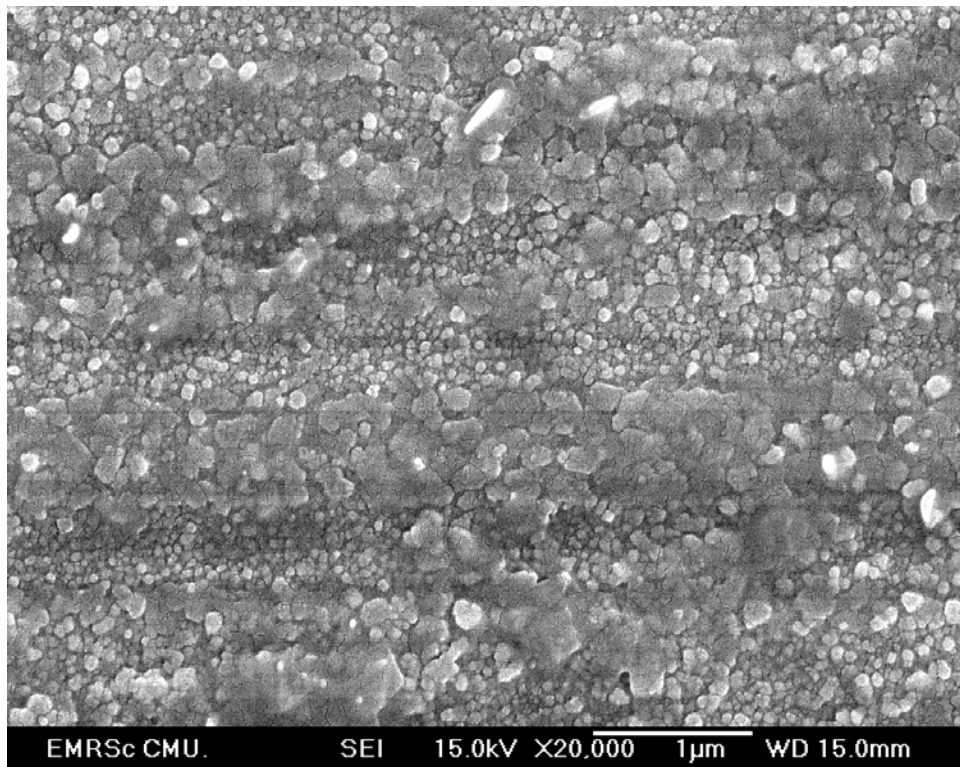
รูป 4.15 การกระจายพลังงานรังสีเอ็กซ์ของโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 160 W เป็นเวลา 20 นาที



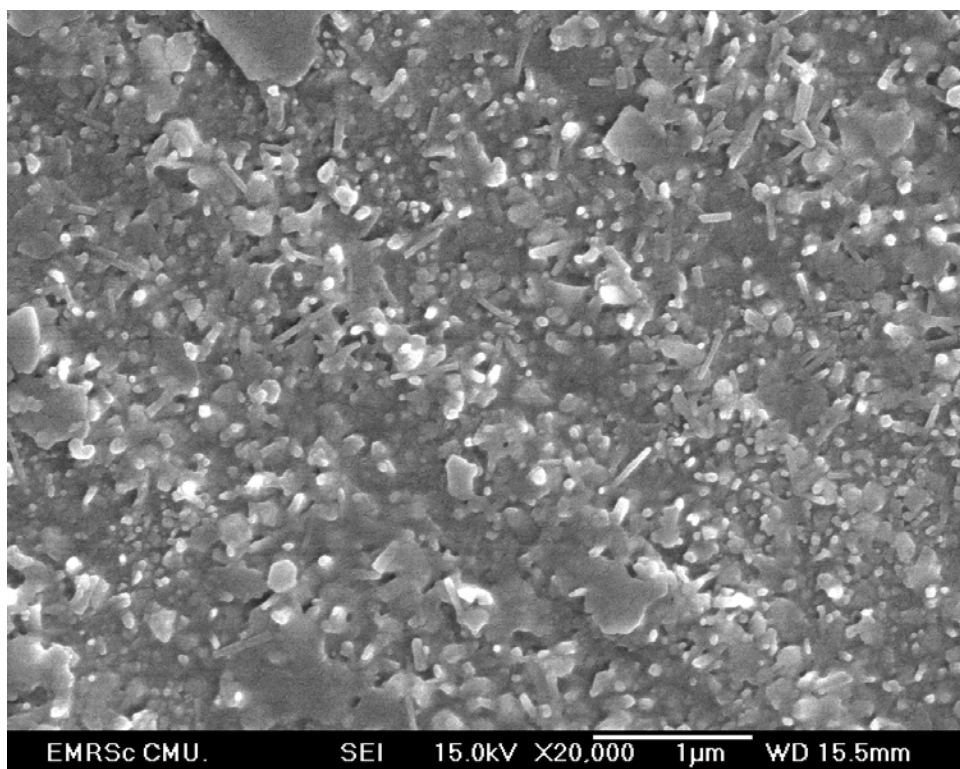
รูป 4.16 การกระจายพลังงานรังสีเอกซ์ของโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 180 W เป็นเวลา 20 นาที

4.4 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

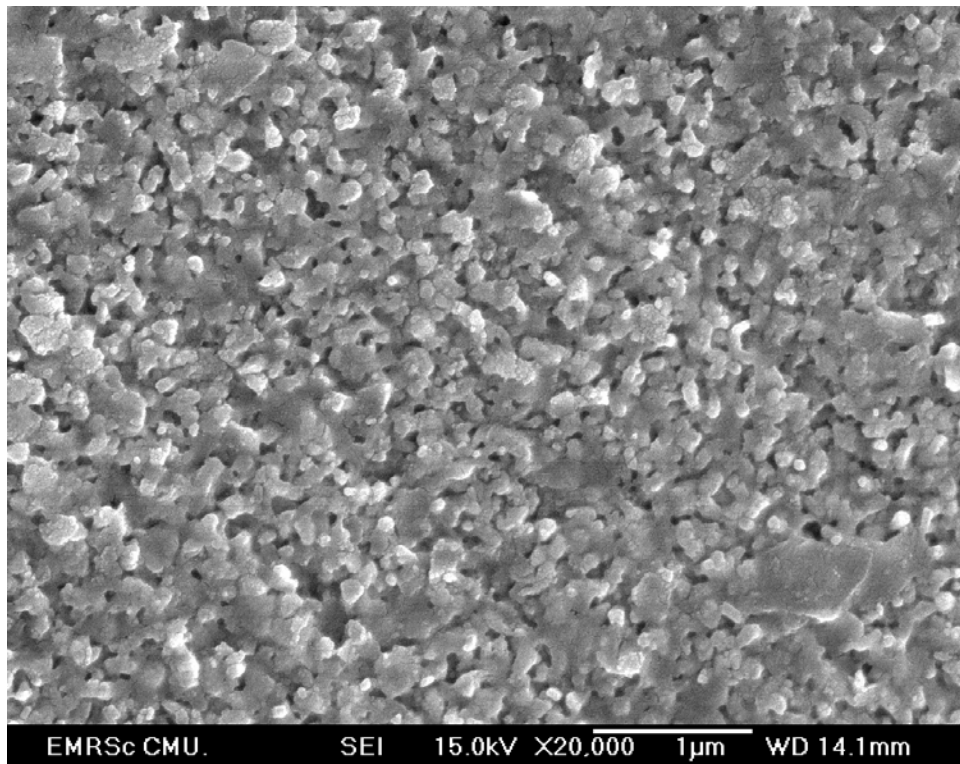
ลักษณะพื้นผิวของโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 100 120 140 160 180 และ 200 W เป็นเวลา 10 นาที และผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 120 140 160 และ 180 W เป็นเวลา 20 นาที แสดงไว้ในรูป 4.17 ถึง 4.26 ตามลำดับ ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงให้เห็นว่า พื้นผิวของโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้าต่ำนั้นมีขนาดเกรนเล็กและมีรูพรุนน้อย ในขณะที่ผิวของโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้าสูงนั้นมีขนาดเกรนใหญ่และมีรูพรุนมากขึ้น นอกจากนี้โลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 100 และ 120 W เป็นเวลา 10 นาที และ 120 W เป็นเวลา 20 นาที นั้น ยังมีลักษณะเกรนที่มีขนาดเล็กและไม่สม่ำเสมอ โดยเฉพาะในกรณีของโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 120 W เป็นเวลา 10 นาที นั้น ปรากฏลักษณะของเกรนที่มีรูปร่างหลายแบบ มีทั้งที่มีรูปร่างเป็นก้อนเป็นแผ่น และรูปร่างคล้ายเข็ม ซึ่งลักษณะต่าง ๆ เหล่านี้สะท้อนให้เห็นถึงความไม่สม่ำเสมอของผิวโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้าต่ำ โดยกรณีของโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 120 W เป็นเวลา 20 นาที นั้นมีลักษณะเกรนที่มีความสม่ำเสมอมากที่สุดในตัวอย่างทั้ง 3 สภาวะที่นำมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่า เมื่อใช้เวลาในการสังเคราะห์มากขึ้น จะทำให้ลักษณะพื้นผิวของโลหะผสมดังกล่าว มีความสม่ำเสมอมากขึ้น นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวของโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 160 และ 180 W เป็นเวลา 10 นาที กับที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้าที่เท่ากันเป็นเวลา 20 นาที พบว่ากรณีที่ใช้เวลาสังเคราะห์ 10 นาทีจะมีรูพรุนมากกว่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เมื่อใช้เวลาในการสังเคราะห์มากขึ้นจะทำให้เกรนบริเวณผิวมีการบรรจุตัวกันแน่นขึ้นและมีรูพรุนน้อยลง



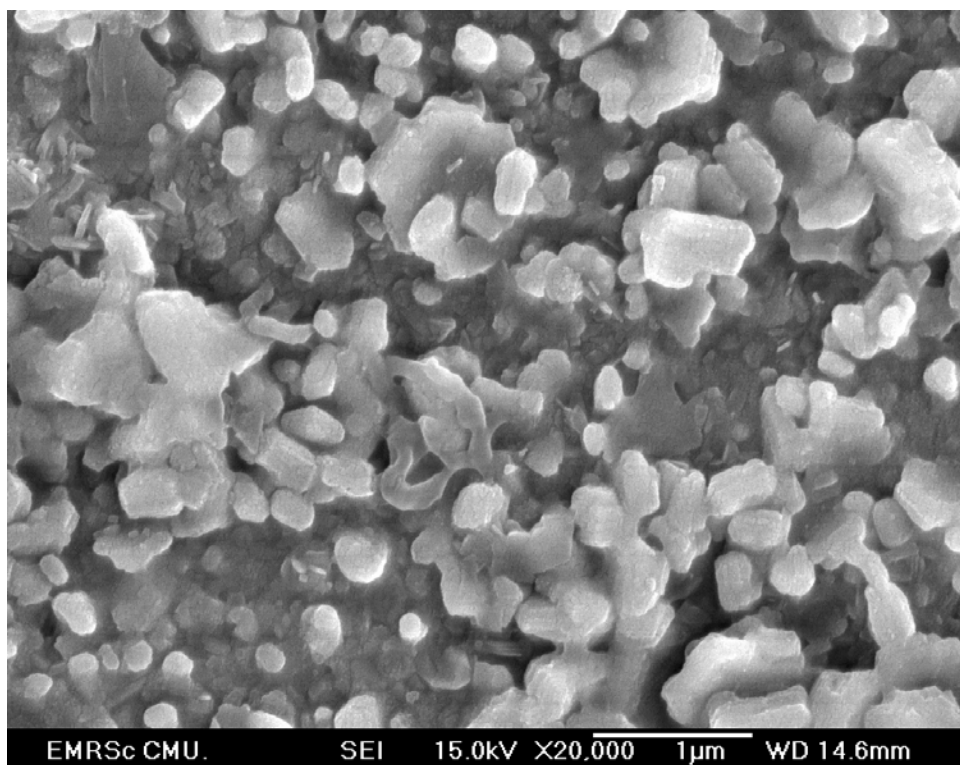
รูป 4.17 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 100 W เป็นเวลา 10 นาที



