

การเตรียมโลหะผสม TI-AL-V จากเศษโลหะไทเทเนียม

นางสาวปริญดา ปิยะคิม

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-0756-6

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION OF TI-AL-V ALLOYS USING TITANIUM SCRAP



Miss Parinda Piyakim

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

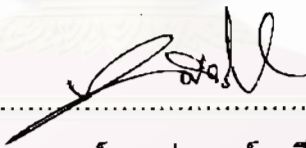
ISBN 974-03-0756-6

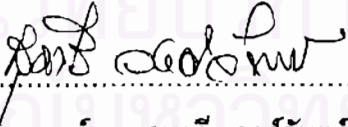
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การเตรียมโลหะผสม TI-AL-V จากเศษโลหะไทเทเนียม
โดย นางสาวปริญดา ปิยะคิม
สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุมาลี วงศ์จันทร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต


..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปิัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุมาลี วงศ์จันทร์)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชاکกร จารุพิสิฐธร)

ปริญญดา ปิยะคิม : การเตรียมโลหะผสม Ti-AL-V จากเศษโลหะไทเทเนียม

(PREPARATION OF TI-AL-V ALLOYS USING TITANIUM SCRAP)

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร. สุมาลี วงศ์จันทร์ ,87 หน้า.,

ISBN 974-03-0756-6

โลหะผสม Ti-6Al-4V ได้ถูกเตรียมจากวัตถุดิบของเศษโลหะไทเทเนียมโดยเตาอาร์คไฟฟ้า ภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน นำมาศึกษาคุณสมบัติที่สำคัญของโลหะผสมที่เตรียมได้ พบว่า ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมส่วนใหญ่จะมีค่าอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้คือ ธาตุอะลูมิเนียม มีค่าระหว่างร้อยละ 5.5 ถึง 6.5 และวาเนเดียมมีค่าระหว่างร้อยละ 3.5 ถึง 4.5 โดยน้ำหนัก มีความหนาแน่นเฉลี่ย 4.425 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ความแข็ง 35.21 ร็อคเวลสเกลซี สำหรับกรรมวิธีทางความร้อนที่มีความเหมาะสมต่อการทำให้โลหะผสมเป็นเนื้อเดียวกัน คือ การอบที่อุณหภูมิ 955 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และเย็นตัวด้วยอัตราเร็ว 4 ถึง 5 องศาเซลเซียสต่อนาที โครงสร้างที่ได้จะมีลักษณะเป็นลามัลลาขนาดใหญ่ โดยมีพื้นเกรนเป็นเฟสอัลฟาและบริเวณขอบเกรนเป็นเฟสเบต้า

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา...วิศวกรรมโลหการ....

สาขาวิชา...วิศวกรรมโลหการ....

ปีการศึกษา.....2544.....

ลายมือชื่อนิสิต.....ปริญญดา.....ปิยะคิม.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....สุมาลี วงศ์จันทร์.....

4170407521 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEYWORD : TI-6AL-4V / TITANIUM ALLOY / TITANIUM SCRAP / HOMOGENIZATION

PARINDA PIYAKIM : PRERARATION TI-AL-V ALLOYS USING TITANIUM SCRAP

THESIS ADVISOR : ASSIST. PROF. SUMALEE VONGCHAN, Ph.D. , 87 pp.

ISBN 974-03-0756-6

Ti-6Al-4V alloys were prepared from titanium scraps using an electric arc furnace under argon atmosphere. Characterizations of the alloys were investigated. Most of chemical composition of the alloys were in the acceptable range of which 5.5 to 6.5 % by wt. Aluminium and 3.5 to 4.5% by wt. Vanadium. The average density and hardness of the alloys were 4.425 g./cm.³ and 35.21 HRC , respectively. Heat treat at 900 °C for 2 hours following by slow cooled to room temperature at a rate of 4-5 °C/min. In the efficacious conditions for homogenizing. Major microstructure of alloys the showed coarse lamellar grain with α as a matrix surrounded by β at the grain boundary.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department....Metallurgical..Engineering

Field of study..Metallurgical..Engineering

Academic year.....2001.....

Student's signature.....Parinda Piyakim

Advisor's signature.....Sumalee Vongchan

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ดี ด้วยความช่วยเหลือจากหลายๆฝ่าย ผู้วิจัยขอกราบ
ขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุมาลี วงศ์จันทร์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่ง
กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดต่างๆในการวิจัยด้วยดีตลอดมา ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบ
วิทยานิพนธ์ทุกท่าน ซึ่งให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ ขอขอบคุณภาควิชา
วิศวกรรมโลหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี ที่อำนวยความสะดวก
XRD ศูนย์วิจัยโลหะและวัสดุที่ช่วยเหลือการทำ mapping และข้อมูลในการทำวิทยานิพนธ์ ศูนย์
เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่อำนวยความสะดวกตัดชิ้นงาน ภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย ที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในการทำ AA ภาควิชาวัสดุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เตาเผาและเครื่องตัดชิ้นงาน คุณอุทิศ ทองกลิ้งและ
ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม ที่ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือในการทำ EDS ขอ
ขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่านที่ให้ความสะดวกในการปฏิบัติงานวิจัย และ
เพื่อนๆ พี่ๆน้องๆทุกคนที่เป็นกำลังใจและให้คำแนะนำจนกระทั่งงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การอบรมส่งเสริมด้านการศึกษา
เป็นอย่างดีตลอดมา และครอบครัวที่เป็นกำลังใจให้การสนับสนุนในทุกด้านจนสามารถสำเร็จการ
ศึกษาได้ตามเจตนารมณ์

ปริญดา ปิยะคิม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ	
1.1 ความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2. การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น	
2.1 โลหะผสม Ti-6Al-4V.....	5
2.1.1 ชนิด ส่วนประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของโลหะผสม Ti-6Al-4V.....	6
2.1.2 โครงสร้างผลึกของโลหะผสม Ti-6Al-4V.....	7
2.1.3 ผลของธาตุเจือผสมต่อการเปลี่ยนเฟส.....	8
2.1.4 เฟสและโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม Ti-6Al-4V.....	9
2.1.5 สมบัติทางกลและผลของโครงสร้างจุลภาคต่อสมบัติทางกลของโลหะ ผสมTi-6Al-4V.....	13
2.1.6 กระบวนการหลอมโลหะผสม Ti-6Al-4V.....	17
2.2 วัสดุทดแทนทางการแพทย์.....	18
2.3 โลหะผสม Ti-6Al-4V กับการใช้งานทางการแพทย์.....	18
3 ระเบียบวิธีการวิจัย	
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง.....	21
3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การเตรียมชิ้นงานทดลอง.....	21
3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ทดสอบและตรวจสอบ.....	21

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2	วัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	21
3.2.1	เศษโลหะไทเทเนียม.....	21
3.2.2	วานาเดียม.....	22
3.2.3	อะลูมิเนียม.....	23
3.3	วิธีดำเนินการทดลอง.....	23
3.3.1	วิธีเตรียมชิ้นงานทดลอง.....	23
3.3.2	การทดสอบสมบัติทางกายภาพของชิ้นงาน.....	28
3.3.2.1	วิธีตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีเชิงปริมาณด้วย X-ray diffractometer.....	28
3.3.2.2	วิธีตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วย Energy Dispersive Spectroscopy	28
3.3.2.3	การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วย Atomic Absorption.....	29
3.3.2.4	วิธีตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง...	29
3.3.2.5	การหาสัดส่วนของเฟสอัลฟาต่อเฟสเบต้าที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน (α - β ratio) ด้วยวิธี Image Analysis.....	29
3.3.2.6	การหาการกระจายตัวของธาตุผสมในชิ้นงานด้วย วิธี X-ray mapping.....	30
3.3.2.7	การวัดความหนาแน่นของชิ้นงาน.....	30
3.3.3	การตรวจสอบสมบัติทางกลของชิ้นงาน.....	30
4	ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	
4.1	ผลการหลอมชิ้นงาน.....	31
4.2	ผลจากการใช้กรรมวิธีทางความร้อนเพื่อให้โลหะผสมเป็นเนื้อเดียวกัน.....	32
4.2.1	ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุในชิ้นงานด้วยการทำ X-ray mapping	32
4.2.2	ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง.....	34

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.2.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานก่อนผ่านกรรมวิธีทางความร้อน เพื่อทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน.....	34
4.2.2.2 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน เพื่อทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน.....	36
4.2.3 ผลการตรวจสอบสัดส่วนเฟสอัลฟาต่อเฟสเบต้าที่เกิดขึ้นงาน.....	38
4.3 ผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี.....	38
4.3.1 ผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีเชิงคุณภาพ (Quantitative Analysis) ด้วย X-ray Diffractometer.....	38
4.3.2 ผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีเชิงปริมาณด้วย Energy Dispersive Spectroscopy.....	39
4.3.3 ผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วย Atomic Absorption.....	40
4.4 ผลการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของชิ้นงาน.....	41
4.5 ผลการตรวจสอบสมบัติทางกลของชิ้นงาน.....	42
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	43
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	44
รายการอ้างอิง.....	45
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ข้อมูลจากการทดลองแสดงผลวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีทั้งเชิงปริมาณ และคุณภาพ โครงสร้างจุลภาค ความหนาแน่นและความแข็ง.....	48
ภาคผนวก ข ผลเปรียบเทียบส่วนผสมทางเคมีจากการวิเคราะห์ด้วย EDS และ AA...	76
ภาคผนวก ค การ์ดมาตรฐาน JCPD.....	79
ภาคผนวก ง การหาสัดส่วนเฟสจาก Image Analyzer.....	82
ภาคผนวก จ ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วย EDS.....	84
ภาคผนวก ฉ ผลการทดสอบความแข็ง.....	85
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	87

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การใช้งานของโลหะผสม Ti-6Al-4V.....	5
2.2 ร้อยละของส่วนประกอบทางเคมีโดยน้ำหนัก.....	6
2.3 สมบัติกายภาพบางประการของโลหะผสม Ti-6Al-4V.....	7
2.4 ผลและปริมาณของธาตุผสมที่ใช้ในโลหะไทเทเนียม.....	8
2.5 สมบัติทางกลบางประการของโลหะผสม Ti-6Al-4V จากการผ่านกรรมวิธี ทางความร้อนต่างๆ.....	14
2.6 สมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคจากการผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ ของโลหะผสม Ti-6Al-4V.....	14
2.7 สมบัติของโครงสร้างจุลภาคแบบ equiaxed และโครงสร้างแบบ acicular.....	15
2.8 สมบัติทางกลของโลหะผสม Ti-6Al-4V (ค่าโดยเฉลี่ย).....	16
3.1 สัดส่วนเปรียบเทียบโดยร้อยละโดยน้ำหนักและน้ำหนักของวัสดุดิบสำหรับแต่ละชิ้นงาน.....	24
4.1 ข้อมูลเปรียบเทียบส่วนผสมทางเคมีที่วิเคราะห์ด้วย Energy Dispersive Spectroscopy ของ ชิ้นงานที่หลอมแบบแยกอะลูมิเนียมและหลอมแบบธรรมดา.....	31
4.2 การแบ่งกลุ่มชิ้นงานตามร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุผสมในชิ้นงาน.....	39
4.3 ตัวอย่างผลเปรียบเทียบส่วนผสมทางเคมีที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย EDS และวิธี AA.....	40
4.4 การแบ่งกลุ่มชิ้นงานใหม่ตามร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุผสมในชิ้นงาน.....	41
4.5 ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของชิ้นงานหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนของทั้ง 40 ชิ้นงานและ ความหนาแน่นเมื่อเทียบกับค่าความหนาแน่นทางทฤษฎี.....	41

สารบัญรูป

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 แบบจำลองโครงสร้างผลึกอย่างง่ายของโลหะผสม Ti-6Al-4V.....	7
2.2 แผนภูมิสมดุลเฟสแสดงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม Ti-6Al-4V.....	10
2.3 ภาพจำลองการเกิดโครงสร้างตาข่าย Widmanstätten structure.....	11
2.4 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม Ti-6Al-4V หลังจากการเย็นตัวช้าๆจากอุณหภูมิเหนืออุณหภูมิเปลี่ยนเฟสมีลักษณะเป็นโครงสร้างตาข่าย (optical microscope ; 500x).....	12
2.5 กระบวนการหลอมและหล่อโลหะผสม Ti-6Al-4V.....	17
2.6 เปรียบเทียบค่าโมดูลัสของยังของวัสดุชนิดต่างๆกับ cortical bone.....	21
2.7 เปรียบเทียบค่าความเค้นที่เกิดขึ้นจากการใช้วัสดุทดแทนจากวัสดุชนิดต่างๆ.....	21
3.1 ผลจากการวิเคราะห์ด้วย EDS ของเศษโลหะไทเทเนียม.....	22
3.2 ผลจากการวิเคราะห์ด้วย EDS ของวานาเดียม.....	22
3.3 ผลจากการวิเคราะห์ด้วย EDS ของอะลูมิเนียม.....	23
3.4 การวางวัตถุติดสำหรับการหลอม.....	26
3.5 อัตราการให้ความร้อนและเวลาในการทำกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อให้เป็นเนื้อเดียวกัน..	27
3.6 การตัดชิ้นงานเพื่อนำไปทดสอบ.....	28
4.1 โครงสร้างจุลภาคจาก SEM ของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อให้เป็นเนื้อเดียวกันที่ 955 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	32
4.2 X-ray mapping ของธาตุไทเทเนียมในชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนทำให้เป็นเนื้อเดียวกันที่ 955 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	33
4.3 X-ray mapping ของธาตุวานาเดียมในชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนทำให้เป็นเนื้อเดียวกันที่ 955 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	33
4.4 X-ray mapping ของธาตุอะลูมิเนียมในชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนทำให้เป็นเนื้อเดียวกันที่ 955 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	34
4.5 โครงสร้างจุลภาคบริเวณผิวของชิ้นงานหลังผ่านการหลอมด้วยเตาอาร์คไฟฟ้าตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์.....	35
4.6 โครงสร้างจุลภาคบริเวณกลางชิ้นงานหลังผ่านการหลอมด้วยเตาอาร์คไฟฟ้าตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์.....	35

สารบัญรูป (ต่อ)

ภาพประกอบ

หน้า

- 4.7 โครงสร้างลาเมลลาของชิ้นงานซึ่งผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อทำให้เป็นเนื้อเดียวกันที่ 955 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงเย็นตัวด้วยอัตราเร็วประมาณ 4 ถึง 5 องศาเซลเซียส ต่อนาที ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง.....36
- 4.8 โครงสร้างลาเมลลาที่มีขนาดใหญ่ของชิ้นงานซึ่งผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อทำให้เป็นเนื้อเดียวกันที่ 955 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงเย็นตัวด้วยอัตราเร็วประมาณ 4 ถึง 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง.....37
- 4.9 โครงสร้างทางเคมีของชิ้นงานหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน ที่ 955 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วย XRD..... 38

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของงานวิจัย

โลหะผสม Ti-6Al-4V เป็นวัสดุที่ใช้งานกันอย่างแพร่หลายในงานหลายด้าน เนื่องจากมีสมบัติที่ดีหลายประการ เช่น มีน้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับโลหะอื่น ความแข็งแรงของวัสดุ (strength) ความทนทานการล้า (fatigue resistance) ความแข็งแรงการกระแทก (impact strength) ความทนทานการกัดกร่อน (corrosion resistance) ความเหนียว (toughness) และสมบัติทางการแปรรูปยิ่งยวด (superplasticity) ⁽¹⁻⁵⁾ นอกจากนี้ยังมีสมบัติที่สำคัญที่สามารถใช้เป็นวัสดุทางการแพทย์คือ

1. ความเข้ากันได้ดีของร่างกาย (biocompatibility) ไม่เป็นพิษหรือก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อเซลล์ภายในร่างกาย
2. ไม่เสื่อมสภาพจากการใช้งานภายในร่างกาย
3. มีสมบัติทางกลเพียงพอต่อการรับภาระบริเวณที่ใช้งานภายในร่างกาย ⁽⁶⁾

โลหะผสม Ti-6Al-4V จึงเป็นวัสดุที่นำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนทางการแพทย์และงานทันตกรรมอย่างกว้างขวาง อย่างไรก็ตามโลหะผสม Ti-6Al-4V เป็นวัสดุที่มีราคาสูงมาก และต้องนำเข้าจากต่างประเทศเท่านั้น ปัจจุบันยังไม่มีความสามารถในการผลิตวัสดุตัวนี้ขึ้นใช้เองในประเทศ ทั้งที่มีความเป็นไปได้สูงในการเตรียมวัสดุนี้จากเศษโลหะไทเทเนียม (Titanium scrap) ซึ่งเป็นเศษวัสดุจากภาคอุตสาหกรรม

เนื่องจากอุตสาหกรรมการผลิตตัวเรือนนาฬิกาไทเทเนียมก่อให้เกิดเศษโลหะไทเทเนียมปริมาณมากถึง 2.5 ตันต่อปี (ข้อมูลจาก บริษัทพัฒนานาฬิกา จำกัด) และไม่มีการนำเศษวัสดุนี้ไปแปรรูปอย่างอื่น ทั้งมีปัญหาในการกำจัดทิ้งตามกฎหมายกรมศุลกากร และด้วยความยุ่งยากนี้เศษโลหะไทเทเนียมจึงถูกทิ้งให้เป็นเศษวัสดุที่ไร้ค่า

จากการตรวจสอบเบื้องต้นพบว่า เศษโลหะไทเทเนียมจากอุตสาหกรรมการผลิตตัวเรือนนาฬิกาเหล่านี้มีความบริสุทธิ์สูงถึงร้อยละ 99.8 สามารถนำมาใช้เป็นแหล่งวัสดุที่มีคุณภาพเพื่อการแปรรูปต่อไปได้อย่างดี

แต่อย่างไรก็ตาม การเตรียมโลหะผสม Ti-6Al-4V จากห้องปฏิบัติการในประเทศนั้น มีข้อจำกัดหลายประการ เช่น

- เตาลหอมและบรรยากาศการหลอมโลหะ
- เทคนิคและเครื่องมือหลอมโลหะ

- เทคนิคทางกรรมวิธีทางความร้อน

ซึ่งข้อจำกัดเหล่านี้ส่งผลต่อส่วนประกอบทางเคมี โครงสร้างทางจุลภาคและสมบัติทางกลของโลหะผสม และจะส่งผลถึงปัญหาต่อการใช้งานในที่สุด

ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาหาความเป็นไปได้ในการเตรียมโลหะผสม Ti-6Al-4V จากห้องปฏิบัติการภายในประเทศขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาวิธีการเตรียมโลหะผสม Ti-Al-V
- 1.2.2 เพื่อศึกษากรรมวิธีทางความร้อนของโลหะผสม Ti-Al-V
- 1.2.3 เพื่อศึกษาคุณสมบัติและโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม Ti-Al-V
- 1.2.4 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการเตรียมโลหะผสม Ti-Al-V ณ ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จากเศษโลหะไทเทเนียมที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตตัวเรือนนาฬิกาไทเทเนียม

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 เตรียมโลหะผสม Ti-Al-V ณ ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จากเศษโลหะไทเทเนียมซึ่งได้จากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตตัวเรือนนาฬิกา
- 1.3.2 นำโลหะผสมที่เตรียมได้ไปผ่านกระบวนการทางความร้อนเพื่อทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenization)
- 1.3.3 วิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีทั้งเชิงปริมาณและคุณภาพ (Quantitative and Qualitative Chemical Analysis) ของโลหะผสมที่เตรียม
- 1.3.4 ตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะผสมที่เตรียมได้ ด้วย Optical microscope
- 1.3.5 ตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุในโลหะผสมที่เตรียมได้ ด้วยการทำ X-ray Mapping
- 1.3.6 ตรวจสอบปริมาณสัดส่วนของเฟสที่เกิดขึ้นของโลหะผสมที่เตรียมได้ ด้วย Image Analyzer
- 1.3.7 ตรวจสอบค่าความหนาแน่นของโลหะผสมที่เตรียมได้

- 1.3.8 ทดสอบความแข็งแรงแบบบรีคเวลสเทสซี (HRC) ของโลหะผสมที่เตรียมขึ้นซึ่งผ่านกรรมวิธีทางความร้อนทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน
- 1.3.9 ประเมินความเป็นไปได้ของการเตรียมโลหะผสม Ti-Al-V ณ ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมโลหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จากส่วนผสมทางเคมี โครงสร้างทางจุลภาคและความแข็งแรงของโลหะผสมที่เตรียมได้โดยเทียบกับข้อมูลของโลหะผสม Ti-6Al-4V เชิงพาณิชย์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทราบถึงความเป็นไปได้ในการเตรียมโลหะผสม Ti-Al-V ในระดับห้องปฏิบัติการภายในประเทศ จากเศษโลหะไทเทเนียมที่ได้จากอุตสาหกรรมการผลิตตัวเรือนนาฬิกาไทเทเนียม
- 1.4.2 เพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับการเตรียมและกรรมวิธีทางความร้อนสำหรับการวิจัยและพัฒนาการนำเศษโลหะไทเทเนียมมาใช้ให้เกิดประโยชน์เพื่อลดการนำเข้าหรือลดการพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศให้น้อยลง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2 การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น

มีการคิดค้นหาวิธีนำไทเทเนียมมาใช้ประโยชน์ด้านต่างๆมากมาย เนื่องจากโลหะไทเทเนียมมีสมบัติทางกลและสมบัติทางกายภาพที่ดีเหมาะกับงานที่ต้องการสมบัติเฉพาะทาง แต่อย่างไรก็ตามการหลอมและการขึ้นรูปโลหะไทเทเนียมต้องใช้วิทยาการที่ค่อนข้างยุ่งยากและมีค่าใช้จ่ายสูง มีการวิจัยบางส่วนที่ศึกษาเกี่ยวกับวิธีการใช้ ส่วนผสม และประโยชน์ซึ่งใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้ ได้แก่

การศึกษาของ Jaffee และคณะ⁽⁴⁾ ได้คิดค้นโลหะผสมตระกูลไทเทเนียมเพื่อใช้ในงานที่ต้องการความแข็งแรง ความเหนียว และสามารถคงสภาพได้ที่อุณหภูมิสูง โดยมีการเติมธาตุผสมอะลูมิเนียม วาเนเดียม แทนทาลัม และควบคุมให้มีปริมาณออกซิเจนไม่เกินร้อยละ 0.20 โดยทำการหลอมด้วยเตาอาร์คไฟฟ้าในบรรยากาศเฉื่อย

การศึกษาของ Abkowitz และคณะ⁽⁴⁾ ได้คิดค้นโลหะผสมตระกูลไทเทเนียมที่มีธาตุผสมเป็นอะลูมิเนียมร้อยละ 0.8 ถึง 1.8 วาเนเดียมร้อยละ 7.5 ถึง 8.5 เหล็กร้อยละ 4.5 ถึง 5.5 และมีปริมาณออกซิเจน 0.30 ถึง 0.50 โดยน้ำหนัก ซึ่งทำให้ได้โลหะที่มีค่าความต้านทานแรงดึง (tensile strength) และมีค่าความยืดตัว (ductility) สูง

การศึกษาของ Chakrabarti และคณะ⁽⁴⁾ ได้คิดค้นโลหะผสมตระกูลไทเทเนียมที่มีสมบัติทางกลที่ดีขึ้น โดยเติมธาตุผสมคือ อะลูมิเนียมร้อยละ 5.5 ถึง 6.5 วาเนเดียมร้อยละ 3.5 ถึง 4.2 เหล็กร้อยละ 0.30 ถึง 0.50 ปริมาณออกซิเจนร้อยละ 0.15 ถึง 0.20 และมีปริมาณไนโตรเจนร้อยละ 0.025 ถึง 0.050 โดยน้ำหนัก ทำการทดลองกำหนดโครงสร้างจุลภาคที่ต้องการโดยให้ความร้อนเหนืออุณหภูมิเปลี่ยนเฟส (beta transus temperature) แล้วให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว พบว่าโครงสร้างจุลภาคที่ได้เป็นอนุภาคของเฟสอัลฟาที่มีความละเอียดและมีความแข็งแรงสูง

ในปี ค.ศ. 1950 มีการคิดค้นโลหะผสม Ti-6Al-4V มาใช้ประโยชน์โดยเริ่มแรกนำมาทำเป็นชิ้นส่วนใบพัดคอมเพรสเซอร์ในเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบของเครื่องบิน เนื่องจากมีความแข็งแรงสูง น้ำหนักเบา และมีความแข็งแรงพันธะสูง⁽¹³⁾

ส่วนการใช้งานของไทเทเนียมและโลหะผสมไทเทเนียมในทางการแพทย์นั้นเริ่มขึ้นเมื่อ 60 ปีที่แล้ว ในช่วงปี ค.ศ.1940 Bothe และคณะ⁽⁸⁾ ได้ทำการทดลองใส่วัสดุทดแทนที่ทำจากไทเทเนียมในสัตว์ และในปี ค.ศ.1953 Clarke และ Hickman⁽⁸⁾ ได้ทำการทดลองและรายงานงานว่า ไทเทเนียมมีความทนทานและทนต่อการกัดกร่อนจากของเหลวชีวภาพในร่างกายได้ดีต่อมาในปี ค.ศ.1959 Beder และ Ploger⁽⁸⁾ ได้ทำการทดลองใช้ไทเทเนียมเป็นวัสดุทดแทนในช่องปากโดยทดลองกับสุนัข

หลังจากนั้นได้มีการพัฒนาการใช้ไทเทเนียมในทางการแพทย์มาเรื่อยๆ จนกระทั่งช่วงต้นปีทศวรรษ 1970 ไทเทเนียมและโลหะผสมไทเทเนียมได้รับการพัฒนาและเป็นที่ยอมรับในทางการแพทย์ว่ามีสมบัติดีกว่าและเหมาะสมที่จะใช้ทำเป็นวัสดุทดแทนทางการแพทย์มากกว่าโลหะประเภทอื่นๆ เนื่องจากมีค้ำยังโมดูลัสต่ำ ความแข็งแรงสูง ความแข็งแรงการล้าสูง น้ำหนักเบา ทนการกัดกร่อนจากของเหลวชีวภาพในร่างกาย อายุการใช้งานยาวนาน ไม่เป็นพิษต่อร่างกายและเป็นโลหะที่มีสมบัติเข้ากันได้ดีกับร่างกายมนุษย์ และในปีค.ศ.1974 จึงได้มีการทดลองใช้โลหะผสม Ti-6Al-4V ในร่างกายมนุษย์ และได้รับความนิยมนำมาทำเป็นตัวน็อตสำหรับยึดกระดูกและเป็นส่วนประกอบของวัสดุทดแทนทางการแพทย์มาถึงปัจจุบัน^(7,8)

2.1 โลหะผสม Ti-6Al-4V⁽⁹⁻¹³⁾

โลหะผสม Ti-6Al-4V เป็นโลหะผสมที่นิยมแพร่หลายมากถึงร้อยละ 56 ของตระกูลโลหะผสมไทเทเนียมที่ผลิตทั้งหมด ซึ่งโลหะผสม Ti-6Al-4V ที่ใช้งานทั่วไปมีการผลิตได้จากหลายกระบวนการ คือ ผลิตภัณฑ์จากการหล่อ (casting) ผลิตภัณฑ์จากการขึ้นรูปด้วยผง (powder metallurgy) และผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการขึ้นรูปแล้ว (wrought) เช่น การรีด การดึง การปั๊มขึ้นรูปงานที่ใช้โลหะผสม Ti-6Al-4V แสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การใช้งานของโลหะผสม Ti-6Al-4V⁽⁹⁾

Designation	Class	Variation	Typical Application
Ti-6Al-4V	Alpha-Beta	May be abbrev. 6-4, or ASTM Grade 5. Known as the "workhorse" Ti alloy	May be used over a broad range of temperatures from cryogenic to about 427 °C for long term applications. May be use in both annealing and solution treated and aged conditions., Rocket motor cases; blades, discs and ring for aircraft turbines, Compressors. Structural forgings: fasteners; pressure vassels; gas, chemical pumps; cryogenic parts; Ordnance equipment; marine components; steam turbine blade; space capsule components; helicopter rotor hubs; critical forgings requiring high strength-to-weight ratios. Downhole explorations; logging equipment; springs and hubs; implant in humans.
Ti-6Al-4V(ELI)	Alpha-Beta	May be abbrev. 6-4-ELI	High pressure and cryogenic vessels operating down to -251 °C. Applications where fracture toughness and fatigue strength are crucial: e.g., aircraft and structural components, and biomedical.

โลหะผสม Ti-6Al-4V จัดเป็นโลหะผสมประเภทอัลฟา-เบต้า โดยจะมีการใส่ธาตุซึ่งทำหน้าที่เป็น สารเติมที่ช่วยให้เฟสอัลฟาเสถียร (alpha-stabilizer) และสารเติมที่ช่วยให้เฟสเบต้าเสถียร (beta-stabilizer) ดังนั้นจะพบปริมาณเฟสเบต้าซึ่งปกติเสถียรที่อุณหภูมิสูงอยู่ในเนื้อโลหะผสมหลังจากผ่านกรรมวิธีทางความร้อน ณ อุณหภูมิห้องได้

2.1.1 ชนิด ส่วนประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพ ของโลหะผสม Ti-6Al-4V

สามารถแบ่งชนิดของโลหะผสม Ti-6Al-4V ตามปริมาณสิ่งปนเปื้อน (interstitial elements) ที่มีอยู่ในโลหะผสมแสดงได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ร้อยละของส่วนประกอบทางเคมีโดยน้ำหนัก ⁽¹⁰⁾

	Major element			Interstitial element (max)				
	Ti	Al	V	Fe	O	C	N	H
Standard grade (medium interstitials)	Bal.	5.5-6.5	3.5-4.5	0.30	0.20	0.10	0.05	0.015
ELI grade (Extra Low Interstitials)	Bal.	5.5-6.5	3.5-4.5	0.15	0.13	0.08	0.05	0.015

การใช้งานของ standard grade จะใช้ในงานที่ต้องการความแข็งแรงสูงสุด ส่วน ELI grade มักใช้ในงานที่ต้องการความทนทานต่อการกัดกร่อนจากความเค้นในสารละลายเกลือ (stress corrosion resistance in aqueous salt solution) และงานที่ต้องการค่าความเหนียวต้านทานการแตกหัก (fracture toughness) สูง

สมบัติด้านการกัดกร่อนของโลหะผสม Ti-6Al-4V นับว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ดีมากเมื่อเทียบกับโลหะอื่นๆ เนื่องจากบรรยากาศที่อุณหภูมิห้อง ผิวของ Ti-6Al-4V จะถูกปกคลุมด้วยฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ (รูไทล์) มีความหนาไม่เกิน 100 นาโนเมตร ซึ่งแม้ว่าฟิล์มนี้ถูกทำลายออกไป ผิวของ Ti-6Al-4V ก็จะสามารถสร้างฟิล์มป้องกันใหม่ขึ้นมาปกคลุมผิวด้วยอัตราที่เร็วมาก

ส่วนอัตราการออกซิไดส์จะเหมือนกับโลหะไทเทเนียม กล่าวคือ อัตราการออกซิไดส์ของ Ti-6Al-4V จะมีความสัมพันธ์แบบลอการิทึมในช่วงอุณหภูมิ 300 ถึง 500 องศาเซลเซียส และเป็นความสัมพันธ์แบบพาราโบลาในช่วง 500 ถึง 700 องศาเซลเซียส และเปลี่ยนเป็นปฏิกิริยาตรงเมื่ออุณหภูมิเหนือ 750 องศาเซลเซียส

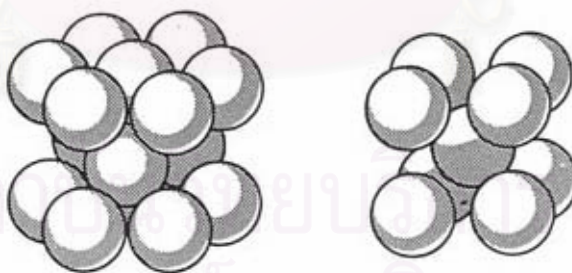
สมบัติทางกายภาพบางประการของโลหะผสม Ti-6Al-4V แสดงได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางกายภาพบางประการของโลหะผสม Ti-6Al-4V

สมบัติทางกายภาพ	
ความหนาแน่น (density)	4.469 g/cm ³
อุณหภูมิการเปลี่ยนเฟส $\alpha \rightarrow \beta$	995 \pm 15 ^o C
อุณหภูมิ liquidus	1660 \pm 15 ^o C
อุณหภูมิ solidus	1605 \pm 10 ^o C
Lattice parameter	
α -phase (hcp)	a = 0.2925 \pm 0.0002 nm. b = 0.4670 \pm 0.0005 nm.
β -phase (bcc)	a = 0.319 \pm 0.001 nm.

2.1.2 โครงสร้างผลึก (crystal structure) ของโลหะผสม Ti-6Al-4V

โลหะผสม Ti-6Al-4V ประกอบด้วย รูปโครงสร้างผลึกหลายแบบ กล่าวคือ มีโครงสร้างเป็น Hexagonal Close-Packed (HCP) หรือ เฟสอัลฟา (α -phase) ซึ่งเสถียรที่อุณหภูมิต่ำ และมีโครงสร้างเป็น Body-Centered Cubic (BCC) หรือ เฟสเบต้า (β -phase) ซึ่งปกติจะเสถียรที่อุณหภูมิสูง โดยโครงสร้างผลึกของโลหะผสม Ti-6Al-4V แสดงได้ดังรูปที่ 2.1



เฟสอัลฟา (hexagonal close-packed) เฟสเบต้า (cubic body-centered)

รูปที่ 2.1 แบบจำลองโครงสร้างผลึกอย่างง่ายของโลหะผสม Ti-6Al-4V

โดยอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนเฟสเรียกว่า alpha-to-beta transformation temperature หรือ Beta transus เป็นอุณหภูมิสมมูลต่ำสุดที่พบเฟสเบต้าสมบูรณ์ สำหรับโลหะผสม Ti-6Al-4V อุณหภูมิเปลี่ยนเฟสมีค่า 995 \pm 15 องศาเซลเซียส (1825 \pm 25 องศาฟาห์เรนไฮท์) ทั้งนี้ อุณหภูมิเปลี่ยนเฟสจะขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุเจือผสม

2.1.3 ผลของธาตุเจือผสมต่อการเปลี่ยนเฟส (Effect of Alloying Elements to Phase Transformation)

ธาตุผสมในโลหะไทเทเนียมสามารถแบ่งเป็นกลุ่มใหญ่ๆ ได้แก่

1. สารเติมที่ช่วยให้เฟสอัลฟาเสถียร (alpha-stabilizer) จะมีผลทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนเฟสสูงขึ้น ได้แก่ อะลูมิเนียม ออกซิเจน แกลเลียม เจอร์มาเนียม คาร์บอน ไนโตรเจน
2. สารเติมที่ช่วยให้เฟสเบต้าเสถียร (beta-stabilizer) จะมีผลทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนเฟสต่ำลง ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น
 - สารเติมที่ช่วยให้เฟสเบต้าเสถียรแบบ isomorphous group ธาตุเหล่านี้จะละลายในเฟสเบต้า จึงไม่เกิดสารประกอบใหม่ขึ้น ได้แก่ วาเนเดียม แทนทาลัม โมลิบดีนัม โคัลมเบียม
 - สารเติมที่ช่วยให้เฟสเบต้าเสถียรแบบ eutectoid group ธาตุเหล่านี้จะมีการละลายในเฟสอัลฟาเกิดสารประกอบใหม่ซึ่งเป็นสารประกอบกึ่งโลหะ (intermetallic compound) ที่มีอุณหภูมิการเปลี่ยนโครงสร้างที่ต่ำกว่าประมาณ 600 องศาฟาเรนไฮต์ ได้แก่ เหล็ก แมงกานีส โครเมียม โคบอลต์ ซิลิกอน ทองแดง พาลาเดียม ไนโอเบียม และ ธาตุทราวนซีชัน

ผลและปริมาณของธาตุผสมที่ใช้ในโลหะไทเทเนียมแสดงได้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ผลและปริมาณของธาตุผสมที่ใช้ในโลหะไทเทเนียม⁽⁹⁾

Alloying element	Range (approx) wt%	Effect on structure
Aluminium	2 to 7	Alpha stabilizer
Tin	2 to 6	Alpha stabilizer
Vanadium	2 to 20	Beta stabilizer
Molybdenum	2 to 20	Beta stabilizer
Chromium	2 to 12	Beta stabilizer
Copper	2 to 6	Beta stabilizer

นอกจากธาตุเจือผสมที่เราตั้งใจใส่ลงไปเพื่อปรับปรุงโครงสร้างเคมีและสมบัติของโลหะผสมแล้ว ยังมีธาตุอื่นที่อาจสามารถปนเปื้อนตามธรรมชาติซึ่งจะมีผลต่อสมบัติของโลหะผสมได้อีก เช่น คาร์บอน ออกซิเจน ไนโตรเจน และไฮโดรเจน

ผลของคาร์บอน ออกซิเจนและไนโตรเจนต่อ โลหะผสม Ti-6Al-4V

1. หากมีปริมาณสิ่งเจือปนมากจะทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนเฟสสูงขึ้น
2. สิ่งเจือปนมากจะทำให้ความแข็งแรงของวัสดุสูงขึ้น แต่วัสดุจะสูญเสียความเหนียว