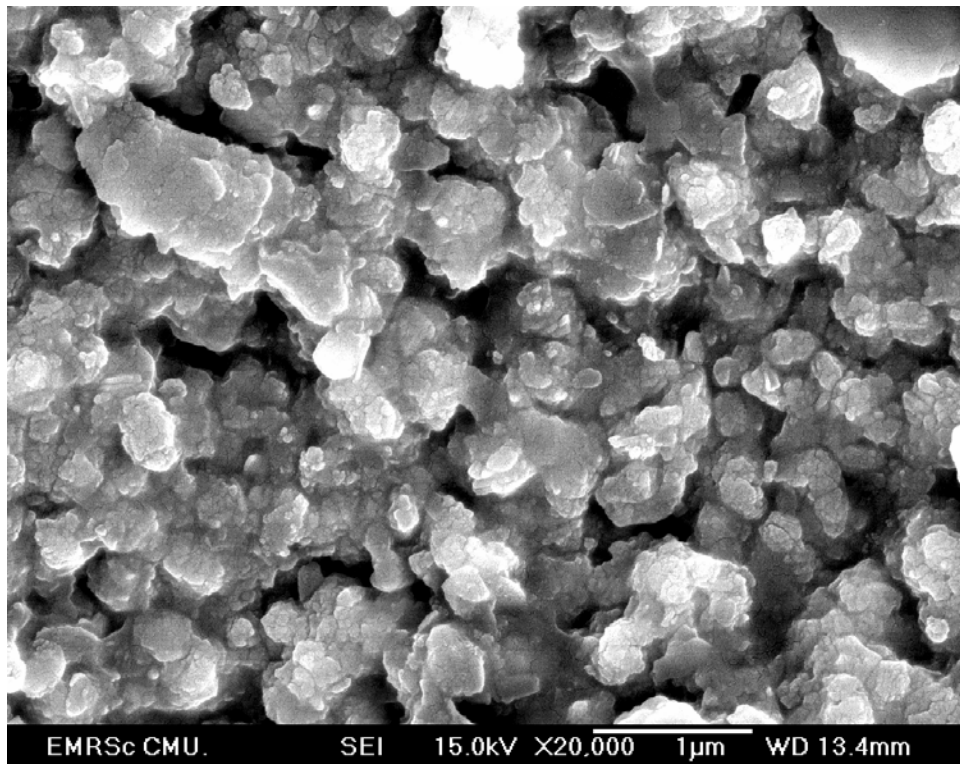
รูป 4.18 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 120 W เป็นเวลา 10 นาที



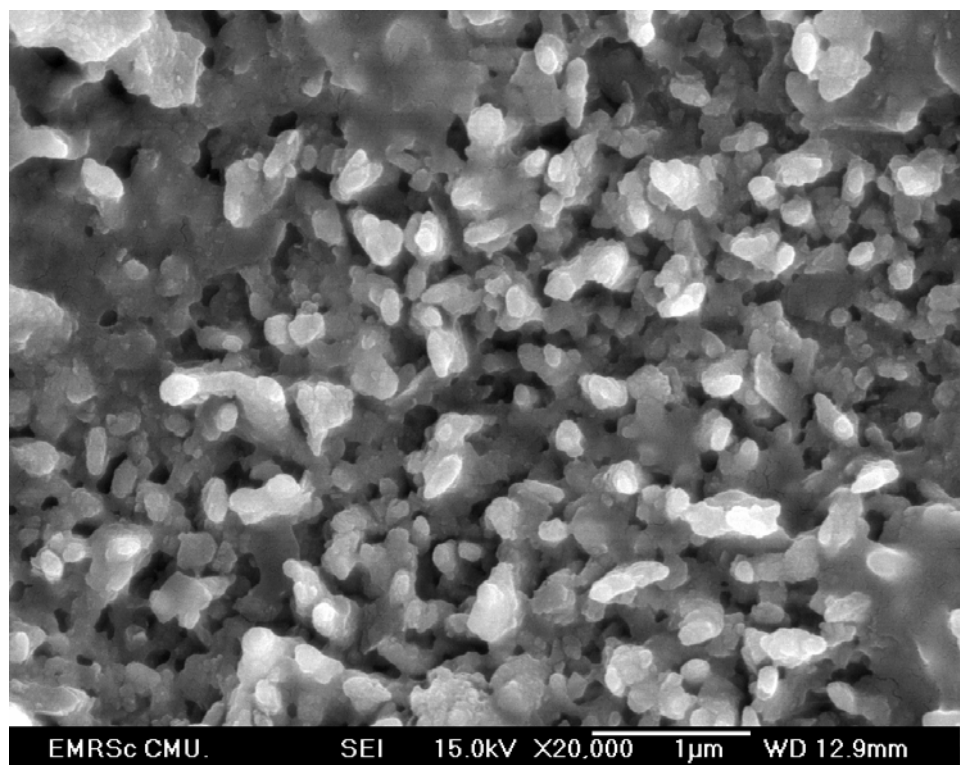
รูป 4.19 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 140 W เป็นเวลา 10 นาที



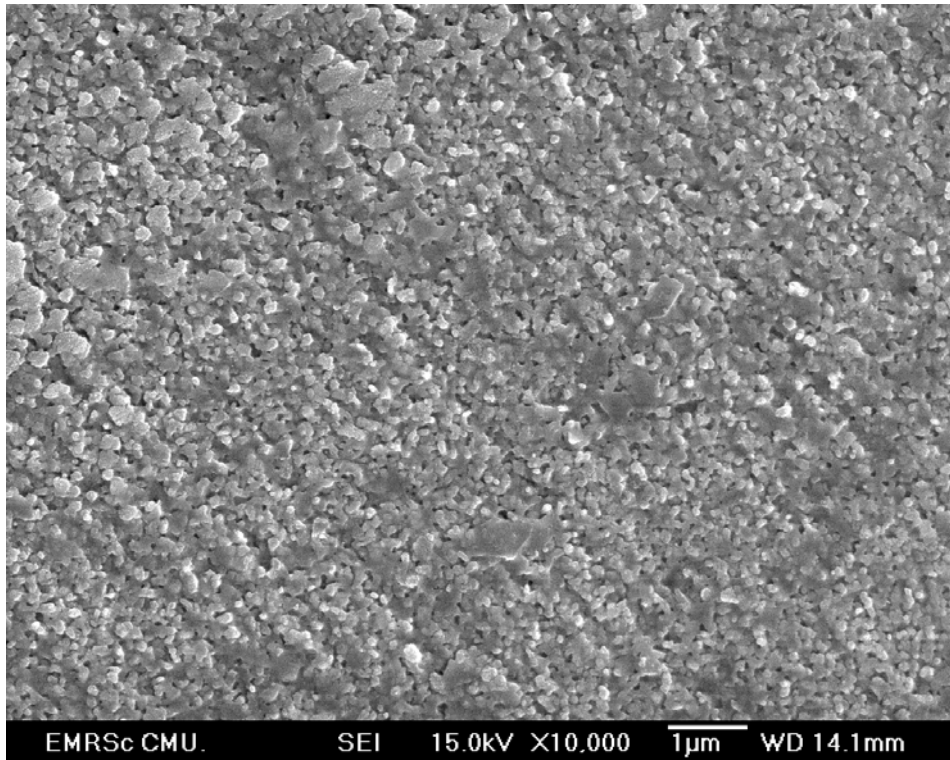
รูป 4.20 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 160 W เป็นเวลา 10 นาที



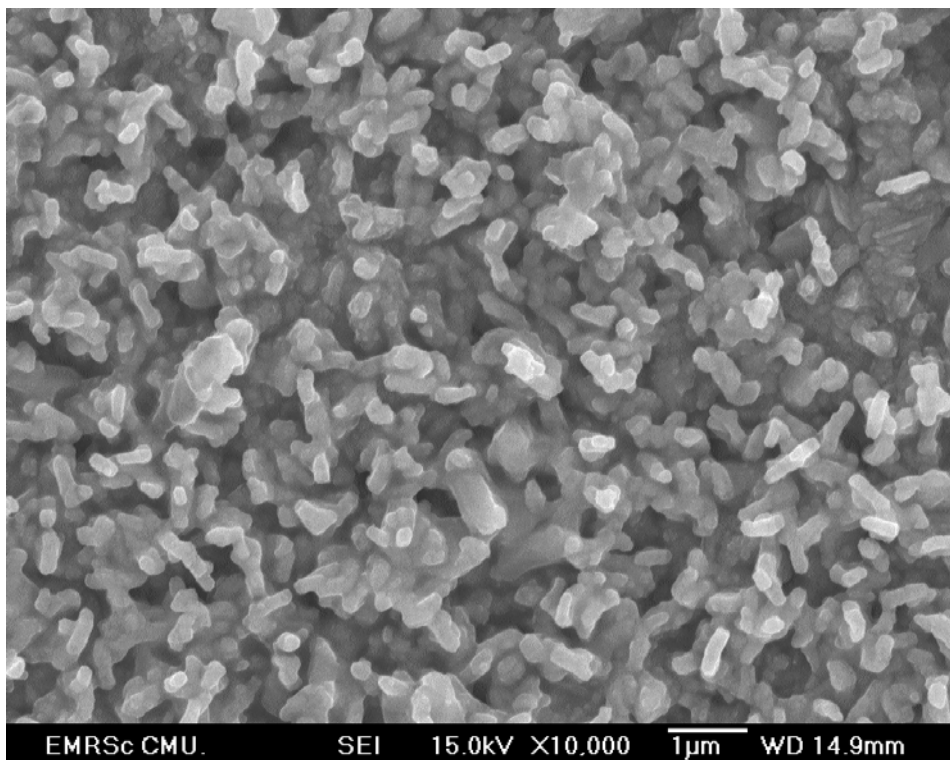
รูป 4.21 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 180 W เป็นเวลา 10 นาที



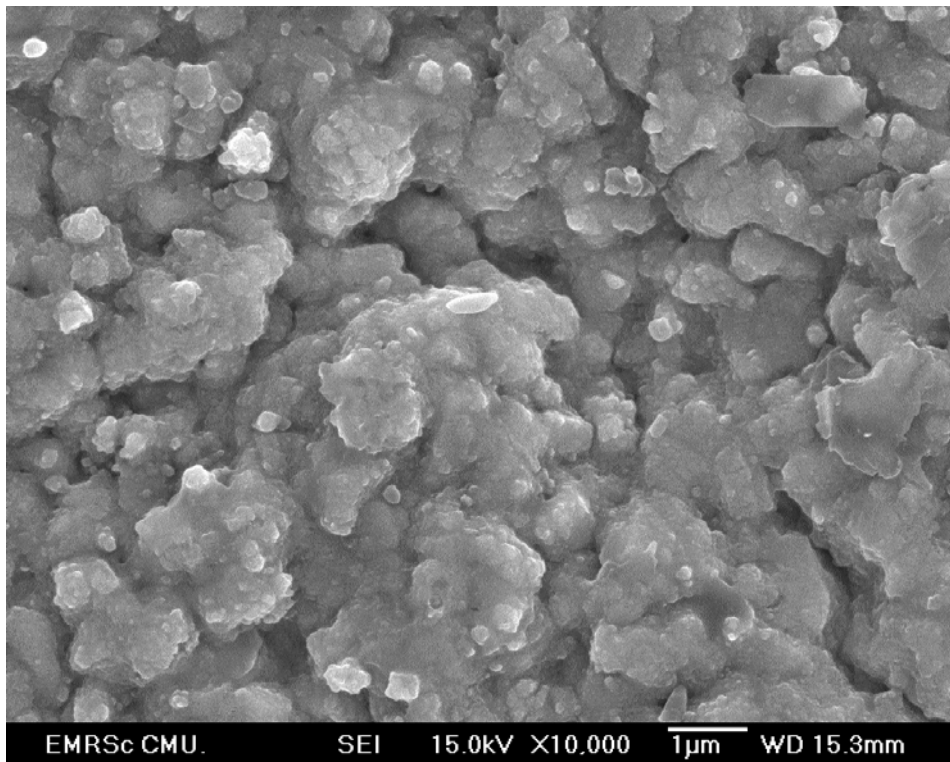
รูป 4.22 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 200 W เป็นเวลา 10 นาที



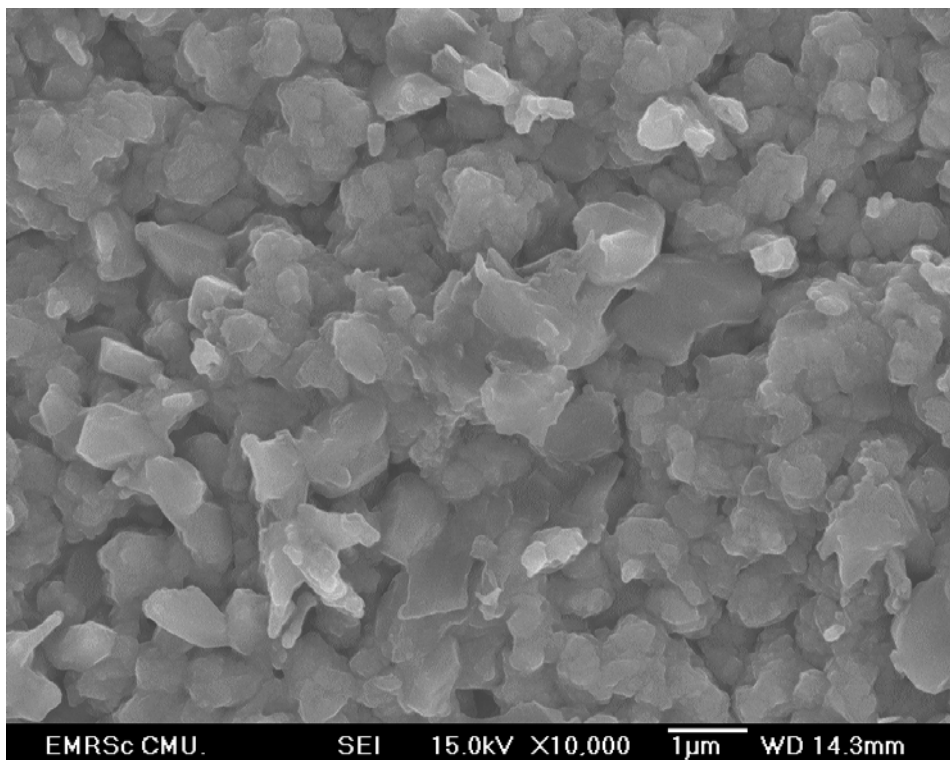
รูป 4.23 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 120 W เป็นเวลา 20 นาที



รูป 4.24 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 140 W เป็นเวลา 20 นาที

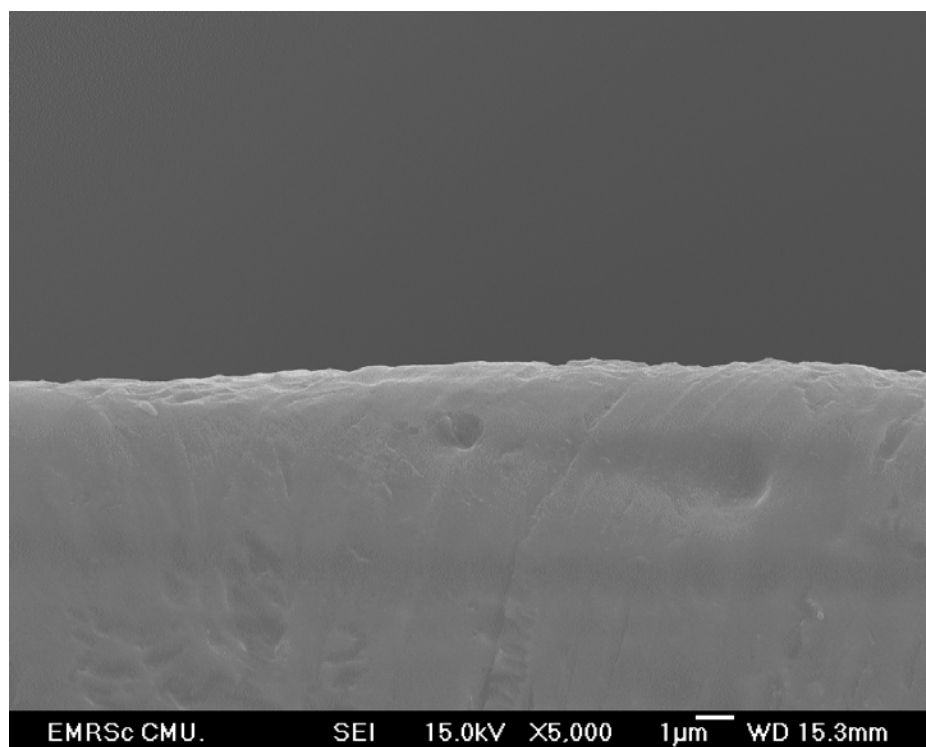


รูป 4.25 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 160 W เป็นเวลา 20 นาที

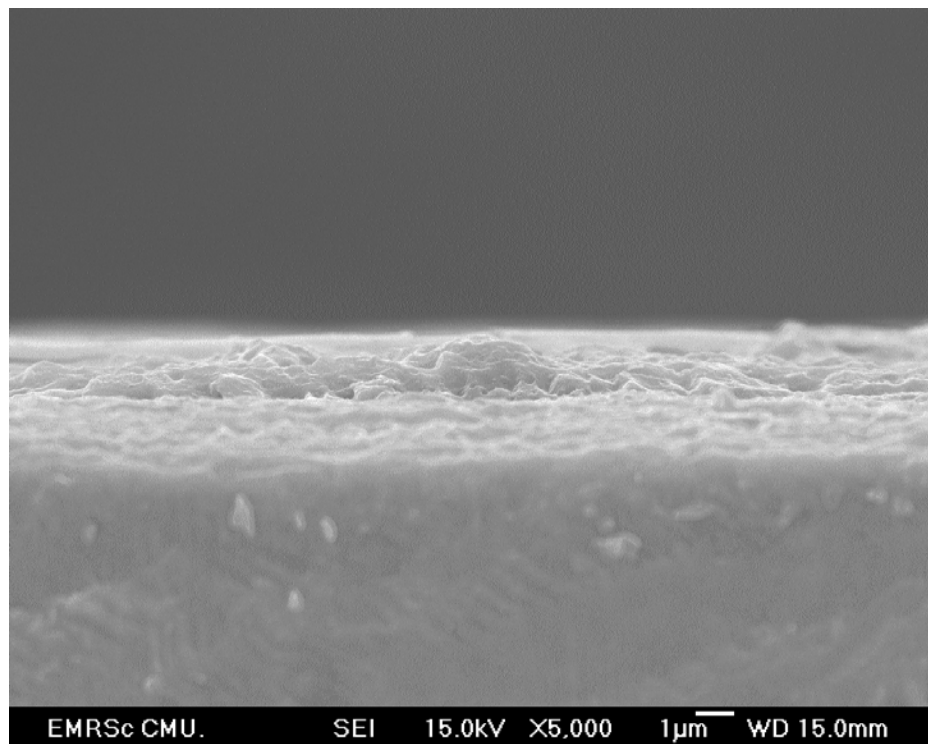


รูป 4.26 ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 180 W เป็นเวลา 20 นาที

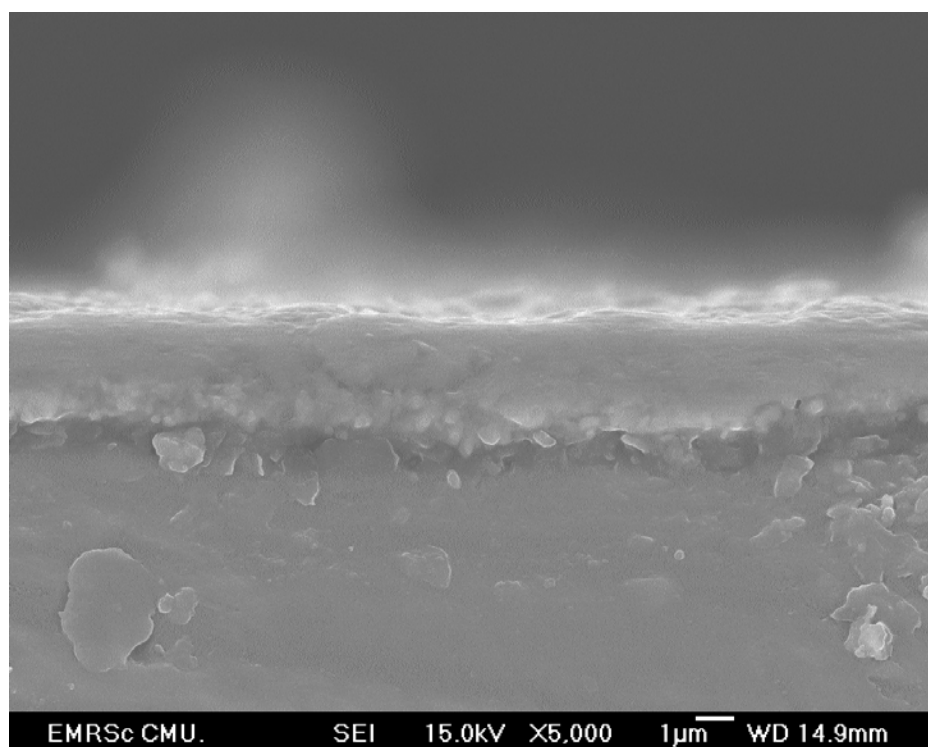
รูป 4.27 ถึง 4.31 แสดงภาคตัดขวางโลหะผสม Ti-52Al ที่ไม่ผ่านและผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 120 140 160 และ 180 W เป็นเวลา 20 นาที ตามลำดับ ภาพภาคตัดขวางแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างชัดเจนระหว่างโลหะผสม Ti-52Al ที่ไม่ผ่านการสังเคราะห์และที่ผ่านการสังเคราะห์ โดยโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์จะปรากฏชั้นของฟิล์มเคลือบขึ้นอย่างชัดเจน โดยผลการวัดความหนาของชั้นเคลือบของโลหะผสม Ti-52Al ที่ไม่ผ่านและผ่านการคาร์บูไรเซชัน แสดงในรูป 4.32 ซึ่งผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ความหนาของฟิล์มเคลือบนั้นเพิ่มขึ้นตามกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการสังเคราะห์ และเป็นไปตามทฤษฎีการแพร่ตามสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius Equation) ที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวถูกละลายแบบแทรก (interstitial solute) จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ [23-24] ทำให้คาร์บอนสามารถแพร่เข้าสู่โลหะผสม Ti-52Al ได้มากขึ้น โดยผลความหนาของฟิล์มเคลือบดังกล่าวมีความสอดคล้องกับผลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ที่มีความเข้มพีคของเฟส TiAl ต่ำ ในกรณีของโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 180 W เป็นเวลา 20 นาที ซึ่งเชื่อว่าเกิดจากรังสีเอ็กซ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์นั้น สามารถผ่านลงไปถึงระดับความลึกที่บริเวณชั้นฐานซึ่งเป็นเฟส TiAl ที่อยู่ใต้ฟิล์มเคลือบ เพียงเล็กน้อยเท่านั้น