ผลของไฮโดรเจนต่อโลหะผสม Ti-6Al-4V

ไฮโดรเจนจะทำให้เกิดปัญหา Hydrogen-embrittlement เนื่องจากจะเกิดสารประกอบไทเทเนียมไฮไดรไรด์ ที่ผิวของชิ้นงาน ซึ่งจะมีผลต่อสมบัติทางกลของวัสดุ เช่น ความเหนียวต้านทานการแตกหัก เนื่องจากวัสดุจะสูญเสียความเหนียวและความต้านทานในการเกิดรอยแตกที่ผิวชิ้นงาน โดยผลของไฮโดรเจนจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้งานและส่วนประกอบทางเคมีของโลหะผสมนั้นๆ แต่อย่างไรก็ตามไฮโดรเจนมีผลต่อโลหะผสม Ti-6Al-4V น้อยกว่าโลหะหลายๆประเภท เช่น เหล็ก นิกเกิล

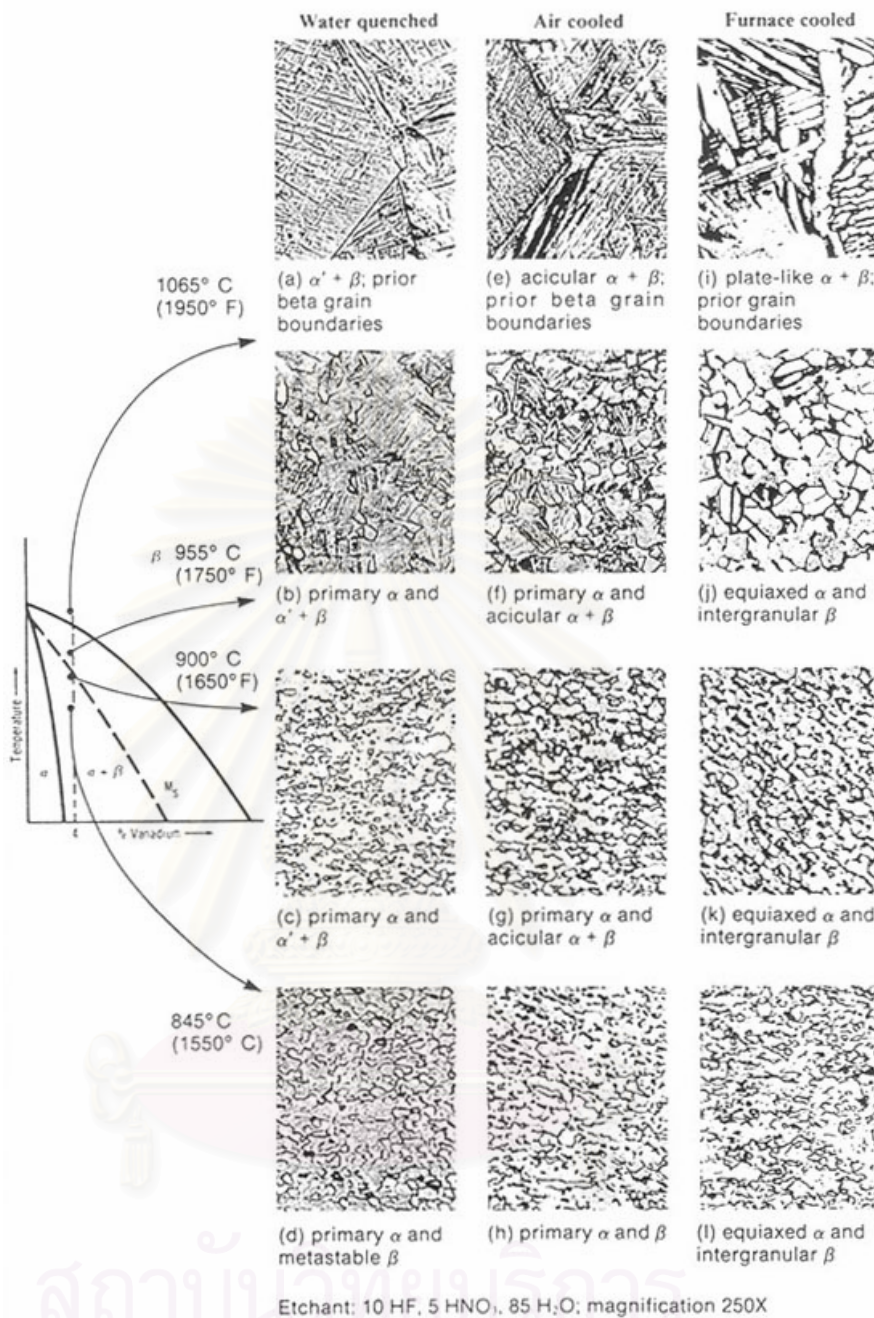
2.1.4 เฟสและโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม Ti-6Al-4V

ในโลหะผสม Ti-6Al-4V นอกจากจะพบเฟสอัลฟา และ เฟสเบต้าแล้วยังสามารถพบสารประกอบกึ่งโลหะได้อีก เช่น Ti_3Al (α_2) และเฟสโอเมกา (ω)

สำหรับการที่พบเฟสเบต้าบางส่วนได้ในโลหะผสม Ti-6Al-4V ที่อุณหภูมิห้อง เกิดขึ้นเพราะการใส่ธาตุวานาเดียมซึ่งเป็นสารเติมที่ช่วยให้เฟสเบต้าเสถียร จึงทำให้อุณหภูมิที่เกิดเฟสมาเทนไซต์สมบูรณ์ (martensite finish temperature : M_f) ลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ดังนั้นจึงสามารถพบเฟสเบต้าได้ในเนื้อชิ้นงาน โดยเฟสเบต้าที่อุณหภูมิสูงไม่ได้เปลี่ยนเป็นเฟสมาเทนไซต์ (α') ทั้งหมดหลังจากทำ solution treatment

โลหะผสม Ti-6Al-4V เป็นโลหะผสมประเภทอัลฟา-เบต้า โดยที่รูปร่าง ตำแหน่ง และปริมาณเฟสที่เกิดขึ้นจะแตกต่างกันออกไปทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิต กรรมวิธีทางความร้อนและปริมาณธาตุเจือผสม แสดงดังรูปที่ 2.2 เช่น หากนำชิ้นงานไปผ่านการอบอ่อนแล้วปล่อยให้เย็นตัวช้าๆ จะทำให้ Ti-6Al-4V มีเฟสอัลฟาได้ปริมาณถึงร้อยละ 90 โดยน้ำหนัก

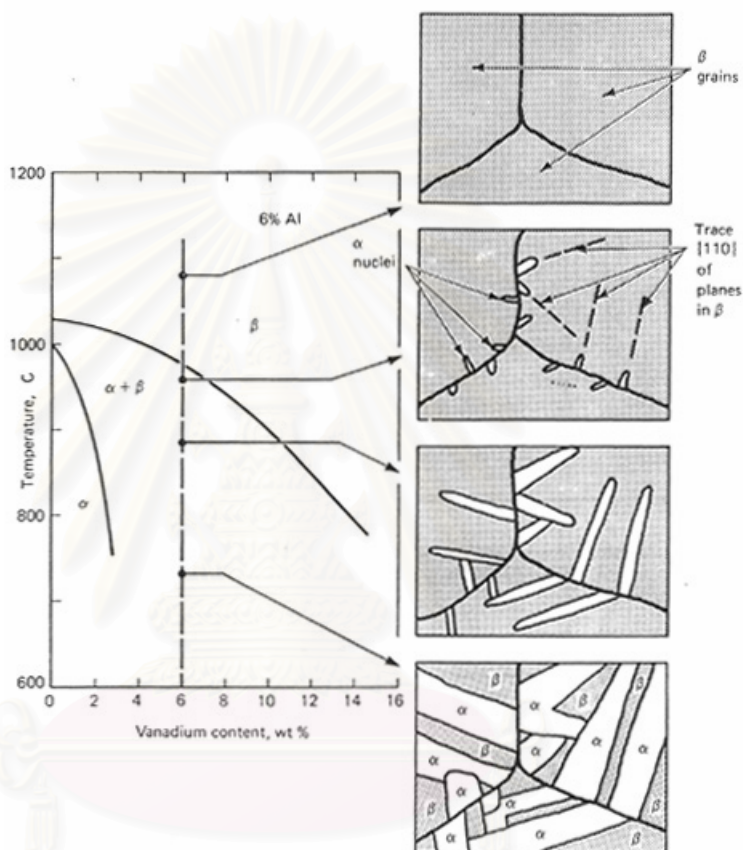
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.2 แผนภูมิสมดุลเฟสแสดงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลภาคของโลหะผสม Ti-6Al-4V

โลหะผสม Ti-6Al-4V มีลักษณะโครงสร้างจุลภาคมากมายโดยแตกต่างกันตามลักษณะการเรียงตัว (geometrical arrangement) ของเฟสอัลฟาและเบต้า จึงสามารถแบ่งโครงสร้างจุลภาคอย่างคร่าวๆจากสัณฐาน (morphology) ของเฟสอัลฟาได้เป็น 3 ลักษณะโครงสร้าง ได้แก่ Lamellar Equiaxed และBimodal

Lamellar structure เกิดจากให้ชิ้นงานเย็นตัวจากอุณหภูมิเหนืออุณหภูมิเปลี่ยนเฟส เมื่อเย็นตัวลงมาเฟสอัลฟาจะเริ่มเกิดขึ้น เมื่อชิ้นงานมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนเฟส เฟสอัลฟาจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยมีลักษณะเป็นแผ่น (platelike) ซึ่งทิศทางของการเกิดเฟสอัลฟานี้จะสัมพันธ์กับโครงสร้างผลึกของเฟสเบต้าเชื่อมกันเป็นโครงสร้างตาข่ายเกิดเป็นโครงสร้างลามลลา (Lamellar structure) หรือ โครงสร้างตาข่าย Widmanstatten

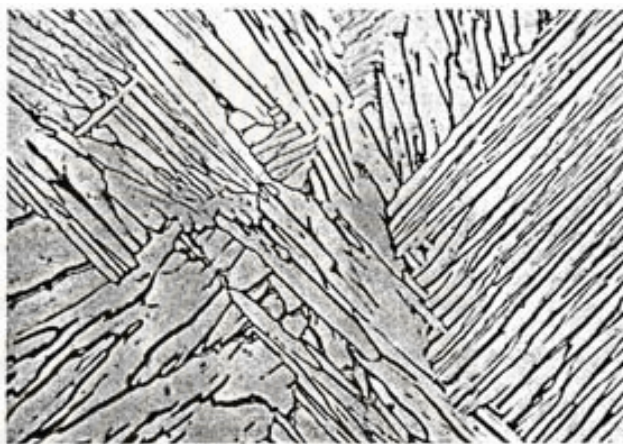


รูปที่ 2.3 ภาพจำลองการเกิดโครงสร้างตาข่าย Widmanstatten

จากรูปที่ 2.3 การเกิดเฟสอัลฟาจากเฟสเบต้าของโลหะผสม Ti-6Al-4V นี้ เริ่มโดยการมีเฟสเบต้าซึ่งเป็นพื้นที่สีดำ (ในรูปที่ 2.3) เมื่อเย็นตัวลงเกิดเฟสอัลฟาที่บริเวณขอบเกรนของเฟสเบต้าโดยโครงสร้างของแผ่นอัลฟา จะเกิดในทิศใดขึ้นอยู่กับข้อกำหนดของเฟสเบต้าที่ขนาดอยู่ทั้งสองด้านซึ่งจะมีทิศทางที่เฉพาะ เมื่ออุณหภูมิต่ำลงมาก แผ่นอัลฟาเหล่านี้จะมีขนาดเกรนใหญ่ขึ้นจนมาชนกัน เกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย Widmanstatten

แต่ทั้งนี้ขนาดของเกรนในโครงสร้างลามลลานั้นจะแตกต่างกันอีกตามอัตราการเย็นตัว กล่าวคือ ถ้าเย็นตัวเร็วจะได้โครงสร้างที่มีเกรนที่ละเอียดขึ้น แต่ถ้าเย็นตัวเร็วมาก เช่น การเย็นตัวในอากาศ (air cooling) จะได้เฟสอัลฟาที่มีลักษณะรูปร่างเข็มเล็กละเอียด เรียกว่า acicular alpha ซึ่งเป็นเฟส

มาเทนไซต์ (α') หรือ transformed-beta จากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วของเฟสเบต้าโดยใช้กลไกการเกิดนิวเคลียสและการโตขึ้นของเกรน (nucleation and growth) นั่นเอง โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม Ti-6Al-4V หลังจากการเย็นตัวอย่างช้าๆ จากอุณหภูมิเหนืออุณหภูมิเปลี่ยนเฟสมีลักษณะเป็นโครงสร้างตาข่ายแสดงได้ดังรูปที่ 2.4



(เฟสอัลฟา สีขาว มีลักษณะเป็นแผ่นอยู่ระหว่างเฟสเบต้า สีดำ)

รูปที่ 2.4 โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม Ti-6Al-4V หลังจากการเย็นตัวอย่างช้าๆ จากอุณหภูมิเหนืออุณหภูมิเปลี่ยนเฟส มีลักษณะเป็นโครงสร้างตาข่าย (Optical microscope ; 500x)

Equiaxed microstructure เป็นลักษณะเกรนที่เกิดจากการตกผลึกใหม่ (recrystallization) ซึ่งได้จากกรรมวิธีทางความร้อนหลายอย่าง เช่น การทำ mill annealing ที่อุณหภูมิ 925 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมงแล้วให้เย็นตัวอย่างช้าๆ ซึ่งจะทำให้ได้เฟสอัลฟาที่มีขนาดเกรนประมาณ 15 ถึง 20 ไมครอน

Bimodal type microstructure เป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วยเกรนของ primary alpha ที่มีลักษณะเกรนค่อนข้างกลมและ transformed-beta ที่มีลักษณะเป็นกลุ่มของเกรนรูปเข็ม ซึ่งโครงสร้างแบบนี้ได้จากการทำ solution treated และอบแช่อุณหภูมิ ซึ่งการอบแช่อุณหภูมินี้เองที่จะทำให้เกิดการตกตะกอนร่วม (precipitate) ของเฟสอัลฟาในเนื้อ primary alpha และเฟส transformed-beta

นอกจากโครงสร้างทั่วไปข้างต้นแล้วยังอาจพบ transformation structure อันได้แก่

Hexagonal close packed martensite (α') ซึ่งอาจพบได้หากให้ชิ้นงานเย็นตัวอย่างรวดเร็วจากอุณหภูมิที่สูงกว่า 900 องศาเซลเซียส ซึ่งลักษณะโครงสร้างจะเป็นเกรนเล็กๆรูปเข็ม

(acicular) หรือบางทีอาจเป็นโครงสร้างลามัลลาที่มีเกรนละเอียด โครงสร้างมาเทนไซต์นี้จะมีการจัดเรียงตัวอย่างไรนั้นขึ้นกับเฟสอัลฟาที่มีอยู่เดิม เฟส α' นี้จะมีค่าคงที่โครงร่าง (lattice parameter) เหมือนกับเฟสอัลฟา

Orthorhombic martensite (α') จะมีโอกาสพบถ้ามีธาตุวาเนเดียมผสมอยู่ร้อยละ 8 ถึง 12 โดยน้ำหนัก หรือใน Ti-6Al-4V มีโอกาสพบถ้าให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วจากอุณหภูมิ 750 ถึง 900 องศาเซลเซียส โดยเฟส α' นี้จะทำให้เกิดปัญหาความเค้นภายในชิ้นงานได้

Omega Precipitation (Ω) ไม่พบใน Ti-6Al-4V แต่มีโอกาสเกิดได้หากชิ้นงานมีปริมาณออกซิเจนสูงหรือมีธาตุวาเนเดียมสูงกว่าร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก โดยเฟส Ω นี้จะเกิดหากมีการอบแช่ที่อุณหภูมิต่ำ (200 ถึง 350 องศาเซลเซียส)

Ti₃Al Precipitation (α_2) มักเกิดจากการอบแช่โลหะผสม Ti-6Al-4V ระหว่างอุณหภูมิ 500 ถึง 600 องศาเซลเซียส โดยมีออกซิเจนในบรรยากาศ เพราะออกซิเจนจะไปขัดขวางความสามารถในการละลายของอะลูมิเนียมในเฟสอัลฟา ทำให้เฟสอัลฟามีปริมาณอะลูมิเนียมน้อยและเกิดเป็นสารประกอบ Ti₃Al ขึ้น

2.1.5 สมบัติทางกลและผลของโครงสร้างจุลภาคต่อสมบัติทางกลของโลหะผสม Ti-6Al-4V

สมบัติทางกลของโลหะผสม Ti-6Al-4V ขึ้นอยู่กับปริมาณและรูปร่างของเฟสที่เกิดจากการปรับปรุงเพื่อให้สมบัติตามต้องการนั้น มักทำโดยการปรับปรุงโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม จากกรรมวิธีทางความร้อน อาทิ

- mill annealing เพื่อให้ได้เฟสเบต้าที่กลมในเนื้อเฟสอัลฟา เป็นการลดความเค้นภายในชิ้นงาน นอกจากนี้ยังเป็นการรวมสมบัติทางด้านความเหนียวของเฟสอัลฟาและความแข็งแรงของเฟสเบต้าเข้าด้วยกัน

- duplex annealing เพื่อลดโครงสร้างตาข่าย ทำให้เพิ่มความต้านทานการเกิดรอยแตก (resistance to crack growth) และเพิ่มความเหนียวต้านทานการแตกหักของชิ้นงาน

- solution treatment และอบแช่เพื่อให้เกิดเฟสอัลฟาในเนื้อ retained beta และ primary alpha ทำให้ค่าความแข็งแรงการดึงของชิ้นงานเพิ่มขึ้น

สมบัติทางกลของโลหะผสม Ti-6Al-4V จากการผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเปรียบเทียบได้ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 สมบัติทางกลบางประการของโลหะผสม Ti-6Al-4V
จากการผ่านกรรมวิธีทางความร้อนต่างๆ⁽⁹⁾

Condition	Yield strength		Tensile strength		Elongation at fracture %
	MPa	ksi	MPa	ksi	
Mill annealed	945	137	1069	155	10
Duplex annealed	917	133	965	140	18
Solution treated and aged	1103	160	1151	167	13

นอกจากส่วนผสมทางเคมี กรรมวิธีการผลิตและกรรมวิธีทางความร้อนจะมีผลต่อโครงสร้างของโลหะผสม Ti-6Al-4V ยังมีปัจจัยที่สำคัญอีกประการ นั่นคือ อัตราการเย็นตัว (cooling rate) เช่น การเย็นตัวอย่างรวดเร็ว (rapid cooling) จะทำให้ได้โครงสร้างที่มีเกรนละเอียด วัสดุจึงมีความแข็งแรงมากขึ้น