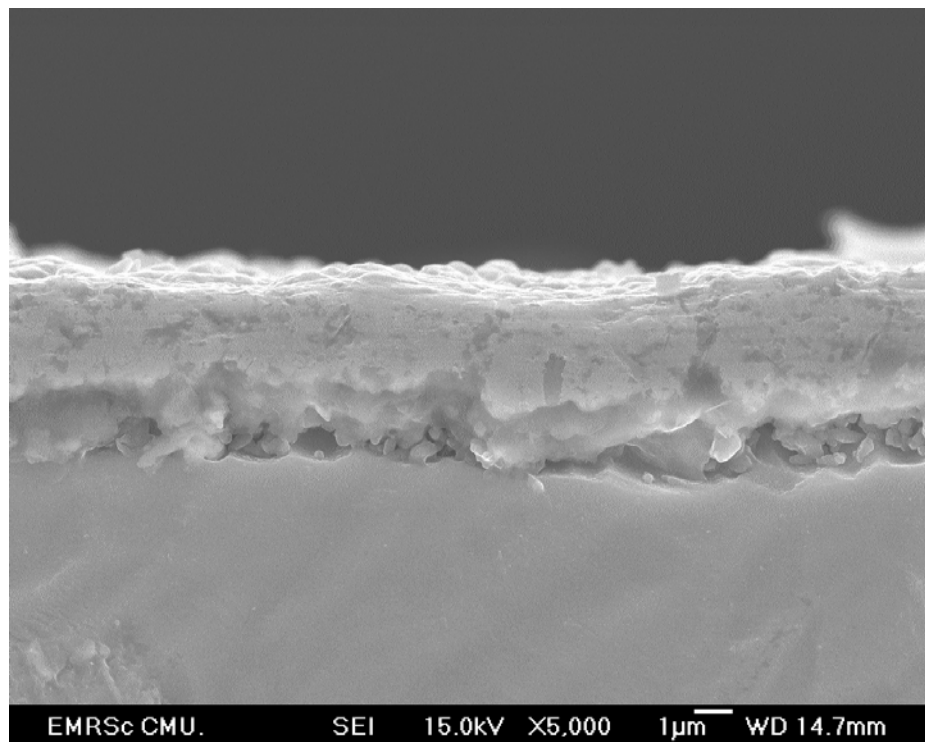
รูป 4.27 ภาพภาคตัดขวางของโลหะผสม Ti-52Al ที่ไม่ผ่านการสังเคราะห์



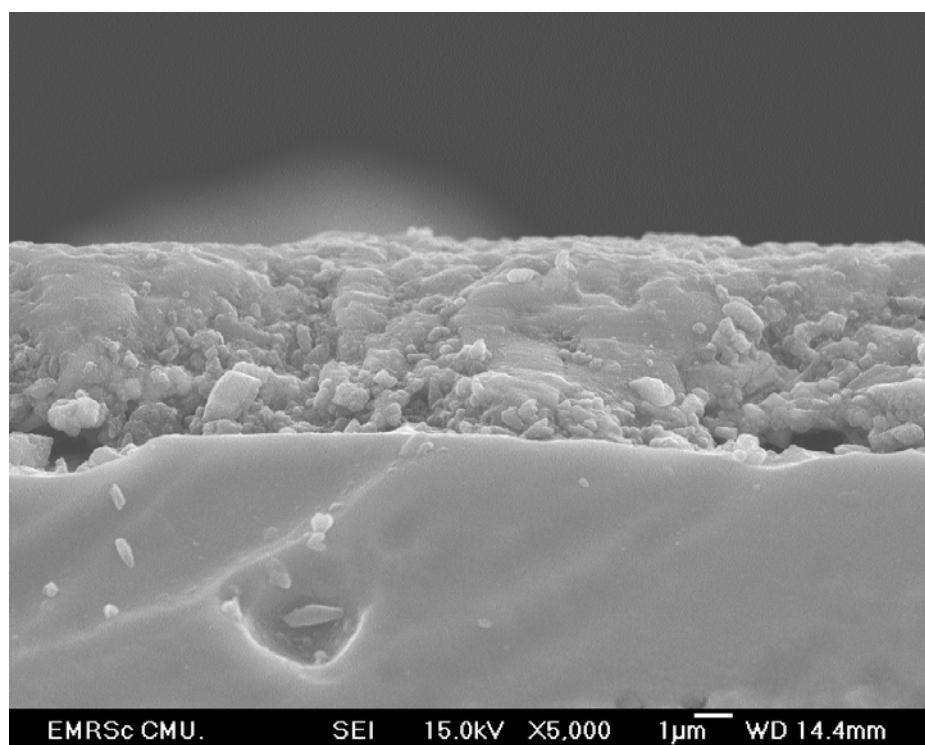
รูป 4.28 ภาพภาคตัดขวางของโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 120 W เป็นเวลา 20 นาที



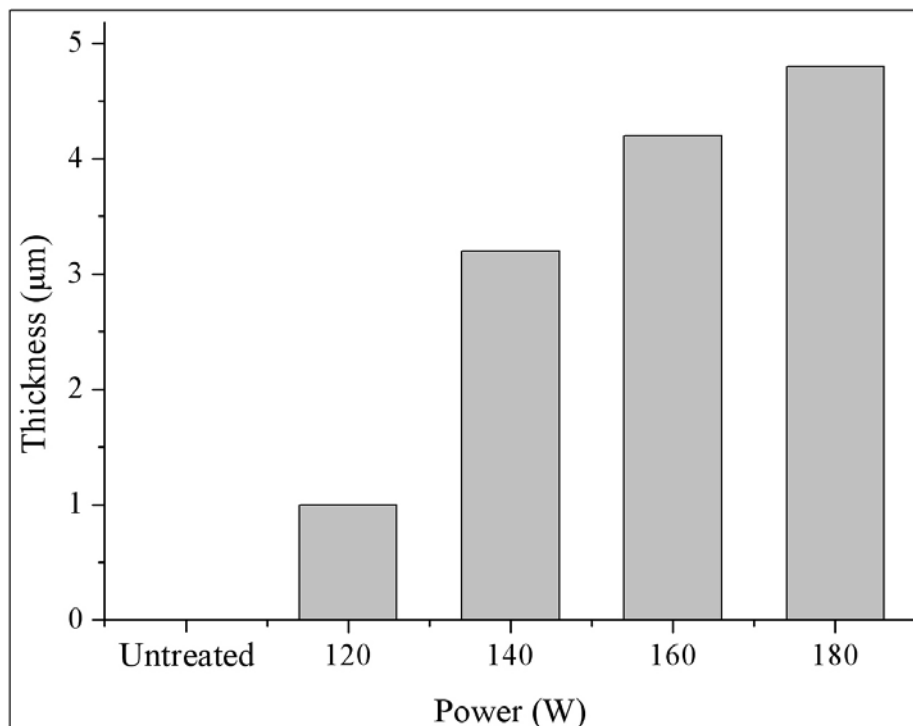
รูป 4.29 ภาพภาคตัดขวางของโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 140 W เป็นเวลา 20 นาที



รูป 4.30 ภาพภาคตัดขวางของโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 160 W เป็นเวลา 20 นาที



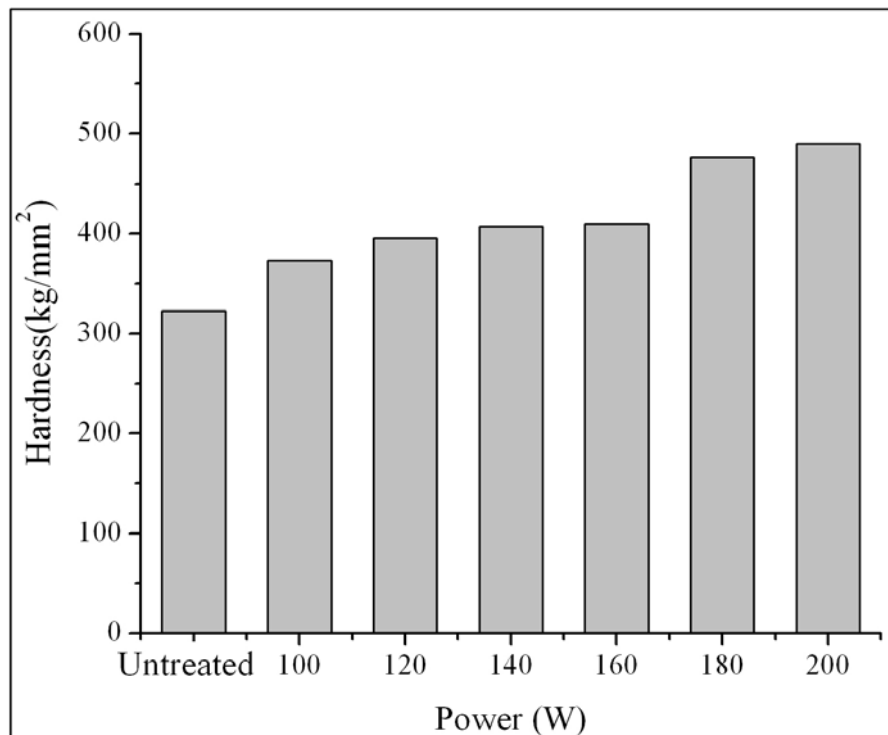
รูป 4.31 ภาพภาคตัดขวางของโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 180 W เป็นเวลา 20 นาที



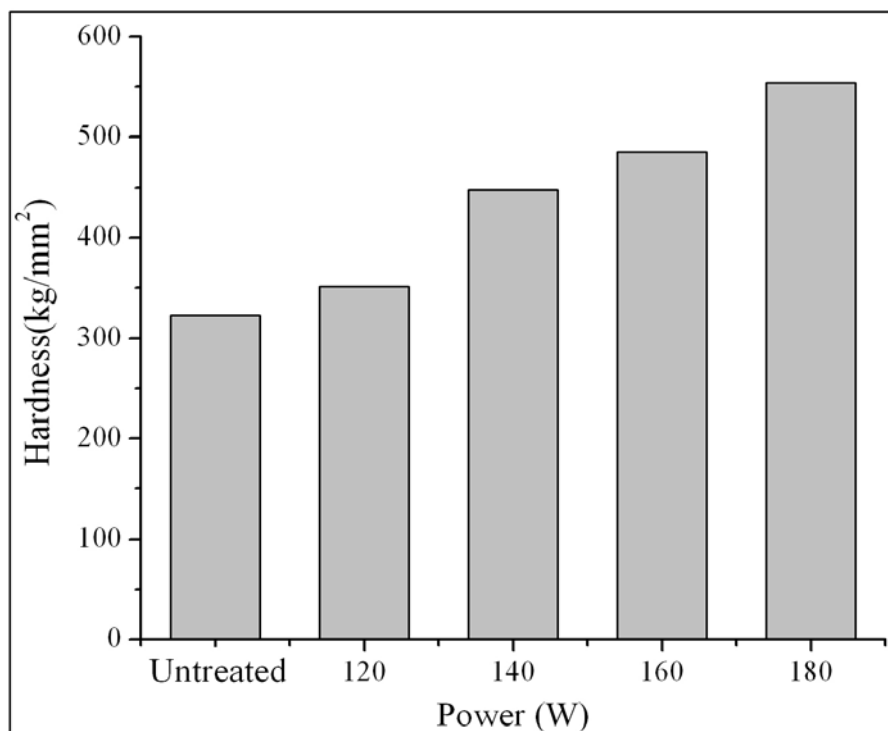
รูป 4.32 ความหนาของฟิล์มเคลือบบนโลหะผสม Ti-52Al ที่ไม่ผ่านและผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 120 140 160 และ 180 W เป็นเวลา 20 นาที