ผลของอัตราการเย็นตัวมีผลต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม Ti-6Al-4V แสดงดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 สมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคจากการผ่านกรรมวิธีทางความร้อนที่
อุณหภูมิต่างๆของโลหะผสม Ti-6Al-4V⁽⁹⁾

Thermal treatment	Yield strength		Tensile strength		Elongation at fracture,%	Reduction in area,%	Microstructure at 25°C(77°F),approx. vol % phase
	MPa	ksi	MPa	ksi			
955°C (1751°F) Furnace cooled	834	121	937	136	19	46	90% alpha : 10% beta
955°C (1751°F) Water quenched	951	138	1117	162	17	60	50% primary alpha : 50% alpha prime + alpha double prime + retained beta
900°C (1625°F) Furnace cooled	855	124	965	140	17	43	90% alpha : 10% beta
900°C (1625°F) Water quenched	923	134	1117	162	15	54	60% primary alpha : 40% alpha prime + alpha double prime + retained beta

นอกจากนี้ ลักษณะของโครงสร้างและรูปร่างของเฟสที่เกิดก็มีผลต่อสมบัติทางกล แสดงได้ดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 สมบัติของโครงสร้างจุลภาคแบบ equiaxed และโครงสร้างแบบ acicular⁽⁹⁾

Equiaxed :

- * Higher ductility and formability
 - * Higher threshold stress for hot-salt stress corrosion
 - * Higher strength (for equivalent heat treatment)
- Better hydrogen tolerance
Better low-cycle fatigue (initiation) properties

Acicular :

- Superior creep properties
- Higher fracture-toughness values

โลหะผสม Ti-6Al-4V มีสมบัติทางกลแสดงได้ดังตารางที่ 2.8

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

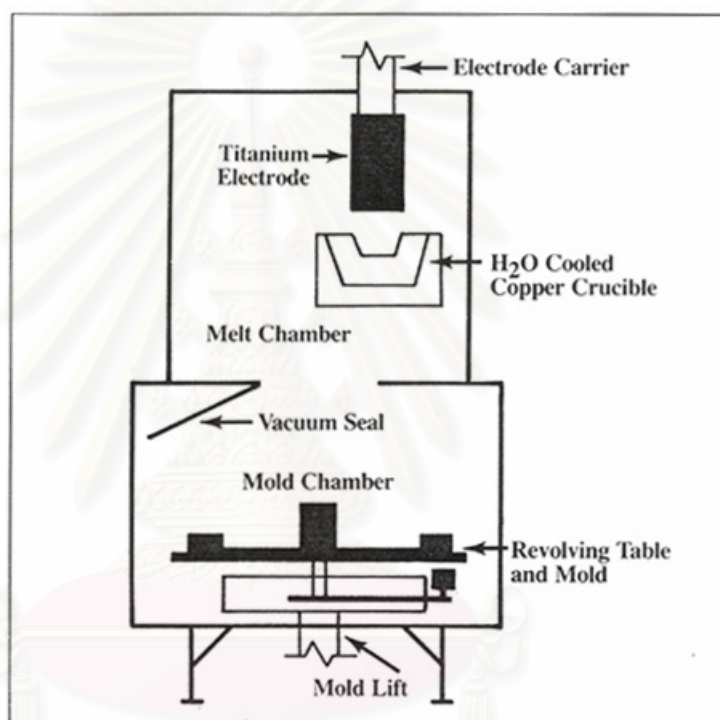
ตารางที่ 2.8 แสดงสมบัติทางกลของโลหะผสม Ti-6Al-4V (ค่าโดยเฉลี่ย) (9,10)

ชนิดของโลหะผสม	Condition	Average mechanical properties														
		Room temperature						Extreme temperature								
		Tensile st.		Yield st.		Elongation	Reduction in area	HRC	Temp. °C	Tensile st.		Yield st.		Elongation	Reduction in area	Charpy impact st.
MPa	ksi	MPa	ksi	%	%			MPa	ksi	MPa	ksi	%	%	J		
Ti-6Al-4V (alpha-beta alloy)	Annealed	993	144	924	134	14	30	36	315	724	105	655	95	14	35	14
									425	669	97	572	83	18	40	-
									540	531	77	427	62	35	50	-
Ti-6Al-4V low O ₂ (alpha-beta alloy)	Solution+Aging	1172	170	1103	160	15	35	41	315	862	125	703	102	10	28	-
									425	800	116	612	90	12	35	-
									540	655	95	483	70	22	45	-
	Annealed	896	130	827	120	15	35	35	160	1517	220	1413	205	14	-	18

2.1.6 กระบวนการหลอมโลหะผสม Ti-6Al-4V

การหลอมโลหะผสมชนิดนี้จะทำในสุญญากาศในเบ้าหลอมซึ่งทำจากทองแดงที่หล่อเย็นด้วยน้ำ และถ้าต้องการหล่อชิ้นงานให้เป็นรูปร่างต่างๆ จะเทน้ำโลหะลงในแบบหล่อที่ทำจากกราฟไฟต์โดยจะให้แรงดันขณะหล่อเพื่อช่วยให้น้ำโลหะไหลเข้าไปในแบบหล่อ แต่หากต้องการหล่อโลหะผสม Ti-6Al-4V เพื่อนำไปใช้เป็นชิ้นส่วนเพื่อใช้ในทางการแพทย์ จะใช้แบบหล่อที่ทำจากเซรามิคจำพวกควอตซ์ไฟ

ภาพจำลองกระบวนการหลอมและหล่อโลหะผสม Ti-6Al-4V แสดงได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 กระบวนการหลอมและหล่อโลหะผสม Ti-6Al-4V

ปัญหาจากการหล่อที่มักพบ คือ รูพรุนที่เกิดขึ้นในเนื้อโลหะ ดังนั้นหลังการหล่อแล้ว มักจะอัดขึ้นรูปร้อนทุกทิศทาง (Hot Isostatic Press : HIP) ในบรรยากาศที่ไม่ทำปฏิกิริยา เช่น บรรยากาศอาร์กอน อีกครั้งเพราะการลดรูพรุนเหล่านี้จะลดโอกาสที่ชิ้นงานจะแตกแบบผ่าเกรน (transgranular cracking) ทำให้ช่วยเพิ่มความแข็งแรงการล้าให้กับชิ้นงาน

2.2 วัสดุทดแทนทางการแพทย์ (Biomedical Implants)

วัสดุที่นำมาใช้ทดแทนในร่างกายมนุษย์ ต้องคำนึงถึงความต้องการในการใช้งานกายภาพของมนุษย์ และความเข้ากันได้ดีกับร่างกาย

วัสดุทดแทนทางการแพทย์ จะประกอบด้วยวัสดุหลายอย่าง ทั้งนี้เพื่อรวมข้อดีของแต่ละวัสดุเข้าด้วยกัน⁽¹⁴⁾ ได้แก่

1. มีสมบัติทางกลที่เข้ากับกายภาพมนุษย์ได้ดี เช่น ความแข็งกระด้าง (stiffness) ความเหนียว
2. ไบโอบีโอมิเมติก เช่น ไฮดรอกซีอะพาไทต์ ไบโอบีโอมิเมติกฟอสเฟต
3. โพลีเมอร์ เช่น UHMWPE (Ultra High Molecular Weight Polyethylene)

โลหะผสมจัดเป็น วัสดุทดแทนทางการแพทย์ประเภท bio-inert กล่าวคือ วัสดุประเภทนี้จะคงสมบัติทางฟิสิกส์และสมบัติเชิงกลไว้ตลอดการใช้งานในการเป็นวัสดุทดแทน⁽¹⁵⁻¹⁶⁾

2.3 โลหะผสม Ti-6Al-4V กับการใช้งานทางการแพทย์⁽¹⁷⁻²¹⁾

มีการคิดค้นการใช้วัสดุทดแทนทางการแพทย์จากโลหะผสมมาเป็นเวลานานแล้ว โดยวัสดุที่ใช้เป็นวัสดุทดแทนนั้นจะต้องมีสมบัติดังนี้

1. มีสมบัติทางกลที่เข้ากับกายภาพมนุษย์ได้ดี
2. ไม่ทำปฏิกิริยาต่อเนื้อเยื่อรอบข้างเข้ากันได้ดีกับกระดูกและเนื้อเยื่อรอบข้างของผู้ป่วย
3. ยึดเกาะกับวัสดุสังเคราะห์อื่นและไขกระดูกได้ดี
4. ทนทานระหว่างการใช้งาน เพราะต้องรับแรงภายในและแรงจากภายนอกซึ่งมีขนาดและความถี่ไม่คงที่

ดังนั้น โลหะที่สามารถใช้งานทางการแพทย์ได้จึงได้แก่

- เหล็กกล้าไร้สนิม 316L เป็นโลหะผสมชนิดแรกที่แพทย์นำมาใช้เป็นวัสดุทดแทน แต่เป็นโลหะที่สามารถทำปฏิกิริยาได้บ้างกับของเหลวภายในร่างกายมนุษย์ เหล็กกล้าไร้สนิมจึงทนการกัดกร่อนต่ำและยังอาจเกิดปัญหาในร่างกายไม่ยอมรับใคร่เมียมและนิเกิลอีกด้วย และหากเปรียบเทียบกับโลหะผสมอื่น เหล็กกล้าไร้สนิมจะมีความแข็งแรงต่ำกว่าและมีค่าโมดูลัสของยัง (Young's modulus) สูงกว่า

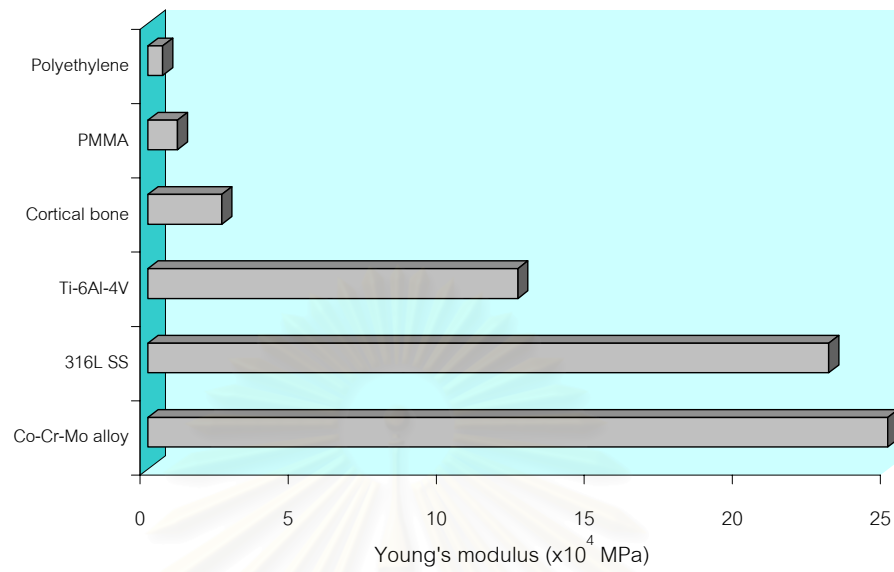
- โลหะผสม Co-Ni-Cr และโลหะผสม Co-Cr-Mo มีเปอร์เซ็นต์นิกเกิลสูงทำให้ความทนทานการกัดกร่อนต่ำและเนื้อเยื่อรอบข้างไม่ยอมรับ ทั้งยังมีความแข็งกระด้างที่สูงกว่ากระดูกมนุษย์มาก ทำให้เกิดปัญหากระดูกรอบชิ้นงานกร่อน เมื่อนำไปทำการกระดูกเทียม

เนื่องจากวัสดุข้างต้นมีปัญหาเมื่อนำไปใช้งาน จึงมีการคิดค้นตั้งแต่ปี ค.ศ.1970 โดยนำเอาโลหะผสม Ti-6Al-4V มาใช้งานและได้ทดลองใช้จริงในร่างกายมนุษย์ในปี ค.ศ. 1974 โดยนิยมนำมาทำตัวน็อตสำหรับยึดกระดูก ส่วนหัวและก้านกระดูกต้นขา กระดูกเข่า กระดูกข้อศอก กระดูกกราม กระดูกนิ้ว กระดูกหัวไหล่ และวัสดุทดแทนทางการแพทย์อื่นๆ เนื่องจาก

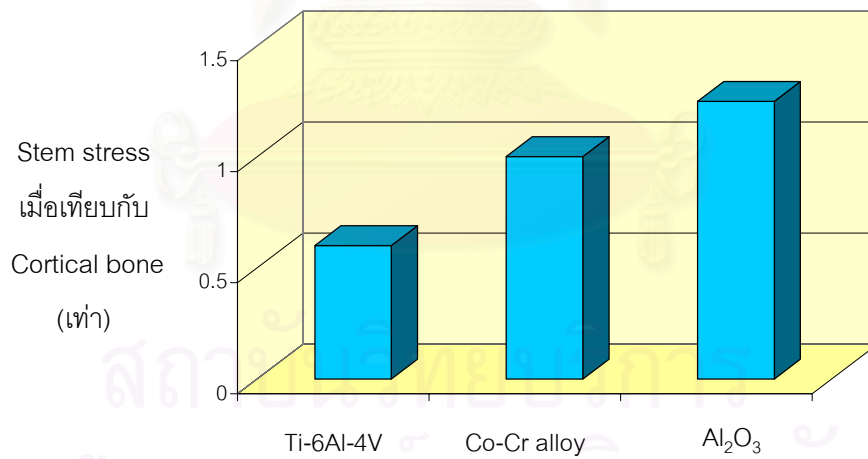
- มีความทนทานการกัดกร่อนสูง
- มีความทนทานการล้าสูง
- ความหนาแน่นต่ำ ทำให้ลดปัญหาเรื่องความเค้นที่เกิดรอบๆ วัสดุน้อยลง
- ความแข็งแรงที่จุดคราก (yield strength) ต่ำกว่าโลหะอื่นและไม่สูงมากเมื่อเทียบกับกระดูกมนุษย์ ดังนั้นปัญหาเรื่องความเค้นรอบๆ ชิ้นงาน (stress sheilding) จึงน้อยกว่าโลหะประเภทอื่น ทำให้ไม่ต้องผ่าตัดเปลี่ยนวัสดุทดแทนในภายหลังเพราะจากการศึกษาของ Canine⁽²¹⁾ พบว่า ความแข็งกระด้าง ของวัสดุเป็นเรื่องสำคัญในการเลือกวัสดุเพื่อผลิตวัสดุทดแทน เขาศึกษาโดยการลดค่าโมดูลัสของยัง ของวัสดุที่ใช้ทำกระดูกเทียมพบว่าเมื่อลดปัญหาการกร่อนของกระดูกหลังจากการผ่าตัดได้ เนื่องจากเป็นการลดความเค้นบริเวณรอบๆ ชิ้นงานลง

จากรูปที่ 2.6 และ 2.7 เมื่อเปรียบเทียบค่าโมดูลัสของยัง พบว่า Ti-6Al-4V มีค่าต่ำกว่าโลหะอื่น ทำให้เกิดความเค้นน้อยเมื่อใช้ทดแทนในร่างกาย สามารถลดความเค้นที่เกิดจากการเสียดสีกับกระดูกรอบข้างลงได้ถึงร้อยละ 20 มีผลทำให้โลหะผสม Ti-6Al-4V มีอายุการใช้งานที่นานกว่า ไม่เป็นอันตรายกับกระดูกและเนื้อเยื่อรอบข้างชิ้นงาน

สถาบันนวัตกรรมการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.6 เปรียบเทียบค่าโมดูลัสของยังของวัสดุชนิดต่างๆ กับ cortical bone



รูปที่ 2.7 เปรียบเทียบค่าความเค้นที่เกิดขึ้นจากการใช้วัสดุทดแทนจากวัสดุชนิดต่างๆ

บทที่ 3 ระเบียบวิธีการวิจัย

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ทดลอง

3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การเตรียมชิ้นงานทดลอง

- Cutting Machine Struers Discotom – 2
- Electric Arc furnace CENTORR No.5BJ
- Cutting Machine Isomet 100 Buehler
- Heat Treatment Furnace Carbolite Type 15 / XX / 450

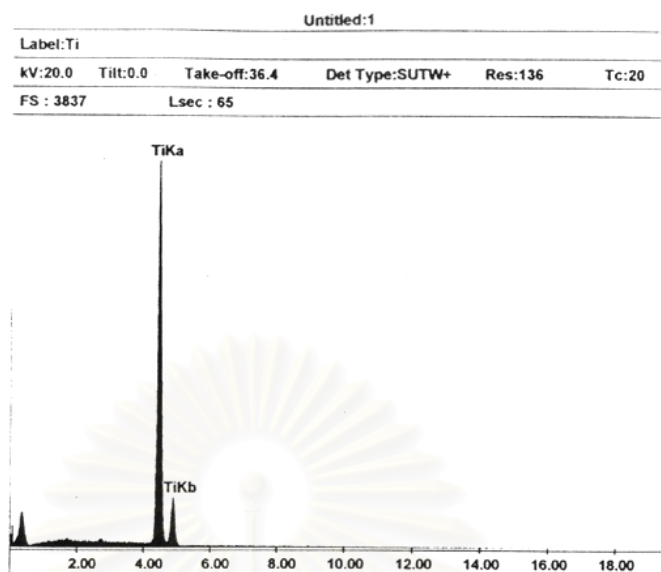
3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ทดสอบและตรวจสอบ

- Scanning Electron Microscope HITACHI S –2300 โดยต่อ Energy Dispersive Spectroscopy NORAN
- Optical microscope
- Image Analyzer (LEICA)
- Scanning Electron Microscope Phillip XL 30 CP โดยต่อ Energy Dispersive Spectroscopy EDAX DX 4 สำหรับ Mapping
- X – ray Diffractometer Rigaku
- Density Determination Kit ของ OHAUS
- ESEWAY Hardness Tester type R