4.5 ความแข็งจุลภาค

ผลการทดสอบความแข็งจุลภาคของโลหะผสม Ti-52Al ที่ไม่ผ่านและผ่านการสังเคราะห์เป็นเวลา 10 นาทีและ 20 นาทีแสดงไว้ในรูป 4.33 และ 4.34 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์จะมีความแข็งเพิ่มขึ้นตามกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการสังเคราะห์ สำหรับโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 100 ถึง 160 W เป็นเวลา 10 นาทีนั้น จะมีความแข็งที่ใกล้เคียงกัน คือประมาณไม่เกิน 410 kg/mm^2 ในขณะที่โลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 180 และ 200 W นั้น จะมีค่าความแข็งที่มากกว่าอย่างชัดเจน คือ 476.8 ± 73.3 และ $489.7 \pm 31.5 \text{ kg/mm}^2$ ตามลำดับ ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากการเกิดสารประกอบคาร์ไบด์ขึ้นบนผิวของตัวอย่าง ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในรูป 4.4 โดยการเกิดสารประกอบคาร์ไบด์ที่มีความแข็งสูงดังกล่าวจะทำให้ความแข็งที่บริเวณผิวของโลหะผสม Ti-52Al เพิ่มขึ้น ในทำนองเดียวกัน กรณีของโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้เวลา 20 นาที เมื่อใช้กำลังไฟฟ้าในการสังเคราะห์ 140 ถึง 180 W จะมีค่าความแข็งที่สูง เมื่อเปรียบเทียบกับโลหะผสม Ti-52Al ที่ทำการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 120 W ซึ่งเป็นผลมาจากสารประกอบคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นบนโลหะผสมดังกล่าวดังปรากฏในแบบรูปการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในรูป 4.5



รูป 4.33 ความแข็งของโลหะผสม Ti-52Al ที่ไม่ผ่านและผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้าขนาดต่าง ๆ เป็นเวลา 10 นาที



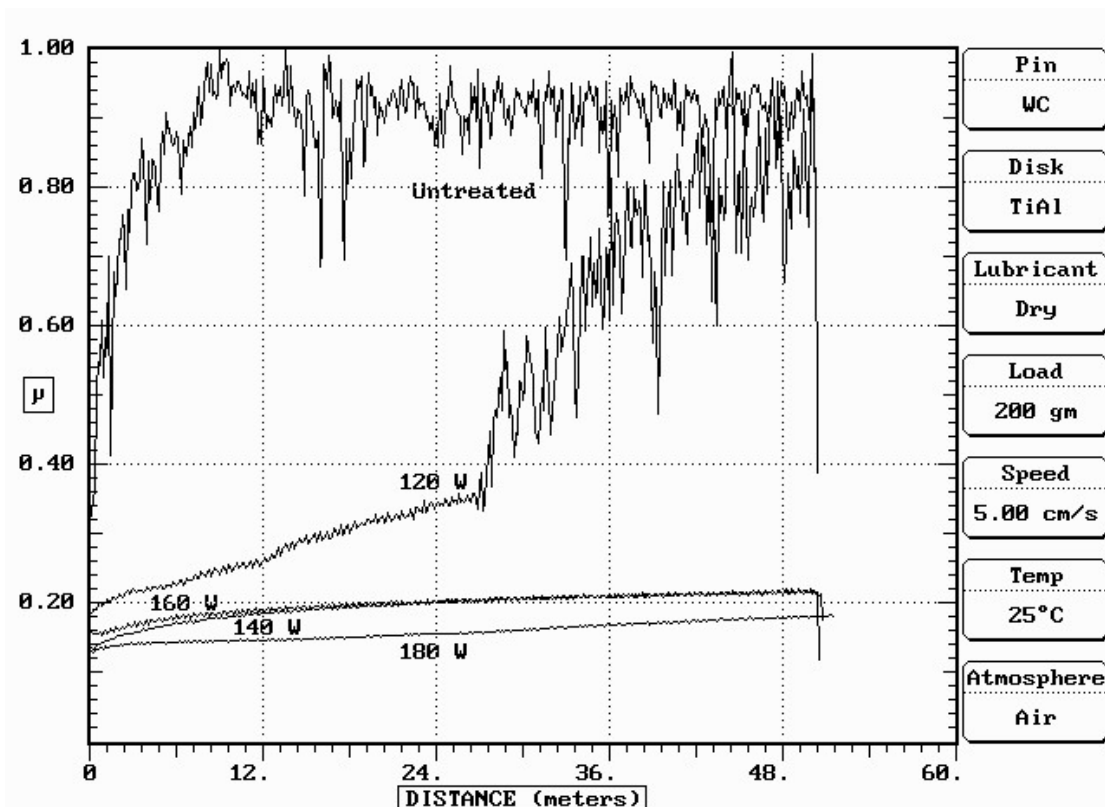
รูป 4.34 ความแข็งของโลหะผสม Ti-52Al ที่ไม่ผ่านและผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้าขนาดต่าง ๆ เป็นเวลา 20 นาที

สำหรับโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์เป็นเวลา 20 นาที่ซึ่งได้ทำการวัดความหนาของฟิล์มเคลือบนั้น พบว่าการที่ความหนาของฟิล์มเคลือบเพิ่มขึ้นตามกำลังไฟฟ้าในการสังเคราะห์นั้นก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อความหนาของฟิล์มเคลือบเพิ่มขึ้นจะทำให้การวัดความแข็ง มีโอกาสที่จะได้รับอิทธิพลของฟิล์มเคลือบซึ่งมีความแข็งสูงได้มากขึ้น และได้รับอิทธิพลของชั้นฐานซึ่งมีความแข็งต่ำได้น้อยลง

นอกจากผลของการเกิดสารประกอบคาร์ไบด์ที่ทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้นแล้ว การที่เฟส TiAl เกิดการแปลงไปเป็นเฟส Ti_3Al มากขึ้น ก็ส่งผลให้ความแข็งเพิ่มขึ้นเช่นกัน เนื่องจากเฟส Ti_3Al มีโครงสร้างเป็นแบบเฮกซะโกนอล [25] จึงมีความต้านทานต่อการกัดกร่อนได้ดี ซึ่งการเกิดเฟส Ti_3Al จะสัมพันธ์กับปริมาณคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นในโลหะผสม Ti-52Al ดังนั้นเมื่อทำการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้นจะทำให้มีคาร์บอนแพร่เข้าสู่โลหะผสมมากขึ้น ส่งผลให้เกิดเฟส Ti_3Al มากขึ้น และทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้นได้แม้จะยังไม่เกิดสารประกอบคาร์ไบด์ขึ้นก็ตาม

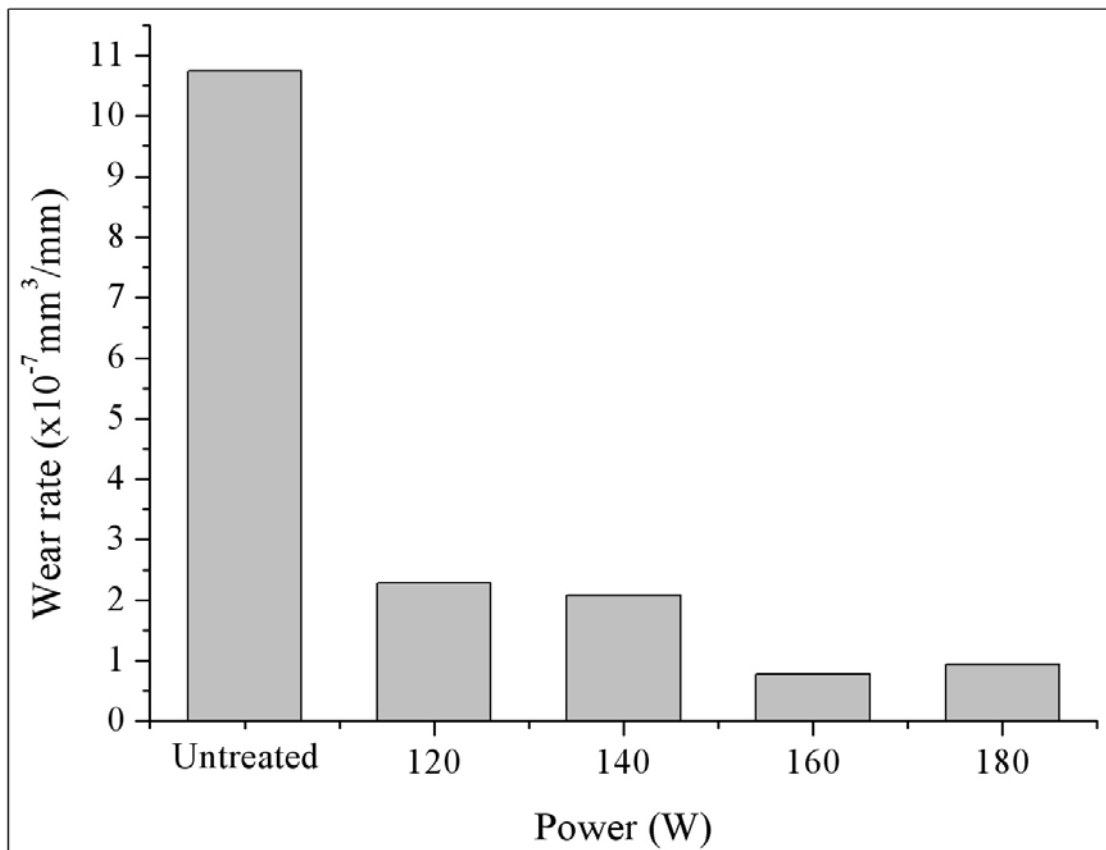
4.6 การสึกหรอ

การทดสอบการสึกหรอแบบ pin-on-disk ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมการสึกหรอของโลหะผสม Ti-52Al ที่ไม่ผ่านและผ่านการสังเคราะห์เป็นเวลา 20 นาที่ รูป 4.35 แสดงสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของโลหะผสม Ti-52Al ที่ไม่ผ่านและผ่านการสังเคราะห์เป็นเวลา 20 นาที่ในระหว่างการทดสอบ pin-on-disk ซึ่งสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของโลหะผสม Ti-52Al ที่ไม่ผ่านการสังเคราะห์มีค่าสูงที่สุด คือประมาณ 0.95 รองลงมาคือโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 120 W ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานประมาณ 0.2 ในช่วงเริ่มต้น และเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนมีค่าประมาณ 0.35 ที่ระยะการเลื่อนไถล 27 m ซึ่งหลังจากระยะดังกล่าว ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานได้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งมีค่าประมาณ 0.8 ในช่วงท้ายของการทดสอบ ซึ่งจากลักษณะดังกล่าวเชื่อว่า ที่ระยะการเลื่อนไถล 27 m นั้น หัวกดได้ผ่านทะลุฟิล์มเคลือบลงไปถึงชั้นฐานจึงส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 140 และ 160 W นั้น มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ใกล้เคียงกันมากและมีค่าต่ำกว่าโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 120 W ส่วนโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 180 W นั้น มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ต่ำที่สุด คืออยู่ในช่วงประมาณ 0.12 ถึง 0.16 การที่สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการคาร์บูไรเซชันโดยใช้กำลังไฟฟ้า 140 160 และ 180 W มีค่าต่ำนั้นเกิดจากอิทธิพลของเฟส TiC และ Ti_2AlC ในฟิล์มเคลือบซึ่งมีคุณสมบัติในการลดความเสียดทาน



รูป 4.35 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของโลหะผสม Ti-52Al ที่ไม่ผ่านและผ่านการสังเคราะห์เป็นเวลา 20 นาที

อัตราการสึกหรอของโลหะผสม Ti-52Al ที่ไม่ผ่านและผ่านการสังเคราะห์เป็นเวลา 20 นาทีแสดงในรูป 4.36 อัตราการสึกหรอของโลหะผสม Ti-52Al ที่ไม่ผ่านการสังเคราะห์มีค่าสูงสุดที่ $1.075 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{mm}$ อัตราการสึกหรอของโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์ที่ 120 W มีค่า $2.274 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{mm}$ ซึ่งมีค่าลดลงถึง 78.8 % เมื่อเทียบกับโลหะผสม Ti-52Al ที่ไม่ผ่านการสังเคราะห์ อัตราการสึกหรอของโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์ที่ 140 W มีค่าใกล้เคียงกับโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการคาร์บูไรเซชันที่ 120 W ในกรณีของของโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์ที่ 160 และ 180 W นั้นมีอัตราการสึกหรอที่ต่ำมาก คืออยู่ในระดับ 7.690×10^{-8} ถึง $9.383 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{mm}$ มีค่าลดลง 91.3 ถึง 92.8 % เมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้ผ่านการสังเคราะห์ ซึ่งเชื่อว่าเป็นผลมาจากการที่มีความหนาของฟิล์มเคลือบสูง มีสารประกอบคาร์ไบด์เกิดขึ้นในปริมาณมาก มีความแข็งสูง และมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำ



รูป 4.36 อัตราการสึกหรอของโลหะผสม Ti-52Al ที่ไม่ผ่านและผ่านการสังเคราะห์เป็นเวลา 20 นาที

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

เนื้อหาในบทนี้เป็นการสรุปผลการวิเคราะห์ การทดสอบสมบัติ และพฤติกรรมของ โลหะผสม Ti-52Al ด้วยเทคนิคต่าง ๆ ตลอดจนนำเสนอข้อเสนอนะ ปัญหาและอุปสรรคต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลอง

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาครั้งนี้ ได้ทำการสังเคราะห์สารประกอบไทเทเนียมคาร์ไบด์ลงบนโลหะผสม Ti-52Al ด้วยเทคนิคการให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าได้เป็นผลสำเร็จ ผลการวิเคราะห์การ เลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์และการกระจายพลังงานรังสีเอ็กซ์แสดงให้เห็นว่า การสังเคราะห์โดยใช้ กำลังไฟฟ้า 180 W ขึ้นไปเป็นเวลา 10 นาที หรือใช้กำลังไฟฟ้า 140 W ขึ้นไปเป็นเวลา 20 นาที สามารถทำให้เกิดสารประกอบ TiC และ Ti_2AlC บนโลหะผสมดังกล่าวได้ เนื่องจาก อุณหภูมิในการสังเคราะห์เพิ่มขึ้นตามกำลังไฟฟ้าในการสังเคราะห์ จึงทำให้มีคาร์บอนแพร่เข้าสู่ โลหะผสม Ti-52Al ได้มากขึ้น และทำให้เกิดสารประกอบคาร์ไบด์ดังกล่าวได้มากขึ้น นอกจากนี้อุณหภูมิที่สูงขึ้นยังทำให้คาร์บอนสามารถแพร่ลงไปในระดับความลึกที่มากขึ้น ส่งผล ให้สามารถเกิดสารประกอบคาร์ไบด์ได้ในระดับที่ลึกมากขึ้น และส่งผลให้ความหนาของฟิล์ม เคลือบเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

การที่มีสารประกอบไทเทเนียมคาร์ไบด์เกิดขึ้น และความหนาของฟิล์มเคลือบเพิ่มขึ้น ตามกำลังไฟฟ้าในการสังเคราะห์นี้ ส่งผลให้โลหะผสม Ti-52Al มีความแข็งที่เพิ่มขึ้นตาม กำลังไฟฟ้าในการสังเคราะห์ โดยมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้นสูงสุดถึง $554.1 \pm 88.8 \text{ kg/mm}^2$ เมื่อทำ การสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 180 W เป็นเวลา 20 นาที เพิ่มขึ้นถึง 71.7 % เมื่อเทียบกับ โลหะผสม Ti-52Al ที่ไม่ผ่านสังเคราะห์ เนื่องจากเมื่อความหนาของฟิล์มเคลือบเพิ่มขึ้น จึงทำให้ ค่าความแข็งได้รับอิทธิพลจากฟิล์มเคลือบซึ่งมีความแข็งสูงได้มากขึ้น และได้รับอิทธิพลจากชั้น ฐานซึ่งมีความแข็งต่ำได้น้อยลง ปัจจัยต่าง ๆ ดังกล่าวส่งผลให้โลหะผสม Ti-52Al มีค่า สัมประสิทธิ์ความเสียหายและมีอัตราการสึกหรอที่ลดลง โดยโลหะผสม Ti-52Al ที่ทำการ สังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 180 W เป็นเวลา 20 นาที มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายที่ต่ำ ที่สุด และมีอัตราการสึกหรอเป็น $3.696 \times 10^{-8} \text{ mm}^3/\text{mm}$ ซึ่งลดลงถึง 91.3 % เมื่อเทียบกับ โลหะผสม Ti-52Al ที่ไม่ผ่านสังเคราะห์

5.2 วิจารณ์ผลการวิจัย

โลหะผสม Ti-52Al ที่ทำการสังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้า 140 W ขึ้นไปนั้น มีลักษณะผิวที่ไม่เรียบและมีรูพรุนมาก ลักษณะผิวที่ไม่สม่ำเสมอดังกล่าว ทำให้การวัดค่าความแข็งมีโอกาที่จะเกิดความคลาดเคลื่อนได้มากเนื่องจากสังเกตรอยกดได้ยาก นอกจากนี้ยังส่งผลให้รอยลึกที่เกิดจากการทดสอบการสึกหรอแบบ pin-on-disk มีความไม่สม่ำเสมอ และมีความกว้างของรอยลึกในบางบริเวณที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ข้อมูลมีความเบี่ยงเบนมาก

คาร์บอนที่พบโลหะผสม Ti-52Al ที่ผ่านการสังเคราะห์ โดยใช้เทคนิควิเคราะห์การกระจายพลังงานรังสีเอ็กซ์นั้น ไม่สามารถระบุได้ว่า เป็นคาร์บอนในรูปอสัณฐาน หรือ แกรไฟต์ หรือเป็นคาร์บอนที่เกิดพันธะในสารประกอบไทเทเนียมคาร์ไบด์ ซึ่งหากใช้เทคนิควิเคราะห์อื่นๆ ร่วมด้วย อย่างเช่น รามานสเปกโตรสโคปี หรือ การวิเคราะห์การปลดปล่อยพลังงานแสงของรังสีเอ็กซ์ ก็จะสามารถอธิบายรูปแบบของคาร์บอนดังกล่าวได้

เอกสารอ้างอิง

1. ASM International Handbook Committee : "Introduction to titanium and titanium alloys." in ASM Handbook, Metals Handbook, Volume 2 Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, Formerly 10th ed. ASM International, U.S.A., 1998; p. 587-590.
2. A. Mani, P. Aubert, F. Mercier, H. Khodja, C. Berthier, P. Houdy, Surf. Coat. Technol. 194 (2005) 190-195.
3. X.Z. Ding, B.K. Tay, H.S. Tan, S.P. Lau, W.Y. Cheung, S.P. Wong, Surf. Coat. Technol. 138 (2001) 301-306.
4. E. Kusano, A. Satoh, M. Kitagawa, H. Nanto, A. Kinbara, Thin Solid Films 343-344 (1999) 254-256.
5. M. Pancielejko, W. Precht, A. Czyzniewski, Vacuum 53 (1999) 57-60.
6. G. Soto, Appl. Surf. Sci. 230 (2004) 254-259.
7. R.S. Rawat, P. Lee, T. White, Li Ying, S. Lee, Surf. Coat. Technol. 138 (2001) 159-165.
8. F. Santerre, M.A. El Khakani, M. Chaker, J.P. Dodelet, Appl. Surf. Sci. 148 (1999) 24-33.
9. T.H. Fang, S.R. Jian, D.S. Chuu, Appl. Surf. Sci. 228 (2004) 365-372.
10. Y. Suda, H. Kawasaki, K. Doi, J. Nanba, T. Ohshima, Mater. Charact. 48 (2002) 221-228.
11. G. Li, L.F. Xia, Thin Solid Films 396 (2001) 16-22.
12. J.M. López, F.J. Gordillo-Vázquez, M. Fernández, J.M. Albella, D. Cáceres, I. Vergara, Appl. Surf. Sci. 172 (2001) 110-116.

13. R. Teghil, L. D'Alessio, A. De Bonis, A. Galasso, P. Villani, A. Santagata, *Thin Solid Films* 515 (2006) 1411-1418.
14. B. Tang, H. Liu, L. Wang, X. Wang, K. Gan, Y. Yu, Y. Wang, T. Sun, S. Wang, *Surf. Coat. Technol.* 186 (2004) 320-323.
15. G. Radhakrishnan, P.M. Adams, D.M. Speckman, *Thin Solid Films* 358 (2000) 131-138.
16. D.E. Wolfe, J. Singh, *Surf. Coat. Technol.* 124 (2000) 142-153.
17. E. Kusano, A. Sato, N. Kikuchi, H. Nanto, A. Kinbara, *Surf. Coat. Technol.* 120-121 (1999) 378-382.
18. X. Ma, Y. Sun, P. Wu, L. Xia, K. Yukimura, *Surf. Coat. Technol.* 169-170 (2003) 375-378.
19. P. Huber, D. Manova, S. Mändl, B. Rauschenbach, *Surf. Coat. Technol.* 174-175 (2003) 1243-1247.
20. ASTM : "Standard test method for wear testing with a pin-on-disk apparatus." in *Annual Book of ASTM Standards, Section 3, Metals Test Methods and Analytical Procedures, Volume 03.02, Wear and Erosion; Metal Corrosion.* ASTM, U.S.A., 1993; p. 387-391.
21. F. Perdrix, M. F. Trichet, J. L. Bonnentien, M. Cornet, J. Bigot, *Intermetallics* 9 (2001) 807-15.
22. W. H. Tian, M. Nemoto, *Intermetallics* 5 (1997) 237-244.
23. J. Philibert, S. J. Rothman; (Trans), : "Self-diffusion." in *Atom Movements, Diffusion and Mass Transport in Solids.* Les Editions de Physique, France, 1991; p. 97-101.
24. J. Philibert, S. J. Rothman; (Trans), : "Solute diffusion in pure materials, Diffusion in alloys." in *Atom Movements, Diffusion and Mass Transport in Solids.* Les Editions de Physique, France, 1991; p. 164.