3.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 เศษโลหะไทเทเนียม

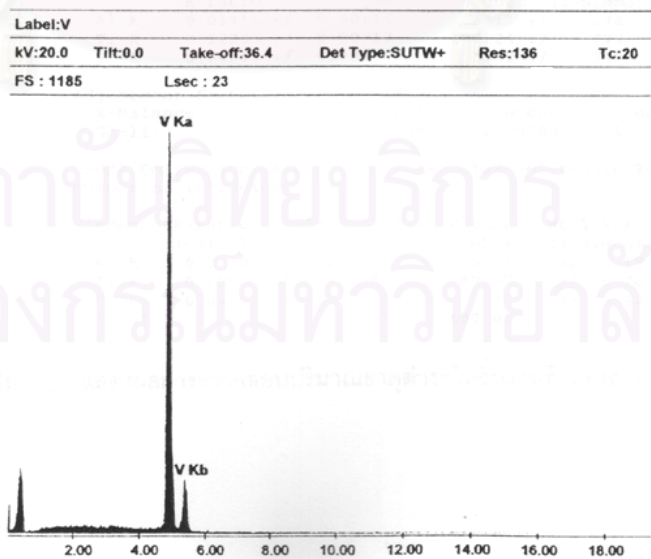
เศษโลหะไทเทเนียมที่ใช้ในการทดลองได้จาก บริษัทพัฒนานาฬิกา จำกัด มีลักษณะเป็นแผ่นที่ถูกเจาะรูแล้ว ซึ่งมีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.8 โดยน้ำหนัก ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมด้วย EDS แสดงได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ผลจากการวิเคราะห์ด้วย EDS ของเศษโลหะไทเทเนียม

3.2.2 วานเดียม

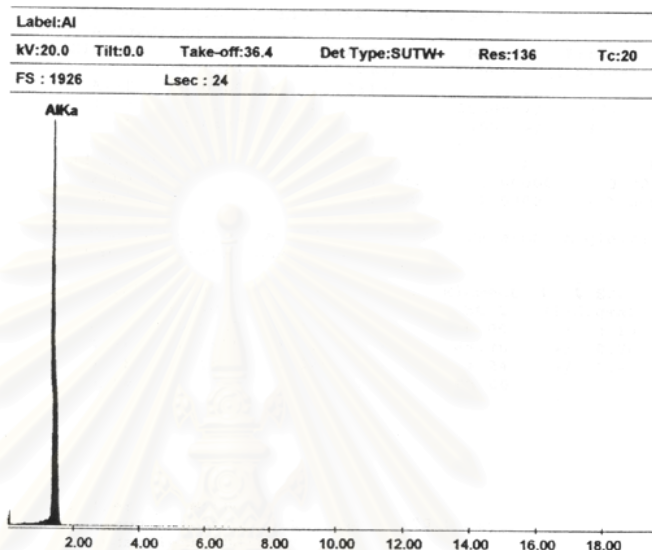
วานเดียมที่ใช้ในการทดลองได้จาก หจก. ฮีรานะ เซสอะเมอน (ญี่ปุ่น) มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.7 โดยน้ำหนัก ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมด้วย EDS แสดงได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ผลจากการวิเคราะห์ด้วย EDS ของวานเดียม

3.2.3 อะลูมิเนียม

อะลูมิเนียมที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะเป็นก้อน (ingot) ซึ่งมีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5 โดยน้ำหนัก ผลการวิเคราะห์ที่ส่วนผสมด้วย EDS แสดงได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ผลจากการวิเคราะห์ด้วย EDS ของอะลูมิเนียม

3.3 วิธีดำเนินการทดลอง

3.3.1 วิธีเตรียมชิ้นงานทดลอง

3.3.1.1 ย่อยวัตถุดิบ ซึ่งได้แก่ เศษโลหะไทเทเนียม วาเนเดียม และอะลูมิเนียม ด้วยเครื่อง Cutting Machine Struers Discotom – 2 จนได้ก้อนขนาดเล็ก ประมาณ 0.5 เซนติเมตร

3.3.1.2 ล้างทำความสะอาดผิววัตถุดิบด้วย ผงซักฟอก และอะซีโตน (Acetone) อบให้แห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ประมาณ 30 นาที

3.3.1.3 ชั่งวัตถุดิบตามสัดส่วน สำหรับเตรียมชิ้นงานจำนวน 40 ชิ้นงาน ซึ่งผลของการชั่งวัตถุดิบเพื่อหาลอมของทั้ง 40 ชิ้นงานแสดงได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สัดส่วนเทียบเป็นร้อยละโดยน้ำหนักและน้ำหนักของวัตถุดิบสำหรับแต่ละชิ้นงาน

sample	titanium (g.)	wt% Ti	aluminium (g.)	wt% Al	vanadium (g.)	wt% V	total weight (g.)
no.1	27.06	89.45	1.99	6.58	1.20	3.97	33.02
no.2	27.00	89.97	1.81	6.03	1.20	4.00	30.01
no.3	27.00	89.94	1.82	6.06	1.20	4.00	30.02
no.4	27.01	90.00	1.80	6.00	1.20	4.00	30.01
no.5	27.01	90.00	1.80	6.00	1.20	4.00	30.01
no.6	27.00	90.00	1.80	6.00	1.20	4.00	30.00
no.7	27.00	89.97	1.81	6.03	1.20	4.00	30.01
no.8	27.00	90.00	1.80	6.00	1.20	4.00	30.00
no.9	27.01	90.00	1.80	6.00	1.20	4.00	30.01
no.10	26.99	90.00	1.80	6.00	1.20	4.00	29.99
no.11	27.01	89.97	1.81	6.03	1.20	4.00	30.02
no.12	27.00	90.00	1.80	6.00	1.20	4.00	30.00
no.13	27.00	90.00	1.80	6.00	1.20	4.00	30.00
no.14	27.00	90.00	1.80	6.00	1.20	4.00	30.00
no.15	27.00	89.94	1.82	6.06	1.20	4.00	30.02
no.16	27.00	89.94	1.82	6.06	1.20	4.00	30.02
no.17	27.00	89.97	1.81	6.03	1.20	4.00	30.01
no.18	27.00	89.97	1.81	6.03	1.20	4.00	30.01
no.19	27.00	90.00	1.80	6.00	1.20	4.00	30.00
no.20	27.00	90.00	1.80	6.00	1.20	4.00	30.00
no.21	27.00	89.97	1.81	6.03	1.20	4.00	30.01

ตารางที่ 3.1 (ต่อ)

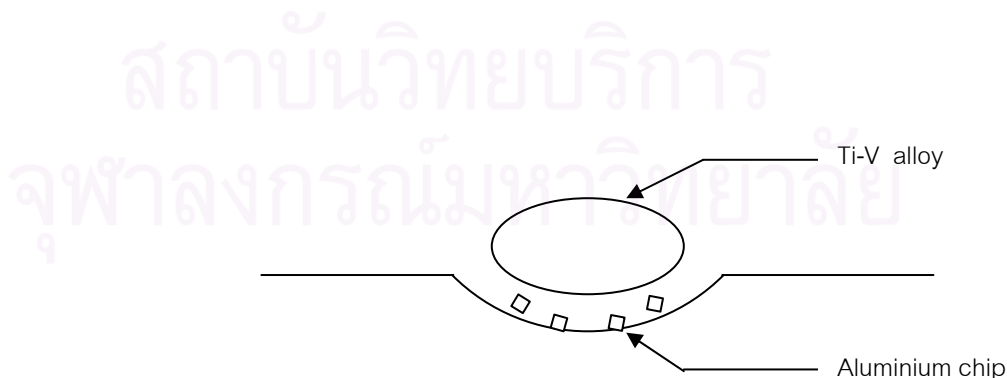
Sample	titanium (g.)	wt% Ti	aluminium (g.)	wt% Al	vanadium (g.)	wt% V	total weight (g.)
No.22	27.00	89.97	1.81	6.03	1.20	4.00	30.01
No.23	27.00	90.00	1.80	6.00	1.20	4.00	30.00
No.24	27.00	90.00	1.80	6.00	1.20	4.00	30.00
No.25	27.00	89.97	1.81	6.03	1.20	4.00	30.01
No.26	27.00	89.97	1.81	6.03	1.20	4.00	30.01
No.27	27.00	90.00	1.80	6.00	1.20	4.00	30.00
No.28	27.00	90.00	1.80	6.00	1.20	4.00	30.00
No.29	27.01	89.97	1.81	6.03	1.20	4.00	30.02
No.30	27.01	89.97	1.81	6.03	1.20	4.00	30.02
No.31	27.00	90.00	1.80	6.00	1.20	4.00	30.00
No.32	27.00	90.00	1.80	6.00	1.20	4.00	30.00
No.33	27.00	90.00	1.80	6.00	1.20	4.00	30.00
No.34	27.00	90.00	1.80	6.00	1.20	4.00	30.00
No.35	27.00	90.00	1.80	6.00	1.20	4.00	30.00
No.36	27.00	90.00	1.80	6.00	1.20	4.00	30.00
No.37	27.00	90.00	1.80	6.00	1.20	4.00	30.00
No.38	27.00	90.00	1.80	6.00	1.20	4.00	30.00
No.39	27.01	90.00	1.80	6.00	1.20	4.00	30.01
No.40	27.01	90.00	1.80	6.00	1.20	4.00	30.01
	ค่าเฉลี่ย	89.99		6.01		4.00	
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.01915		0.0200		0.0011	

3.3.1.4 หลอมวัสดุดิบสำหรับแต่ละชิ้นงานในเตาอาร์คไฟฟ้า (Electrical Arc Furnace CENTORR No.5BJ) ซึ่งมีเบ้าทองแดงหล่อเย็นด้วยน้ำ มีทั้งสแตนเป็นหัวอาร์ค โดย

3.3.1.4.1 ทำการดูดอากาศภายในเตาอาร์คออกด้วย mechanical pump ให้มีความดันอากาศภายในเตามีค่า 1×10^{-1} ปาสคาล⁽²²⁾ แล้วปล่อยก๊าซอาร์คอนเข้าไปในเตาทำให้ในเตาเป็นบรรยากาศอาร์คอน ทำซ้ำขั้นตอนการดูดอากาศอีก 3 ครั้ง แล้วจึงปล่อยก๊าซอาร์คอนให้ผ่านเตาด้วยอัตรา 0.5 ลิตรต่อนาที

3.3.1.4.2 แยกหลอมเฉพาะไทเทเนียมและวานาเดียมโดยใช้กระแส 0.15 กิโลแอมแปร์ ความต่างศักย์ 20 โวลต์ เพื่อให้ผิวของชิ้นงานหลอมติดกัน ป้องกันวัสดุดิบกระเด็นออกนอกเบ้าหลอม แล้วเพิ่มกระแสเป็น 0.6 กิโลแอมแปร์ ความต่างศักย์ 20 โวลต์ จอหัวอาร์คเข้าใกล้ก่อนวัสดุดิบเพื่อให้หลอมละลายเป็นบ่อน้ำโลหะ วนหัวอาร์ครอบชิ้นงานเป็นลักษณะวงกลม เพื่อให้ทุกจุดหลอมเป็นเนื้อเดียวกัน ทิ้งไว้จนชิ้นงานเย็นแล้วพลิกชิ้นงานเพื่อหลอมอีก 4 ครั้ง

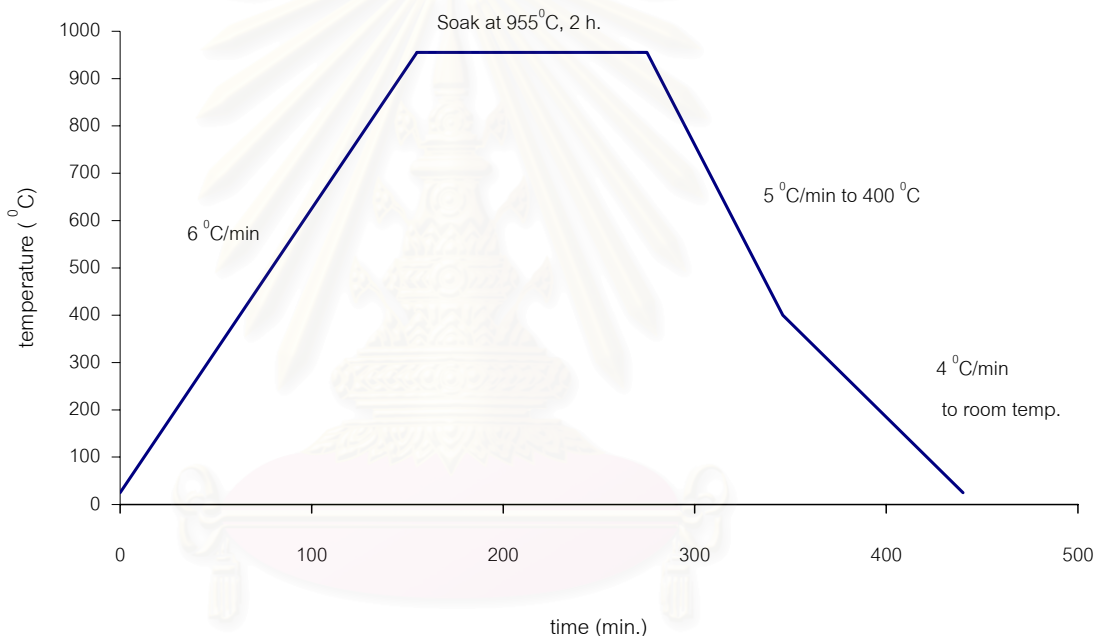
3.3.1.4.3 รอให้ชิ้นงานเย็น (อุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส) เปิดเตาเติมอะลูมิเนียมไว้ด้านล่างของเบ้าโดยมีโลหะผสมระหว่างไทเทเนียมและวานาเดียมทับข้างบน ดังรูปที่ 3.4 ใช้กระแส 0.6 กิโลแอมแปร์ ความต่างศักย์ 20 โวลต์ เพื่อหลอมวัสดุดิบเข้าด้วยกัน พลิกชิ้นงานหลอมอีก 4 ครั้ง รอให้ชิ้นงานเย็นนำออกจากเตา



รูปที่ 3.4 การวางวัสดุดิบสำหรับการหลอม

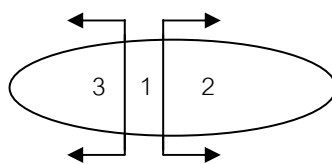
3.3.1.5 เลือกชิ้นงานเพื่อนำไปทดสอบโครงสร้างจุลภาคก่อนทำกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อให้เป็นเนื้อเดียวกัน

3.3.1.6 นำชิ้นงานที่ได้ไปอบในเตา Carbolite Type 15/xx//450 เพื่อทำกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน (Homoginization) ในบรรยากาศก๊าซอาร์กอน โดยปล่อยก๊าซอาร์กอนผ่านเตาด้วยอัตรา 4 ลิตรต่อนาที ตารางควบคุมอุณหภูมิอัตราการให้ความร้อนและเวลา^(23,24) ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 อัตราการให้ความร้อนและเวลา
ในการทำกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน

3.3.1.7 ตัดชิ้นงานเพื่อเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบสมบัติทางกลและสมบัติทางกายภาพโดย Cutting Machine ดังรูปที่ 3.6



โดย ชั้นที่ 1 สำหรับทดสอบสมบัติทางกล (HRC)
ชั้นที่ 2 สำหรับทดสอบสมบัติทางกายภาพ

รูปที่ 3.6 การตัดชิ้นงานเพื่อนำไปทดสอบ

3.3.2 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของชิ้นงาน

3.3.2.1 การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีเชิงปริมาณด้วย X-ray diffractometer

3.3.2.1.1 กัดผิวชิ้นงานด้วยกรด 10HF 5HNO₃ 85H₂O เป็นเวลาประมาณ 4 ถึง 5 วินาที แล้วทำความสะอาดผิวด้วยอะซิโตน

3.3.2.1.2 ตรวจสอบด้วย XRD ที่มี Cu target K- α_1 ที่ 40 kV. 30 mA.

โดยใช้

Scan step	0.020 deg.
Scan speed	5.000 deg./min
Beam slit	0.500 deg.
Receiving slit	0.300 mm.
Scanning range	5.00-60.00 deg.

3.3.2.1.3 ทำ peak search เทียบกับคาร์ดมาตรฐาน JCPD ที่มีอยู่

3.3.2.2 การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วย Energy Dispersive Spectroscopy

3.3.2.2.1 ขัดผิวชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ 220, 320, 600, 800 ,1000 ตามลำดับ

3.3.2.2.2 ทำความสะอาดผิวชิ้นงานด้วยอะซิโตน

3.3.2.2.3 ตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope HITACHI S-2300 ซึ่งต่อ Energy Dispersive

Spectroscopy NORAN ความต่างศักย์ 15 KV กำลังขยาย 1500 เท่า
ชิ้นงานละ 3 จุด

3.3.2.3 การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วย Atomic Absorption

3.3.2.3.1 ตัดชิ้นงานและชั่งน้ำหนัก เพื่อนำไปละลายด้วยกรดบอริก
ความเข้มข้น 4 กรัมต่อลิตร

3.3.2.3.2 แล้วเติมกรดไฮโดรฟลูออริกและกรดไนตริกเข้มข้น กวนด้วยความ
ร้อนจนชิ้นงานละลายสมบูรณ์

3.3.2.3.3 นำสารละลายที่ได้ไปตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยเครื่อง
Atomic Absorption

3.3.2.4 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

3.3.2.4.1 ขัดผิวชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ 220 ,320 ,400 ,600 ,800
,1000 ,1200 ตามลำดับ แล้วขัดชิ้นงานด้วยผงเพชร (diamond paste)
ขนาด 20 ,6 ,3 และ 1 ไมครอน ตามลำดับ

3.3.2.4.2 กัดผิวชิ้นงานด้วยกรด 10HF 5HNO_3 $85\text{H}_2\text{O}$ เป็นเวลาประมาณ
4 ถึง 5 วินาที แล้วทำความสะอาดผิวด้วยอะซีโตน

3.3.2.4.3 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบ
แสง (Optical Microscope) ที่กำลังขยาย 200 และ 500 เท่า

3.3.2.5 การหาสัดส่วนของเฟสอัลฟาต่อเฟสเบต้าที่เกิดขึ้นงาน (α - β ratio)

ด้วยวิธี Image Analysis

3.3.2.5.1 นำภาพโครงสร้างขนาดกำลังขยาย 500 เท่า มาเข้าโปรแกรมหา
สัดส่วนพื้นที่ของเครื่อง Image Analyzer (LEICA) ซึ่งจะคำนวณพื้นที่ตาม
สมการ

$$\lambda = (L_a) \left[\frac{1 - (V_v)_a}{(V_v)_a} \right] \quad (3.1)$$

เมื่อ λ = ระยะห่างของเฟส a ถึง เฟส a

$(V_v)_a$ = อัตราส่วนของเฟส a

L_a = ความกว้างเฉลี่ยของเฟส a

3.3.2.5.2 ปรับค่าความแตกต่างของภาพ 3 ค่าต่อชิ้นงานเพื่อคำนวณหาสัดส่วนของเฟสอัลฟาต่อเฟสเบต้า

3.3.2.6 การหาการกระจายตัวของธาตุผสมในชิ้นงานด้วยวิธี X-ray mapping

3.3.2.6.1 ชัดผิวชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ 220 ,320 ,400 ,600 ,800 ,1000 ,1200 แล้วขัดด้วยผงเพชรขนาด 20 ,6 ,3 และ 1 ไมครอน ตามลำดับ