25. I. Ohnuma, Y. Fujita, H. Mitsui, K. Ishikawa, R. Kainuma, K. Ishida, *Acta Mater.* 48 (2000) 3113-3123.

ผลผลิตจากโครงการวิจัย

1. ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ (ระบุชื่อผู้แต่ง ชื่อเรื่อง ชื่อวารสาร ปี เล่มที่ เลขที่ และหน้า) หรือผลงานตามที่คาดไว้ในสัญญาโครงการ

Boonruang C, Thongtem S. *Surface modification of TiAl alloy via current heating technique.* Applied Surface Science **2009**; In Press. มี impact factor 1.576

2. การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

ผลงานวิจัยที่ได้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ในเชิงวิชาการ โดยสามารถนำไปพัฒนาการเรียนการสอนในกระบวนวิชาทางวัสดุศาสตร์ ของภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งได้แก่ กระบวนวิชาสมมูลเฟสและจลนพลศาสตร์ของวัสดุ, การแปลงเฟสในวัสดุ, ปฏิบัติการวัสดุศาสตร์ 3, โลหะและโลหะผสม, เทคนิคการหาลักษณะเฉพาะของวัสดุ 2, เทคโนโลยีการเคลือบผิวขั้นสูง, วิทยาศาสตร์พื้นผิว และรอยต่อ, วัสดุสำหรับการประยุกต์ใช้อุปกรณ์สูง และ โลหกรรมเชิงกายภาพ

3. ผลงานอื่น ๆ

ได้เข้าร่วมเสนอผลงานในการประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติ ดังต่อไปนี้

- 1) 2nd International Conference on Physics at Surfaces and Interfaces (PSI2009) from February 23 - 27, 2009 at Hotel Toshali Sands, Puri, India.
- 2) การประชุมวิชาการระดับชาติด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ครั้งที่ 2 ระหว่างวันที่ 9-10 กรกฎาคม 2552 ณ มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร (The Second National Conference on Science and Technology (NCST 2009) from July 9 – 10, 2009 at Sakon Nakhon Rajabhat University, Sakon Nakhon, Thailand.)

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ข้อมูลผลการทดลอง

เนื้อหาในส่วนนี้แสดงรายละเอียดของข้อมูลการทดลองต่าง ๆ ที่ได้นำเสนอในรูปของกราฟในบทที่ 4

ตาราง ก.1 อุณหภูมิในการสังเคราะห์โลหะผสม Ti-52Al เมื่อใช้กำลังไฟฟ้าขนาดต่าง ๆ เป็นเวลา 10 นาที

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)					
	100 W	120 W	140 W	160 W	180 W	200 W
0	28	33	33	27	30	31
1	166	192	233	208	405	436
2	256	279	351	370	598	612
3	325	349	435	507	696	717
4	370	405	487	586	753	782
5	395	439	520	620	784	822
6	413	463	543	643	811	850
7	429	480	558	661	832	867
8	441	492	567	675	845	879
9	452	503	574	685	856	888
10	463	512	580	694	865	898
11	443	486	547	643	783	828
12	409	437	488	561	681	716
อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)	390.0	455.1	529.2	687.6	717.4	390.0

ตาราง ก.2 อุณหภูมิในการสังเคราะห์โลหะผสม Ti-52Al เมื่อใช้กำลังไฟฟ้าขนาดต่าง ๆ เป็นเวลา 20 นาที

เวลา (min)	อุณหภูมิ (°C)			
	120 W	140 W	160 W	180 W
0	27	25	30	26
2	273	270	385	359
4	395	419	589	586
6	457	508	670	700
8	477	564	712	751
10	485	594	738	778
12	495	611	753	804
14	504	618	763	821
16	510	621	770	827
18	512	620	774	829
20	514	632	774	831
22	411	498	599	640
24	306	368	436	471
อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)	412.8	488.3	614.8	647.9

ตาราง ก.3 ความแข็งของโลหะผสม Ti-52Al ที่ไม่ผ่านและผ่านการสังเคราะห์ใช้กำลังไฟฟ้าขนาดต่าง ๆ เป็นเวลา 10 และ 20 นาที

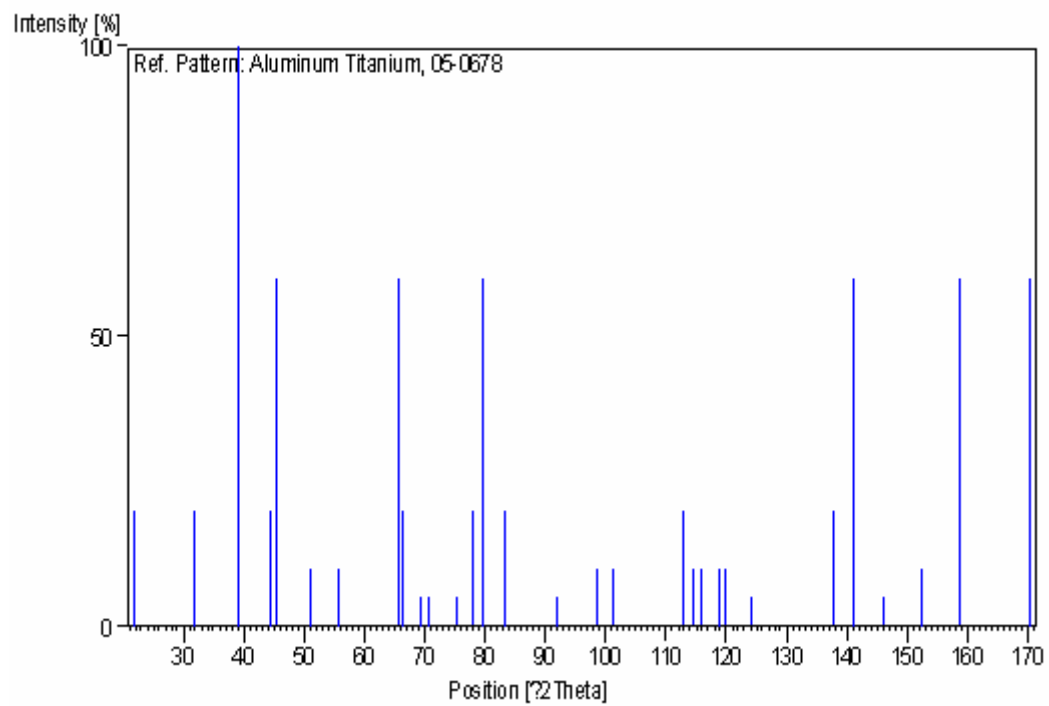
กำลังไฟฟ้า (W)	ความแข็ง (kg/mm ²)	
	10 min	20 min
Untreated	-	
100	373.0±38.2	-
120	395.5 ± 30.9	351.3 ± 21.1
140	407.4 ± 47.1	447.5 ± 87.0
160	409.6 ± 60.9	485.2 ± 50.1
180	476.8 ± 73.3	554.1 ± 88.8
200	489.7±31.5	-

ตาราง ก.4 ความหนาของผิวเคลือบ และอัตราการสึกหรอของโลหะผสม Ti-52Al ที่ไม่ผ่านและผ่านการ
สังเคราะห์โดยใช้กำลังไฟฟ้าขนาดต่าง ๆ เป็นเวลา 20 นาที

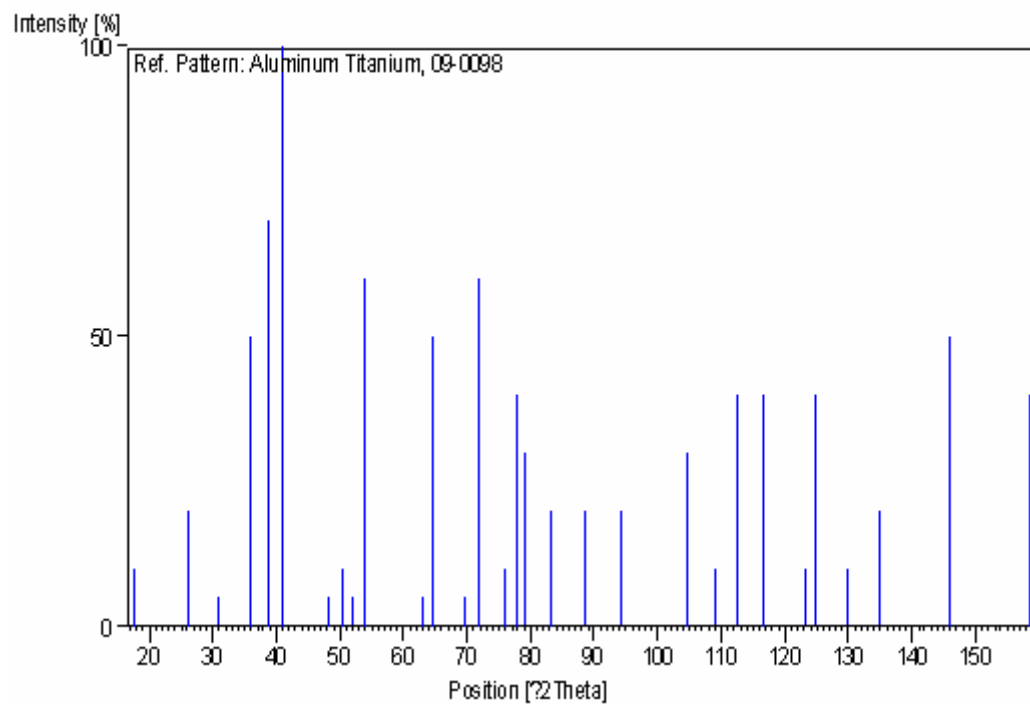
กำลังไฟฟ้า (W)	ความหนาของผิวเคลือบ (μm)	อัตราการสึกหรอ (mm^3/mm)
Untreated	-	$1.075 \times 10^{-6} \pm 2.04 \times 10^{-7}$
120	1.0 ± 0.2	$2.274 \times 10^{-7} \pm 5.25 \times 10^{-8}$
140	3.2 ± 0.3	$2.079 \times 10^{-7} \pm 6.21 \times 10^{-8}$
160	4.2 ± 0.4	$7.690 \times 10^{-8} \pm 4.046 \times 10^{-8}$
180	4.8 ± 0.3	$9.383 \times 10^{-8} \pm 3.696 \times 10^{-8}$