3.3.2.6.2 หาการกระจายตัวของธาตุไทเทเนียม อะลูมิเนียม และวาเนเดียมในชิ้นงาน โดยสุ่มเลือกมา 3 ชิ้นงาน ชิ้นงานละ 2 จุด ที่กำลังขยาย 500 เท่า 25 kV ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (Phillip XL30 CP) และ Energy Dispersive Spectroscopy (EDAX DX-4)

3.3.2.7 การวัดความหนาแน่นของชิ้นงาน

3.3.2.7.1 ชั่งน้ำหนักชิ้นงานในอากาศ (A)

3.3.2.7.2 ชั่งน้ำหนักชิ้นงานในน้ำกลั่น (B)

3.3.2.7.3 คำนวณความหนาแน่นของชิ้นงาน (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) ตามสมการ

$$\text{density} = \frac{A}{(A - B)} \rho_o \quad (3.2)$$

โดย ρ_o คือ ความหนาแน่นของน้ำ ณ อุณหภูมิที่ตรวจสอบ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

A คือ น้ำหนักของชิ้นงานเมื่อชั่งในอากาศ (กรัม)

B คือ น้ำหนักของชิ้นงานเมื่อชั่งในน้ำ (กรัม)

3.3.3 การตรวจสอบสมบัติทางกลของชิ้นงาน

ทดสอบสมบัติทางกลโดยวิธีวัดค่าความแข็งแบบร็อคเวลล์เอสซี (HRC) โดยใช้น้ำหนักกด 150 กิโลกรัม ทดสอบชิ้นงานละ 5 จุด

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

4.1 ผลการหลอมชิ้นงาน

ทดสอบการลดการสูญเสียอะลูมิเนียมขณะหลอมโดยวิธีการหลอมที่แตกต่างกัน คือ

วิธีที่ 1 หลอมแบบแยกอะลูมิเนียม แยกไทเทเนียมและวานาเดียม เพื่อทำการหลอมเชื่อมผิววัตถุดิบและหลอมจริง จากนั้นนำโลหะผสมไทเทเนียม-วานาเดียม วางทับบนชั้นอะลูมิเนียม แล้วทำการหลอมรวมกันอีกครั้ง

วิธีที่ 2 หลอมแบบธรรมดา วางวัตถุดิบทั้งสามในตำแหน่งสุ่ม ทำการหลอมเชื่อมผิววัตถุดิบแล้วหลอมจริง

จะเห็นได้ว่าการหลอมแบบแยกอะลูมิเนียม จะมีค่าร้อยละโดยน้ำหนักของอะลูมิเนียมมากกว่าการหลอมแบบธรรมดา ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลเปรียบเทียบส่วนผสมทางเคมีที่วิเคราะห์ด้วย Energy Dispersive Spectroscopy ของชิ้นงานที่หลอมแบบแยกอะลูมิเนียม และหลอมแบบธรรมดา

ร้อยละของธาตุผสม โดยน้ำหนัก	แบบแยกอะลูมิเนียม		แบบธรรมดา	
	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
Ti	89.45	89.18±1.02	89.48	89.95±0.76
Al	6.58	6.09±0.29	6.55	5.28±0.21
V	3.97	4.73±0.64	3.97	4.78±0.47

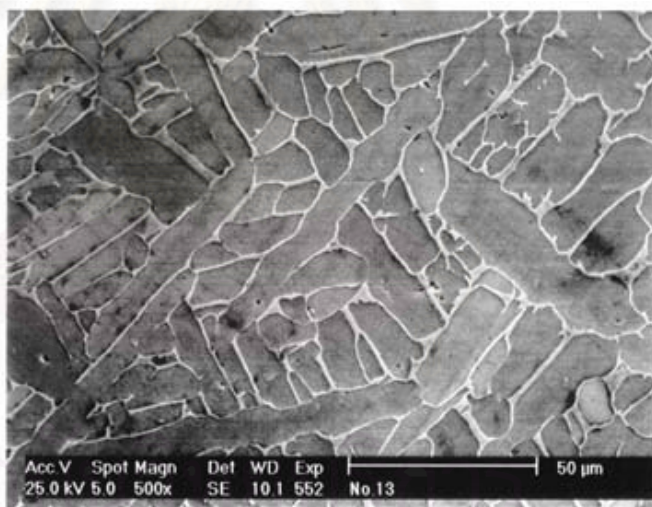
ดังนั้นเพื่อเป็นการป้องกันการสูญเสียเนื้ออะลูมิเนียมจากการหลอม งานวิจัยนี้จึงเลือกวิธีการหลอมแบบที่ 1 คือ ทำการหลอมไทเทเนียมและวานาเดียมรวมกันก่อน แล้วจึงนำมาหลอมรวมกับอะลูมิเนียมอีกครั้ง

4.2 ผลจากการใช้กรรมวิธีทางความร้อนเพื่อให้โลหะผสมเป็นเนื้อเดียวกัน

จากการนำชิ้นงานทั้งหมดไปผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อทำให้เป็นเนื้อเดียวกันที่ 955 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงในบรรยากาศอาร์กอนแล้วให้เย็นตัวด้วยอัตราเร็วประมาณ 4 ถึง 5 องศาเซลเซียสต่อนาที

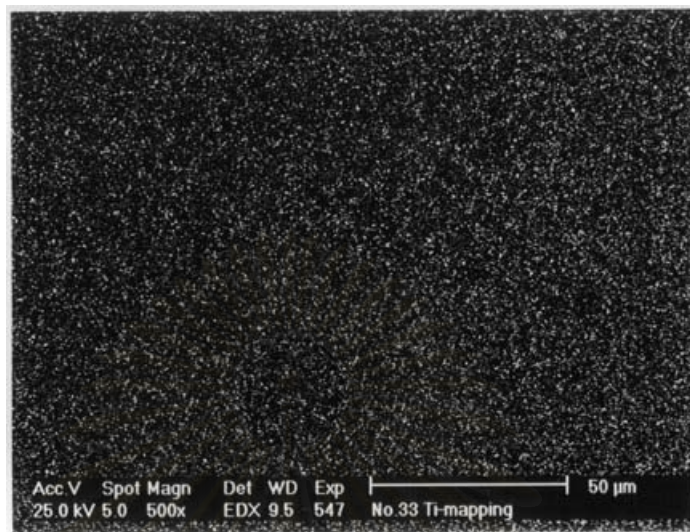
4.2.1 ผลการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุในชิ้นงานด้วยการทำ X-ray mapping

จากการตรวจสอบชิ้นงาน 3 ชิ้นจากการสุ่มเลือก พบว่าการกระจายตัวของธาตุผสม อันได้แก่ ไทเทเนียม วานเดียม อะลูมิเนียม ในชิ้นงานหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั้งชิ้นงาน ผลแสดงดังรูปที่ 4.1 4.2 4.3 และ 4.4

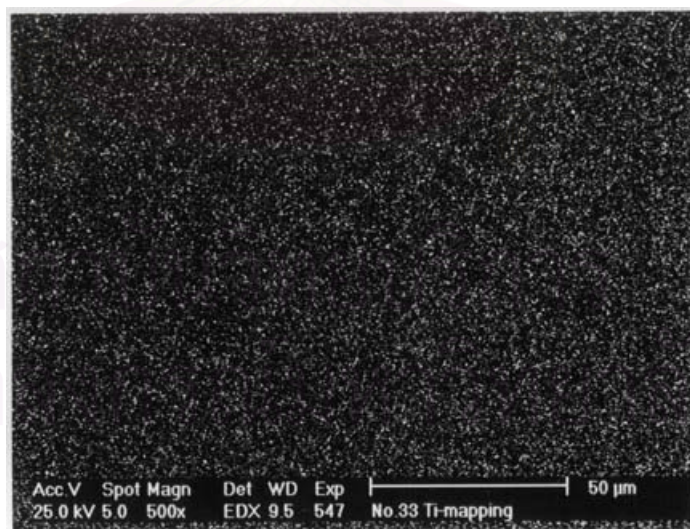


รูปที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคจาก SEM ของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อให้เป็นเนื้อเดียวกันที่ 955 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

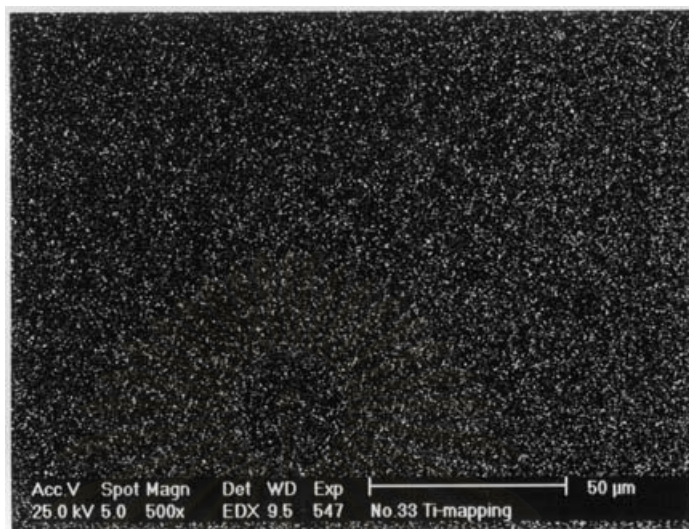
จากการตรวจสอบด้วย (Scanning Electron Microscope) SEM พบว่าลักษณะเกรนในชิ้นงานเกรน มีลักษณะเกรนค่อนข้างยาว ดังรูปที่ 4.1 โดยมีเฟสอัลฟาเป็นพื้นเกรนและเฟสเบต้าที่บริเวณขอบเกรน



รูปที่ 4.2 X-ray mapping แสดงการกระจายตัวของธาตุไทเทเนียมในชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนทำให้เป็นเนื้อเดียวกันที่ 955 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



รูปที่ 4.3 X-ray mapping แสดงการกระจายตัวของธาตุวานาเดียมในชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนทำให้เป็นเนื้อเดียวกันที่ 955 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



รูปที่ 4.4 X-ray mapping แสดงการกระจายตัวของธาตุอะลูมิเนียมในชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนทำให้เป็นเนื้อเดียวกันที่ 955 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

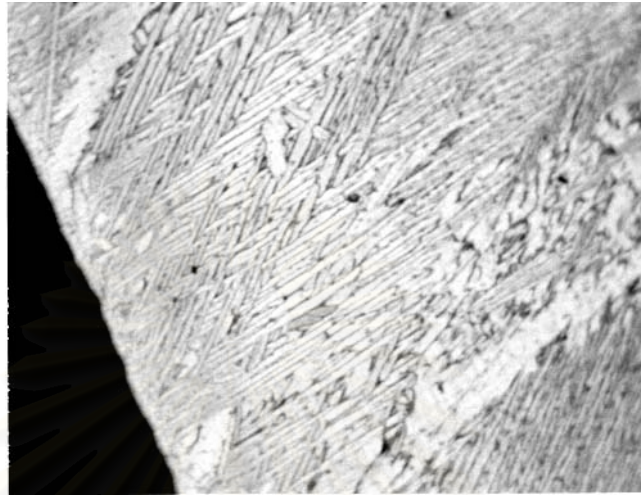
จากผลการตรวจสอบการกระจายตัวของธาตุผสมในชิ้นงาน จาก X-ray mapping นี้ แสดงว่า การอบที่ 955 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วให้เย็นตัวในเตาด้วยอัตราเร็ว ประมาณ 4 ถึง 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ในบรรยากาศอาร์กอน เป็นคุณสมบัติและเวลาที่เหมาะสม ในการทำกรรมวิธีทางความร้อนให้เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenization) ของโลหะผสม Ti-6Al-4V ที่มีขนาดชิ้นงานประมาณ 3x3x1.5 เซนติเมตร

4.2.2 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

4.2.2.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานก่อนผ่านกรรมวิธีทางความร้อนทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน

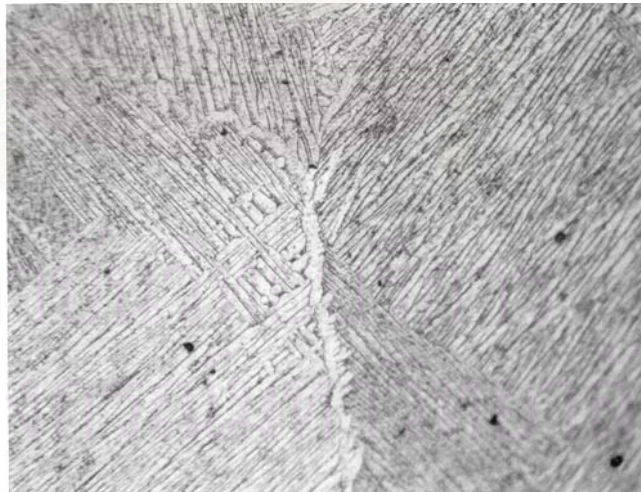
โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ได้จากการหลอมด้วยเตาอาร์คไฟฟ้า มีลักษณะเป็นโครงสร้างลามัลลาละเอียดทั่วทั้งชิ้นงาน โดยบริเวณกลางชิ้นงานจะมีเกรนที่ใหญ่กว่าบริเวณผิวชิ้น

งานเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิการหลอมในเตาอาร์คสูง และมีอัตราการเย็นตัวสูงเนื่องจากแบบหล่อนั้นหล่อเย็นด้วยน้ำ โครงสร้างของชิ้นงานหลังทำการหลอมแสดงได้ดังรูปที่ 4.5 และ รูปที่ 4.6



X500

รูปที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคบริเวณผิวของชิ้นงานหลังผ่านการหลอมด้วยเตาอาร์คไฟฟ้า ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง



X500

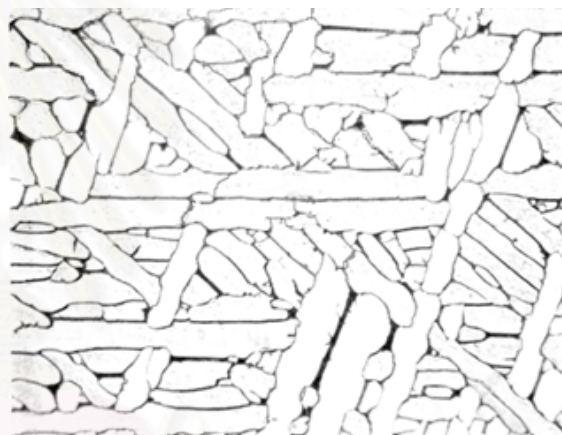
รูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคบริเวณกลางชิ้นงานหลังผ่านการหลอมด้วยเตาอาร์คไฟฟ้า ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

4.2.2.2 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนทำให้เป็นเนื้อเดียวกันที่ 955 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วเย็นตัวด้วยอัตราเร็วประมาณ 4 ถึง 5 องศาเซลเซียสต่อวินาที ในเตาอาร์คไฟฟ้า บรรยากาศอาร์กอน มีลักษณะเป็นโครงสร้างลามัลลา ซึ่งโครงสร้างนี้เกิดจากการอบแช่อุณหภูมิและควบคุมการเย็นตัวให้เป็นไปอย่างช้าๆ แสดงได้ดังรูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.8

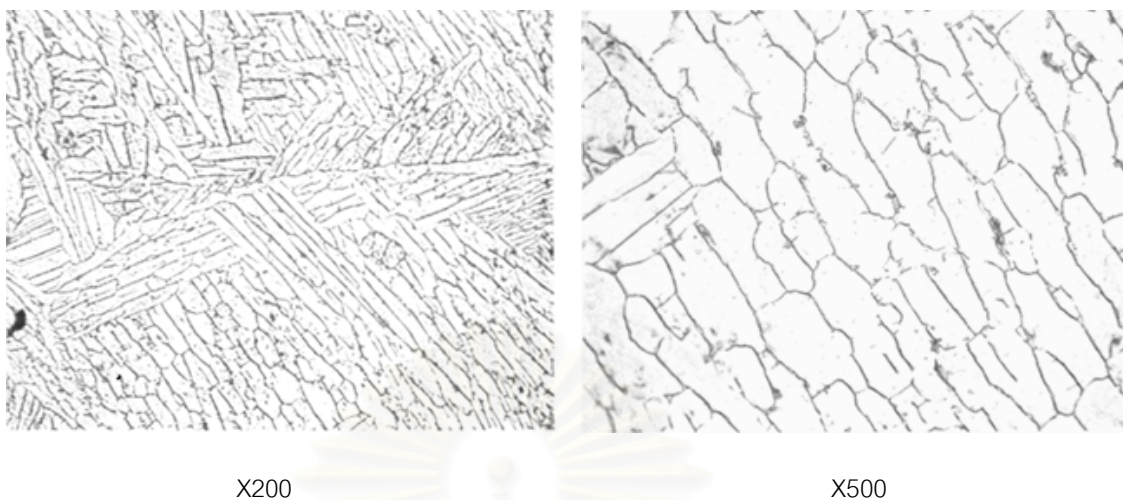


X200



X500

รูปที่ 4.7 โครงสร้างลามัลลาของชิ้นงานซึ่งผ่านกรรมวิธีทางความร้อน เพื่อทำให้เป็นเนื้อเดียวกันที่ 955 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงเย็นตัวด้วยอัตราเร็วประมาณ 4 ถึง 5 องศาเซลเซียสต่อวินาที ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง



รูปที่ 4.8 โครงสร้างลามัลลาที่มีขนาดใหญ่ของชิ้นงานซึ่งผ่านกรรมวิธีทางความร้อน เพื่อทำให้เป็นเนื้อเดียวกันที่ 955 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เย็นตัวด้วยอัตราเร็วประมาณ 4 ถึง 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง

ซึ่งการที่ขนาดของเกรนมีลักษณะและขนาดที่แตกต่างกันบ้างในแต่ละชิ้นงาน อาจเนื่องมาจาก