ภาคผนวก ข
แบบรูปการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

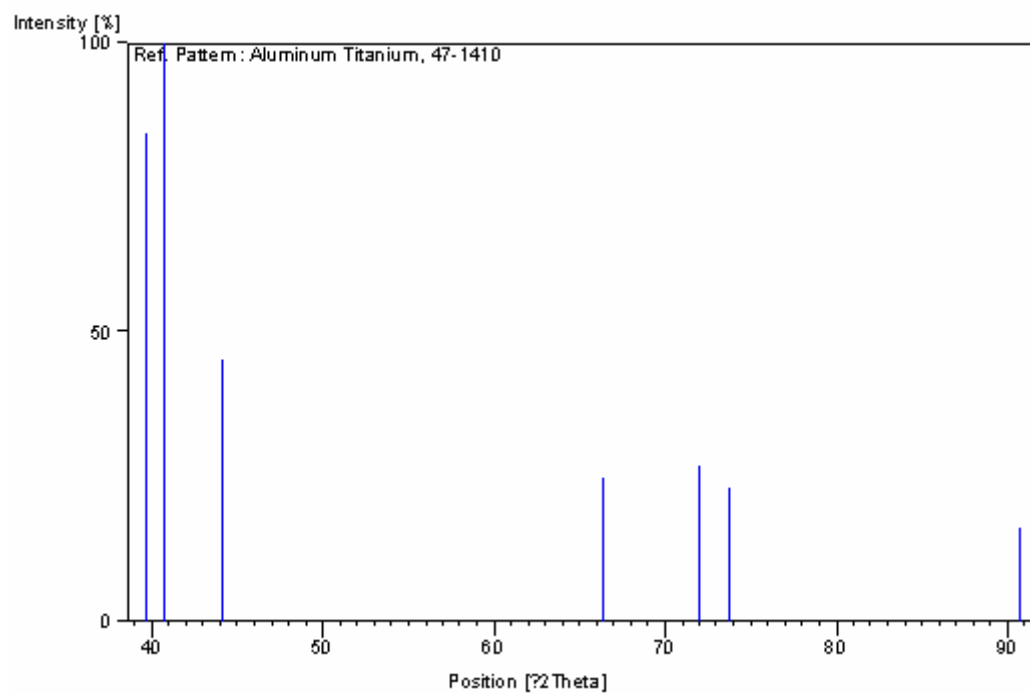
เนื้อหาในส่วนนี้แสดงแบบรูปการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์มาตรฐาน ของเฟสต่าง ๆ ที่พบในการศึกษาครั้งนี้



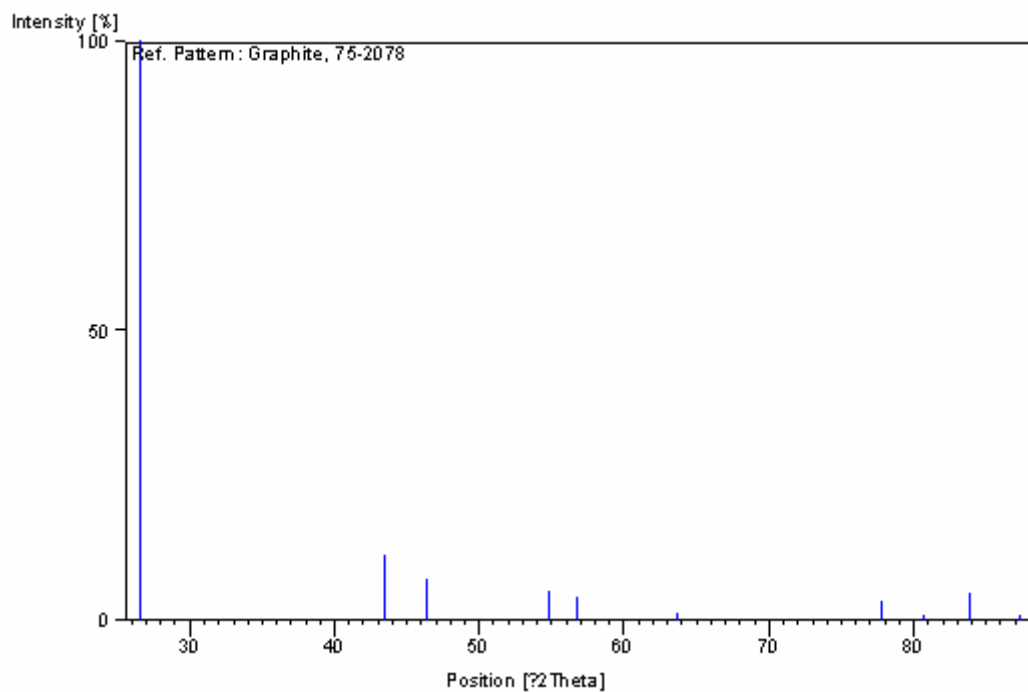
รูป ข.1 แบบรูปการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ TiAl (05-0678)



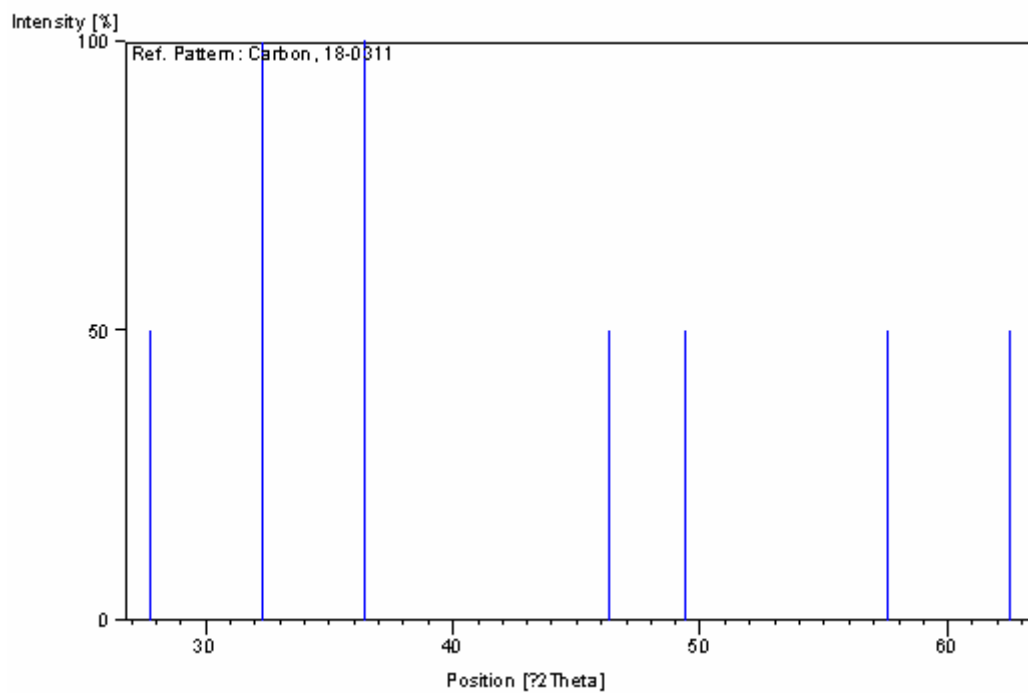
รูป ข.2 แบบรูปการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ Ti₃Al (09-0098)



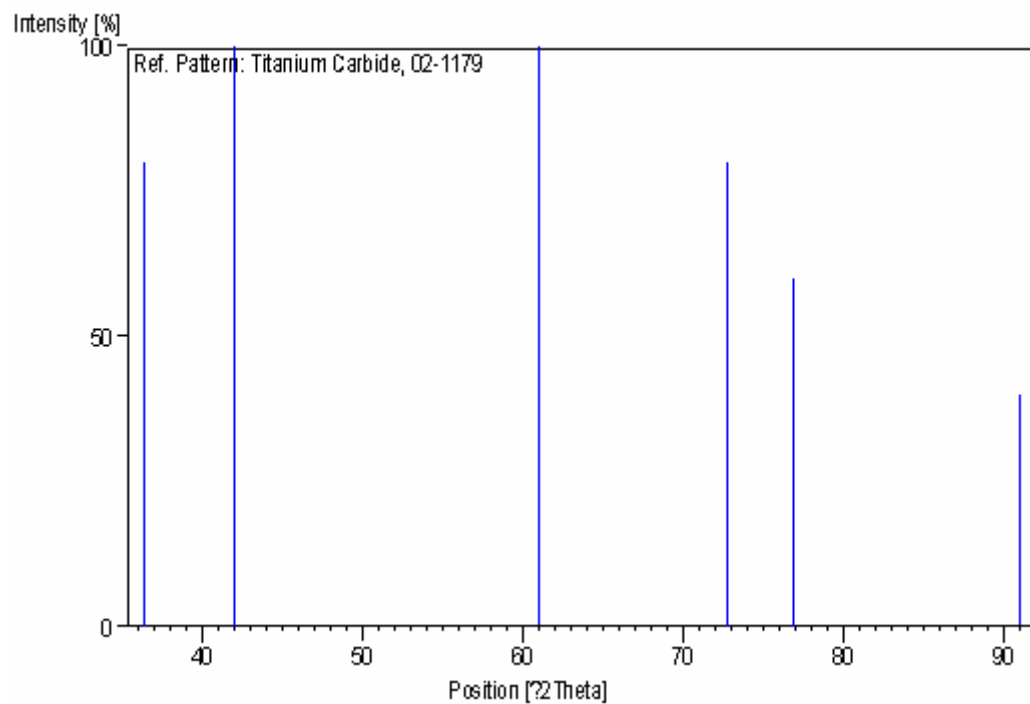
รูป ข.3 แบบรูปการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ Ti₂Al (47-1410)



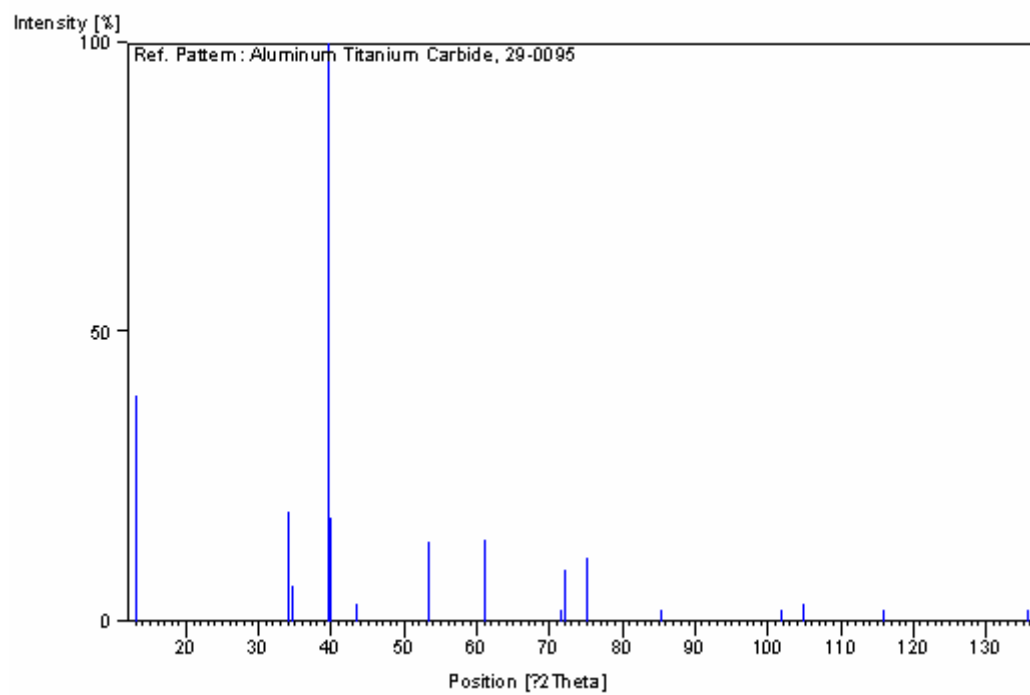
รูป ข.4 แบบรูปการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ C (75-2078)



รูป ข.5 แบบรูปการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ C (18-0311)



รูป ข.6 แบบรูปการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ TiC (02-1179)



รูป ข.7 แบบรูปการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของ Ti₂AlC (29-0095)

ภาคผนวก ค
ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ

เนื่องจากผลงานที่ได้รับการตอบรับแล้วนั้น ยังไม่ทราบรายละเอียดเกี่ยวกับ เล่ม และ
เลขหน้า ที่จะตีพิมพ์ จึงจะดำเนินการส่งผลงานที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติที่มี
รายละเอียด เล่ม และเลขหน้า ตามมาภายหลัง