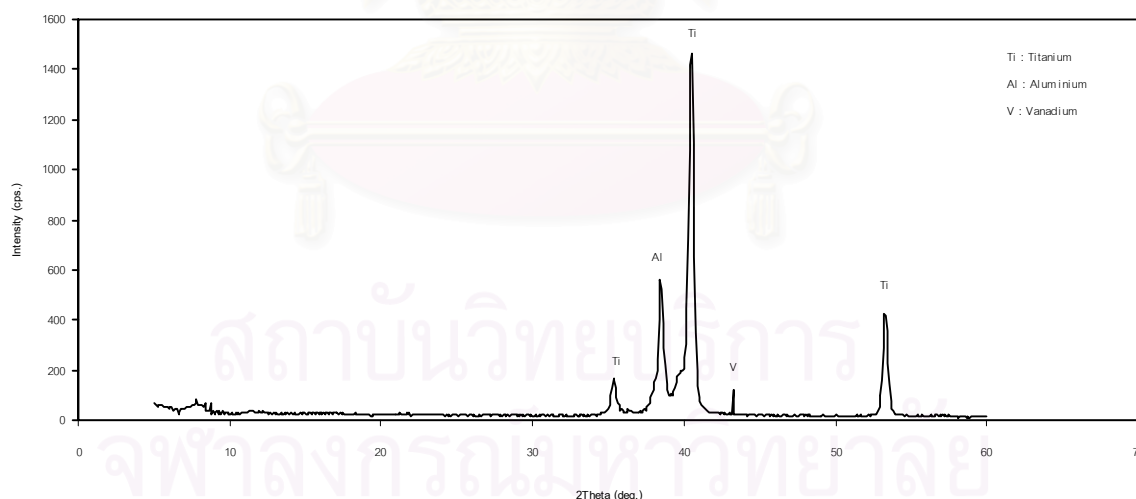
- อัตราการเย็นตัวและอุณหภูมิในเตาอบมีความแตกต่างของอุณหภูมิในแต่ละจุด (temperature gradient) ทั้งจากตัวเตาเองและจากการไล่อากาศด้วยก๊าซอาร์กอนซึ่งในการทดลองนี้ใช้อัตราการปล่อยก๊าซ 4 ลิตรต่อนาที
- แต่ละชิ้นงานมีส่วนผสมทางเคมีที่แตกต่างกัน มีผลให้ค่าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงแตกต่างกัน
- อาจมีการแพร่ของสารเจือปนเข้าไปในชิ้นงาน เนื่องจากเตาที่ใช้ไม่ได้เป็นสุญญากาศ จึงมีโอกาสที่ชิ้นงานจะมีปริมาณออกซิเจน ไนโตรเจน คาร์บอน หรือไฮโดรเจนสูง ซึ่งธาตุเหล่านี้มีผลต่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง

4.2.3 ผลการตรวจสอบสัดส่วนเฟสอัลฟาต่อเฟสเบต้าที่เกิดขึ้นงาน

จากการอบชิ้นงานที่อุณหภูมิในช่วงใกล้เคียงกับอุณหภูมิเปลี่ยนเฟส คือ 955 องศาเซลเซียส แล้วให้เย็นตัวอย่างช้าๆ ในเตาด้วยอัตราการเย็นตัวประมาณ 4 ถึง 5 องศาเซลเซียสต่อนาที แล้วตรวจสอบด้วย Image Analyzer ค่าเฉลี่ยของสัดส่วนเฟสอัลฟาต่อเฟสเบต้า (α - β ratio) ในการวิจัยนี้มีค่า 88.15 : 11.85 โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.9832 พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับค่าปริมาณอัลฟาต่อเฟสเบต้าในเชิงพาณิชย์ซึ่งมีค่า α : β ประมาณ 90 : 10

4.3 ผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี

4.3.1 ผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีเชิงคุณภาพ (Quantitative Analysis) ด้วย X-ray diffractometer



รูปที่ 4.9 โครงสร้างทางเคมีของชิ้นงานหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน ที่ 955 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วย XRD

การตรวจสอบโครงสร้างเคมีด้วยเครื่อง XRD ของชิ้นงานทั้ง 11 ชิ้นงานจากการสุ่มเลือก ซึ่งผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน พบว่าประกอบด้วย ไทเทเนียม อะลูมิเนียม และวานาเดียม ดังแสดงในรูปที่ 4.9

4.3.2 ผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีเชิงปริมาณด้วย Energy Dispersive Spectroscopy

จากการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของชิ้นงานทั้งหมดด้วยเครื่อง EDS และนำค่าที่ได้มา วิเคราะห์โดยใช้ตัวแปรหลักคือ ร้อยละโดยน้ำหนักของอะลูมิเนียมและวานาเดียมในชิ้นงาน สามารถแบ่งชิ้นงานทั้งหมดออกเป็น 6 กลุ่ม ตามปริมาณส่วนผสมทางเคมีที่วัดได้ ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 การแบ่งกลุ่มชิ้นงานตามร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุผสมในชิ้นงาน

กลุ่มที่	ร้อยละธาตุผสมโดยน้ำหนัก		จำนวนชิ้น	คิดเป็นร้อยละ
A	วานาเดียม 3.5 ถึง 4.5	อะลูมิเนียม 5.5 ถึง 6.5	24	60
B	วานาเดียม 3.5 ถึง 4.5	อะลูมิเนียม มากกว่า 6.5	1	2.5
C	วานาเดียม 3.5 ถึง 4.5	อะลูมิเนียม น้อยกว่า 5.5	4	10
D	วานาเดียม มากกว่า 4.5	อะลูมิเนียม 5.5 ถึง 6.5	8	20
E	วานาเดียม มากกว่า 4.5	อะลูมิเนียม น้อยกว่า 5.5	2	5
F	วานาเดียม น้อยกว่า 3.5	อะลูมิเนียม น้อยกว่า 5.5	1	2.5
รวม			40	100

จากการจัดกลุ่มชิ้นงานตามปริมาณส่วนผสมในชิ้นงาน พบว่ากลุ่ม A ซึ่งมีปริมาณ วานาเดียมและอะลูมิเนียมอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ตามส่วนผสมของโลหะผสม Ti-6Al-4V เชิง พาณิชย (วานาเดียมร้อยละ 3.5 ถึง 4.5 อะลูมิเนียมร้อยละ 5.5 ถึง 6.5 โดยน้ำหนัก) มีจำนวนคิด เป็นร้อยละ 60 ของชิ้นงานทั้งหมด

4.3.3 ผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วย Atomic Absorption

แต่อย่างไรก็ตามเพื่อเป็นการยืนยันส่วนผสมทางเคมีโดยละเอียดอีกครั้ง จึงได้นำตัวอย่างของชิ้นงานแต่ละกลุ่มจากตารางที่ 4.2 ไปตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยเครื่อง Atomic Absorption (AA) พบว่าส่วนผสมของชิ้นงานมีค่าใกล้เคียงกับการวัดส่วนผสมทางเคมีโดยเครื่อง EDS เพียงแต่ส่วนผสมที่ได้จากการวิเคราะห์โดยเครื่อง EDS จะมีปริมาณร้อยละของวาเนเดียมมากกว่าการวิเคราะห์โดยเครื่อง AA อยู่เล็กน้อย (ภาคผนวก ข) โดยผลส่วนผสมทางเคมีที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย EDS และวิธี AA เปรียบเทียบได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ตัวอย่างผลเปรียบเทียบส่วนผสมทางเคมี
ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย EDS และวิธี AA

ร้อยละของส่วนผสมทางเคมีโดยน้ำหนักของชิ้นงาน No.8	
วิธี EDS	วิธี AA
Ti = 90.89 ± 0.91	Ti = 91.28
Al = 3.57 ± 0.21	Al = 4.37
V = 5.39 ± 0.37	V = 4.35
Other - none	Fe = 0.0468

ดังนั้นจึงอาจจัดชิ้นงานจากกลุ่ม C ซึ่งมีวาเนเดียมสูงกว่าร้อยละ 4.5 โดยน้ำหนัก และชิ้นงานจากกลุ่ม D ซึ่งมีอะลูมิเนียมน้อยกว่าร้อยละ 5.5 โดยน้ำหนัก บางชิ้นงานรวมเข้ากับกลุ่ม A ได้ ทำให้จำนวนชิ้นงานที่มีปริมาณร้อยละของวาเนเดียมและอะลูมิเนียมอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ทางเชิงพาณิชย์มีปริมาณเพิ่มขึ้นเป็น 34 ชิ้น คิดเป็นร้อยละ 85 ของชิ้นงานทั้งหมดผลของการจัดกลุ่มชิ้นงานใหม่แสดงได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 การแบ่งกลุ่มชิ้นงานใหม่ตามร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุผสมในชิ้นงาน

กลุ่มที่	ร้อยละของธาตุผสมโดยน้ำหนัก	จำนวนชิ้น (เดิม)	จำนวนชิ้น (ใหม่)
A	วาเนเดียม 3.5 ถึง 4.5 อะลูมิเนียม 5.5 ถึง 6.5	24	34
B	วาเนเดียม 3.5 ถึง 4.5 อะลูมิเนียม มากกว่า 6.5	1	1
C	วาเนเดียม 3.5 ถึง 4.5 อะลูมิเนียม น้อยกว่า 5.5	4	-
D	วาเนเดียม มากกว่า 4.5 อะลูมิเนียม 5.5 ถึง 6.5	8	2
E	วาเนเดียม มากกว่า 4.5 อะลูมิเนียม น้อยกว่า 5.5	2	2
F	วาเนเดียม น้อยกว่า 3.5 อะลูมิเนียม น้อยกว่า 5.5	1	1
รวม		40	40

4.4 ผลการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของชิ้นงาน

ผลการตรวจสอบความหนาแน่นของชิ้นงานหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนด้วยวิธีแทนที่น้ำ ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของชิ้นงานหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนของทั้ง 40 ชิ้นงาน และค่าความหนาแน่นเมื่อเทียบกับค่าความหนาแน่นทางทฤษฎีแสดงได้ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของชิ้นงานหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนของทั้ง 40 ชิ้นงาน และค่าความหนาแน่นเมื่อเทียบกับค่าความหนาแน่นทางทฤษฎี

	ค่าความหนาแน่น(กรัม/ลบ.ซม.)	ร้อยละเทียบกับค่าทางทฤษฎี
ค่าเฉลี่ย	4.425	99.11
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.0387	0.8660

ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยที่วัดได้ด้วยวิธีแทนที่น้ำจากงานวิจัยนี้มีค่า 4.425 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เมื่อเทียบกับค่าความหนาแน่นทางทฤษฎีของโลหะผสม Ti-6Al-4V ซึ่งมีค่า 4.465 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร. ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยจากงานวิจัยนี้มีคิดเป็นร้อยละ 99.11 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเพียง 0.8860 ซึ่งนับว่าใกล้เคียงกับค่าความหนาแน่นทางทฤษฎีมาก

4.5 ผลการตรวจสอบสมบัติทางกลของชิ้นงาน

ค่าความแข็งแรงแบบรีดเคิลสเกลล์ของชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเพื่อทำให้เป็นเนื้อเดียวกันในงานวิจัยนี้มีค่าเฉลี่ย 35.21 HRC โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 1.6976 ซึ่งเมื่อเทียบกับความแข็งแรงของชิ้นงานเชิงพาณิชย์เกรดคอมเมอร์เชียล (Commercial grade) ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนแบบเดียวกันซึ่งมีค่า 36 HRC ถือว่ามีค่าใกล้เคียงกันมาก

โดยความแข็งแรงของชิ้นงาน No.14 มีค่าเพียง 28.90 HRC (ดูภาคผนวก จ) อาจมีผลเนื่องจากชิ้นงานมีปริมาณอะลูมิเนียมมากทำให้สัดส่วนของวาเนเดียมในชิ้นงานมีค่าน้อย ซึ่งวาเนเดียมเป็นสารเติมที่ช่วยให้เฟสเบต้าเสถียร และเป็นตัวกลไกที่เพิ่มความแข็งแรงให้กับชิ้นงาน⁽⁹⁾ นอกจากนี้หากชิ้นงานมีปริมาณอะลูมิเนียมสูง (มากกว่าร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก) จะส่งผลให้ชิ้นงานเปราะเนื่องจากเกิด Hydrogen-embrittlement ได้ง่ายที่อุณหภูมิห้อง

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเตรียมโลหะผสม Ti-Al-V จากเศษโลหะไทเทเนียมที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตตัวเรือนนาฬิกา ผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

1. การเตรียมโลหะผสม Ti-6Al-4V ควรใช้วิธีหลอมไทเทเนียมและวาเนเดียมรวมกันก่อน จากนั้นจึงนำมาหลอมรวมกับอะลูมิเนียมอีกครั้งหนึ่ง โดยนำขึ้นอะลูมิเนียมไว้ข้างใต้ เพื่อป้องกันการสูญเสียเนื้ออะลูมิเนียมระหว่างการหลอม
2. การอบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 955 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงในบรรยากาศอาร์กอน แล้วปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวอย่างช้าๆ ด้วยอัตราประมาณ 4 ถึง 5 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นกรรมวิธีทางความร้อนทำให้เป็นเนื้อเดียวกันที่เหมาะสมกับชิ้นงาน Ti-6Al-4V ที่มีขนาด 3x3x1.5 เซนติเมตร
3. โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ได้จากการหลอมด้วยเตาอาร์คไฟฟ้าบรรยากาศอาร์กอน มีลักษณะเป็นโครงสร้างลามัลลาที่ละเอียดทั่วทั้งชิ้นงาน และกรรมวิธีทางความร้อนให้เป็นเนื้อเดียวกันส่งผลทำให้โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อนมีลักษณะเป็นโครงสร้างลามัลลาที่มีขนาดใหญ่ มีพื้นเกรนเป็นเฟสอัลฟาและมีเฟสเบต้าที่บริเวณขอบเกรน โดยสัดส่วนเฟสอัลฟาต่อเฟสเบต้ามีค่า 88.15 ต่อ 11.85
4. โลหะผสม Ti-6Al-4V จากงานวิจัยนี้มีความหนาแน่นเฉลี่ย 4.425 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมีความแข็งแบบร็อคเวลสเกลซี 35.21 HRC
5. จากผลการทดลอง พบว่า มีความเป็นไปได้ที่จะเตรียมชิ้นงานโลหะผสม Ti-6Al-4V จากเศษโลหะไทเทเนียมที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตตัวเรือนนาฬิกา ภายในห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เต้าที่ใช้อบชิ้นงานควรจะมีการดูดอากาศภายในออกก่อนอย่างน้อยครึ่งชั่วโมง แล้วจึงค่อยใส่อากาศด้วยก๊าซอาร์กอน เพราะจะช่วยให้ผิวชิ้นงานที่ได้สะอาดขึ้นและมีฟิล์มออกไซด์ที่ผิวน้อยลง
2. เนื่องจากแบบที่ใช้มีรูปร่างชิ้นงานที่จำกัด หากสามารถเปลี่ยนรูปแบบของเบ้าหลอมได้ จะสามารถนำชิ้นงานไปตรวจสอบสมบัติทางกลอื่นๆได้มากกว่านี้ อาทิ ความแข็งแรงการกระแทก ความเหนียวด้านทานการแตกหัก
3. ชิ้นงานที่ได้ควรนำไปตรวจสอบปริมาณ คาร์บอน ออกซิเจน ไนโตรเจน และไฮโดรเจน ในชิ้นงาน เพราะธาตุเหล่านี้จะมีผลกับการนำไปใช้งาน
4. ควรมีการนำชิ้นงานที่เตรียมได้ไปวัดคุณสมบัติการเปลี่ยนเฟส เพื่อเป็นการตรวจสอบผลของส่วนผสมทางเคมีที่มีผลต่อคุณสมบัติการเปลี่ยนเฟส นอกจากนี้ยังเป็นประโยชน์ในแง่การนำไปใช้งานด้วย หากต้องการนำโลหะผสม Ti-6Al-4V ไปใช้ที่อุณหภูมิสูง

รายการอ้างอิง

1. Lederich Richard J and Sadtry Shankar M . Transient titanium alloys . US PATENT 4,415,375 .
2. Paton Neil E and Hall James A . Titanium base alloy superplastic forming . US PATENT 4,299,626 .
3. William W. Love and Lahabra Heights . Method of forming low cost Ti-6Al-4V Ballistic alloy . US PATENT 5,332,545 .
4. William W. Love . Improved low cost Ti-6Al-4V Ballistic alloy . US PATENT 2,276,633 .
5. K.Sato,T.nishimura and Y.Kimura . The temperature and the grains of Ti-6Al-4V alloy on the uniaxial and biaxial deformations for superplaticity . Materials Science Forum Vol.170-172 (1994) : p.207-212 .
6. Hench , L.L. Bioceramics : From concept to clinic . J.Amer.Cer.Soc. 74(3) (1991) : 1487-1510 .
7. Dr. Alan J Jones . Titanium From Mining to Biomaterials The Wollongong Symposium (9-10July 1991) . NSW . (1991).
8. The Biomaterials Science Unit The University of Sydney . Proceeding of The Third International Symposium on Titanium in Dentistry (Aug 29-31 1995). AUS . (1995).
9. Matthew J. Donachie . Titanium A Technical Guide . ASM . USA (1988) .
10. R.A.Wood and R.J.Favor . Titanium-Alloy Handbook , Air Force Materials Laboratory . Ohio USA (December1972) : p.1-4:72 to1-4:72-29 .
11. Roger Gillbert and Richard Shannon . Heat Treating of Titanium and Titanium Alloys . ASM 3rd edition Vol.4 (Heat treatment) . USA (1995) : p.913-923 .
12. Jeramy R. Newman , Danial Eylon and John K. Thone . Titanium and Titanium Alloys . ASM 3rd edition Vol.15 (Casting) . USA (1996) : p.824-834 .
13. Rodney Boyer , Gerhard Welsh and E.W.Colling . Material Properties Handbook : Titanium alloys . ASM international . USA (1994).

14. Hasan Yildiz , Sung-Kyu ha and Fu-Kuo Chang . Composite hip prothesis desingn.I. Analysis . J. of Biomedical Mat. Research Vol.39 No.1 (Janurary) (1998) : p.92-108 .
15. Cogollos and Bernado . Straight non- hardened stem for total hip protheses . EP PATENT 0655229A1 .
16. W.O. Soboyejo , C.Mercer , S.Allameh , B.nemetski , N.macantonio and John L.Ricci . Multi-Scale Microstructural Characterization of Micro-Textured Ti-6Al-4V Surfaces . Key Engineering Materials Vol.198-199 (2001) : p.203-230.
17. D.C.Mears . Materials and Orthopedic Surgery . William&Wilkins . (1997) .
18. H.J.Agins , N.W.Alcock and M.Bansal . Metallic wear in failed Titanium-alloy hip replacement . J. Bone Joint Surg. Vol.70A (1987) : p.347-356 .
19. J.Black . Biological performance of material : In fundamental of Biocompatibility . Newyork . marcel Dekker . (1981) .
20. Galahte , J.O. . Current concepts review : Causes of fracture of the femoral component in total hip replacement . J. Bone Joint Surg. Vol.62A (1980) : p.670-673 .
21. Pibul Ittravirong . Fundamental Basis of Biomedical Materials . (1994) : p.1-20,97-107 .
22. Wu , Jiann-Kuo and Wu , Tair-I . Surface hardening of Ti-6Al-4V by electrolytic hydrogenation . US PATENT 5,178,694 .
23. Sakuyama Hideo . Heat treatment for Ti-6Al-4V alloy material . JP PATENT 63,219,558 .
24. ชาญวิทย์ เพ็ชรเม็ดีใหญ่ และชาติรี พงษ์จารุวัฒน์. Preparation and Thermal Treatment of Ti-6Al-4V from Titanium Scrap.ปริญญาานิพนธ์ สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (2543).



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

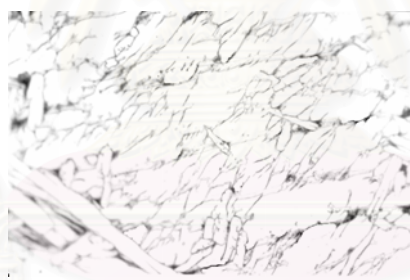
ข้อมูลจากการทดลองแสดงผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีทั้งเชิงปริมาณและคุณภาพ
โครงสร้างจุลภาค ความหนาแน่น และความแข็ง

ชิ้นงาน No.1

	ร้อยละของธาตุผสมโดยน้ำหนัก		
	Ti	Al	V
ก่อนหลอม	89.43	6.59	3.98
หลังหลอมและ homoginize	89.18 ± 1.02	6.09 ± 0.29	4.73 ± 0.64

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน

- optical microscope (x500)



สัดส่วนเฟสอัลฟา : เฟสเบต้า = 89.09 : 10.91

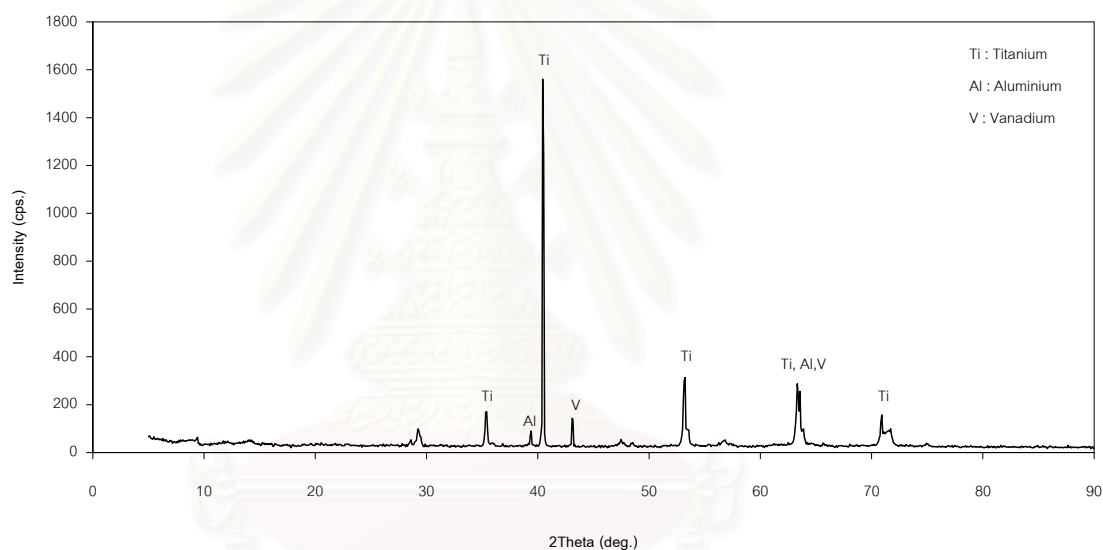
ความหนาแน่น = 4.468 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

ความแข็ง = 36.84 HRC

ชิ้นงาน No.2

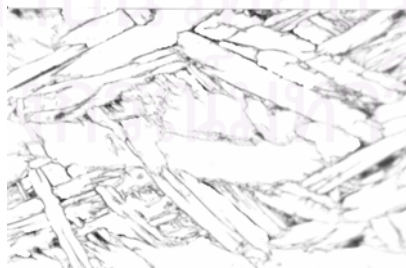
	ร้อยละของธาตุผสมโดยน้ำหนัก			
	Ti	Al	V	Other
ก่อนหลอม	89.97	6.03	4.00	-
หลังหลอมและ homogenize	88.80 ± 0.72	6.12 ± 0.20	4.66 ± 0.44	$Fe 0.42 \pm 0.19$

โครงสร้างทางเคมีของชิ้นงาน



โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน

- optical microscope (x500)



สัดส่วนเฟสอัลฟา : เฟสเบต้า = 88.54 : 11.46

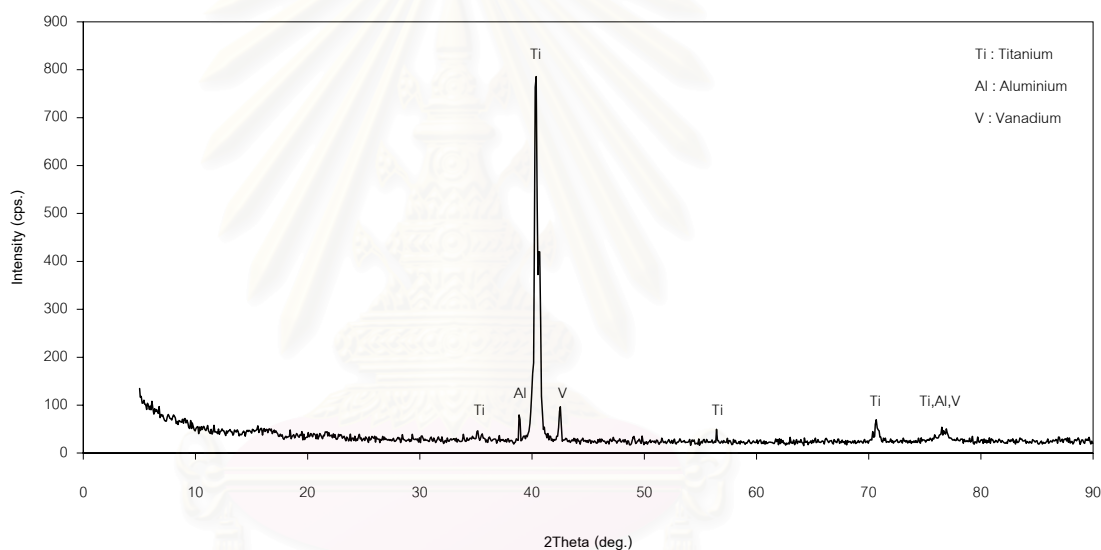
ความหนาแน่น = 4.443 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

ความแข็ง = 36.44 HRC

ชิ้นงาน No.3

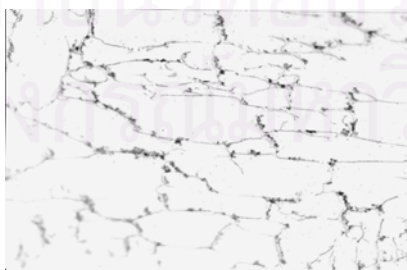
	ร้อยละของธาตุผสมโดยน้ำหนัก		
	Ti	Al	V
ก่อนหลอม	89.94	6.06	4.00
หลังหลอมและ homogenize	88.99 ± 0.70	6.28 ± 0.19	4.74 ± 0.42

โครงสร้างทางเคมีของชิ้นงาน



โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน

- optical microscope (x500)



สัดส่วนเฟสอัลฟา : เฟสเบต้า = 89.97 : 10.03

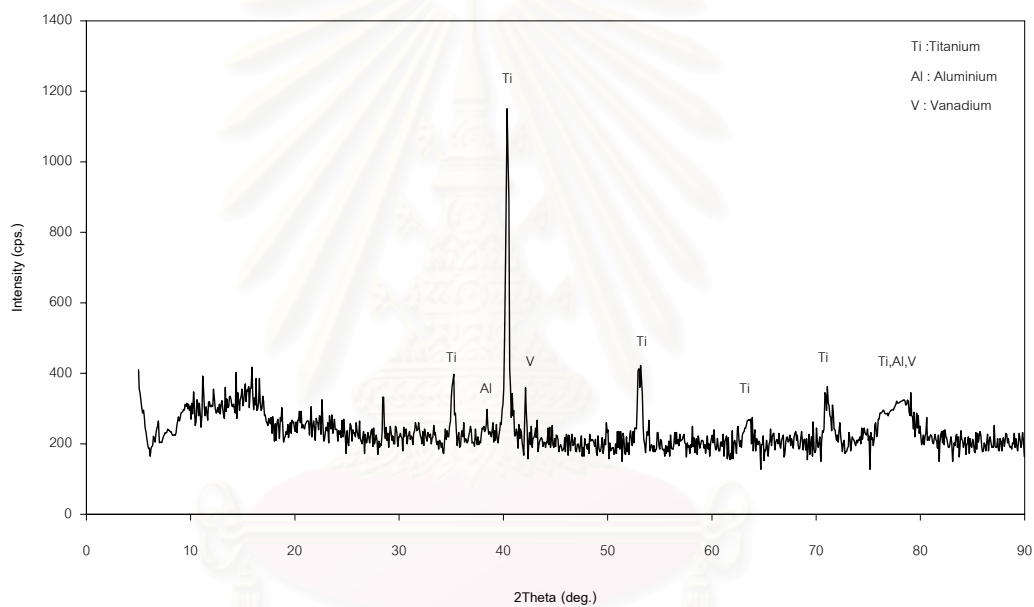
ความหนาแน่น = 4.445 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

ความแข็ง = 34.80 HRC

ชิ้นงาน No.4

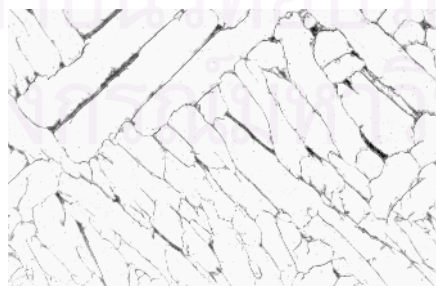
	ร้อยละของธาตุผสมโดยน้ำหนัก		
	Ti	Al	V
ก่อนหลอม	90.00	6.00	4.00
หลังหลอมและ homoginize	89.76 ± 0.70	6.00 ± 0.19	4.24 ± 0.42

โครงสร้างทางเคมีของชิ้นงาน



โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน

- optical microscope (x500)



สัดส่วนเฟสอัลฟา : เฟสเบต้า = 90.22 : 9.78

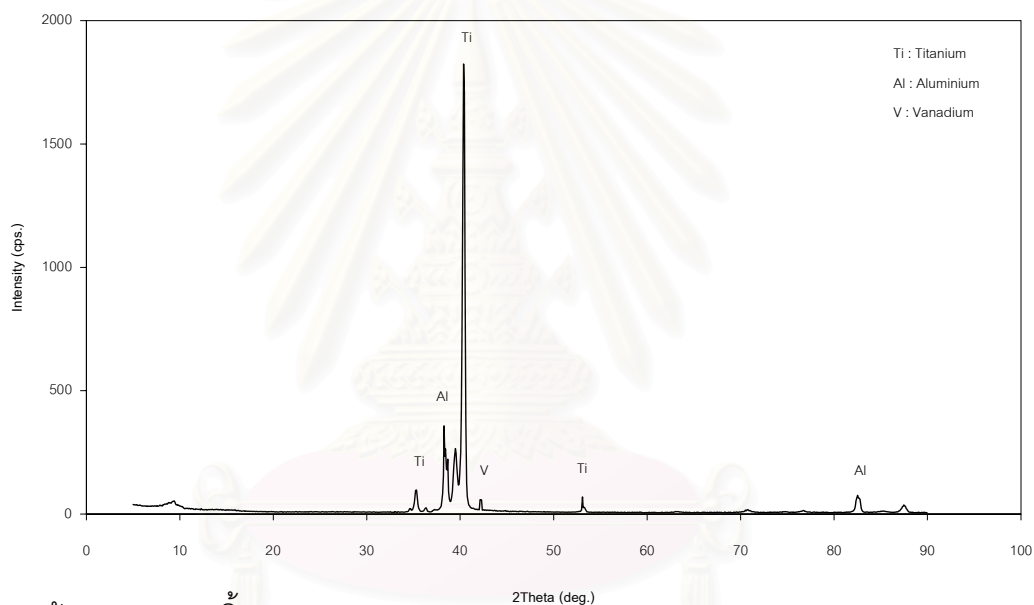
ความหนาแน่น = 4.421 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

ความแข็ง = 35.06 HRC

ชิ้นงาน No.5

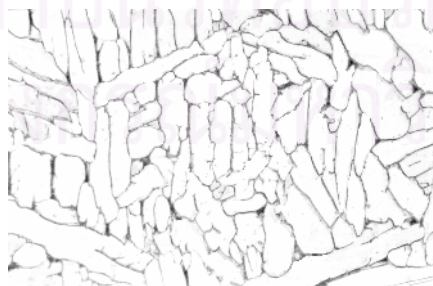
	ร้อยละของธาตุผสมโดยน้ำหนัก		
	Ti	Al	V
ก่อนหลอม	90.00	6.00	4.00
หลังหลอมและ homogenize	89.97 ± 0.70	5.71 ± 0.19	4.32 ± 0.42

โครงสร้างทางเคมีของชิ้นงาน



โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน

- optical microscope (x500)



สัดส่วนเฟสอัลฟา : เฟสเบต้า = 88.98 : 11.02

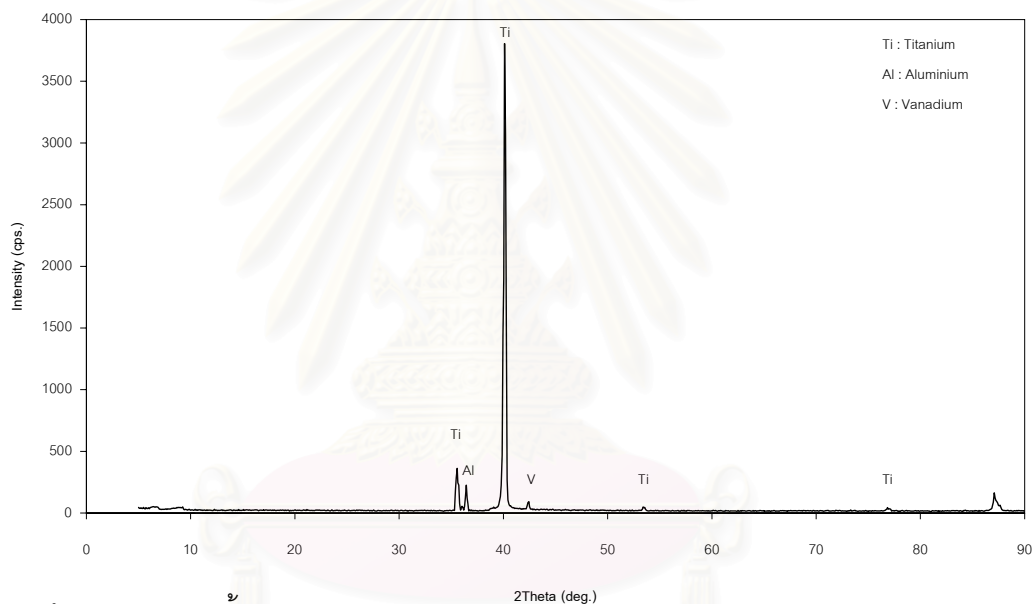
ความหนาแน่น = 4.423 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

ความแข็ง = 35.84 HRC

ชิ้นงาน No.6

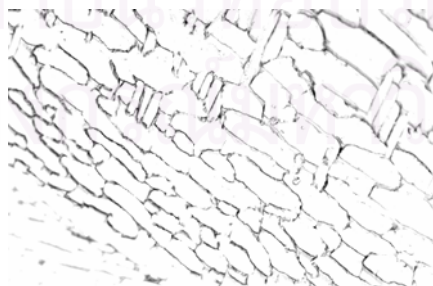
	ร้อยละของธาตุผสมโดยน้ำหนัก		
	Ti	Al	V
ก่อนหลอม	90.00	6.00	4.00
หลังหลอมและ homogenize	89.70 ± 0.73	5.37 ± 0.18	4.92 ± 0.44

โครงสร้างทางเคมีของชิ้นงาน



โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน

- optical microscope (x500)



สัดส่วนเฟสอัลฟา : เฟสเบต้า = 85.04 : 14.96

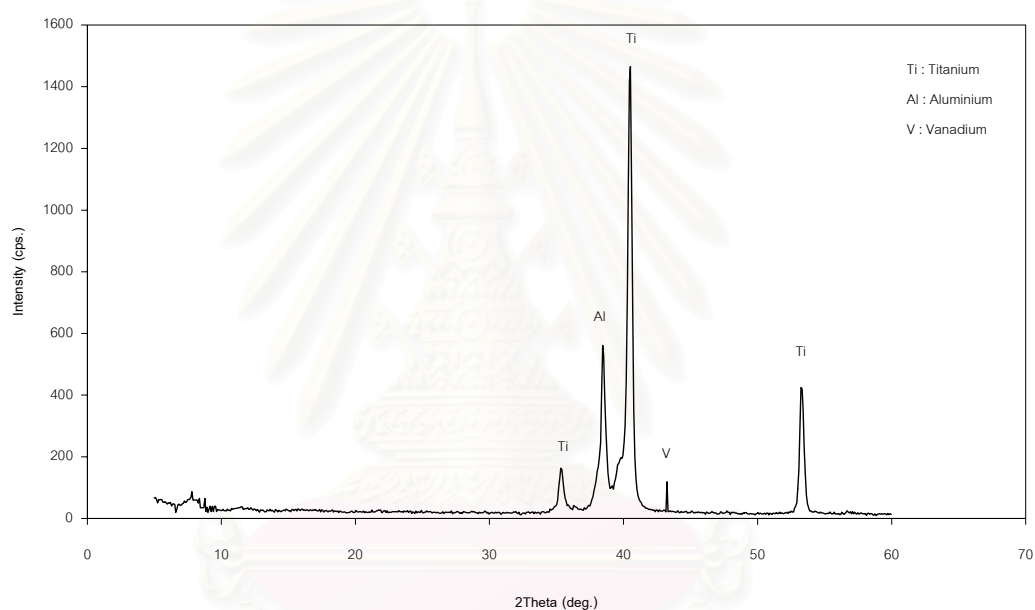
ความหนาแน่น = 4.323 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

ความแข็ง = 39.24 HRC

ชิ้นงาน No.7

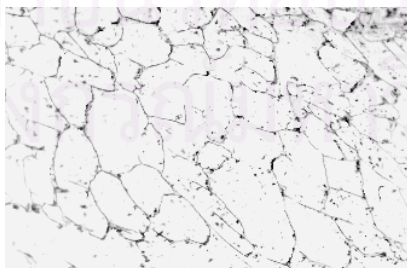
	ร้อยละของธาตุผสมโดยน้ำหนัก			
	Ti	Al	V	Other
ก่อนหลอม	89.97	6.03	4.00	-
หลังหลอมและ homoginize	89.79 ± 0.77	6.21 ± 0.22	3.77 ± 0.46	$Fe 0.23 \pm 0.21$

โครงสร้างทางเคมีของชิ้นงาน



โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน

- optical microscope (x500)



สัดส่วนเฟสอัลฟา : เฟสเบต้า = 90.28 : 9.72

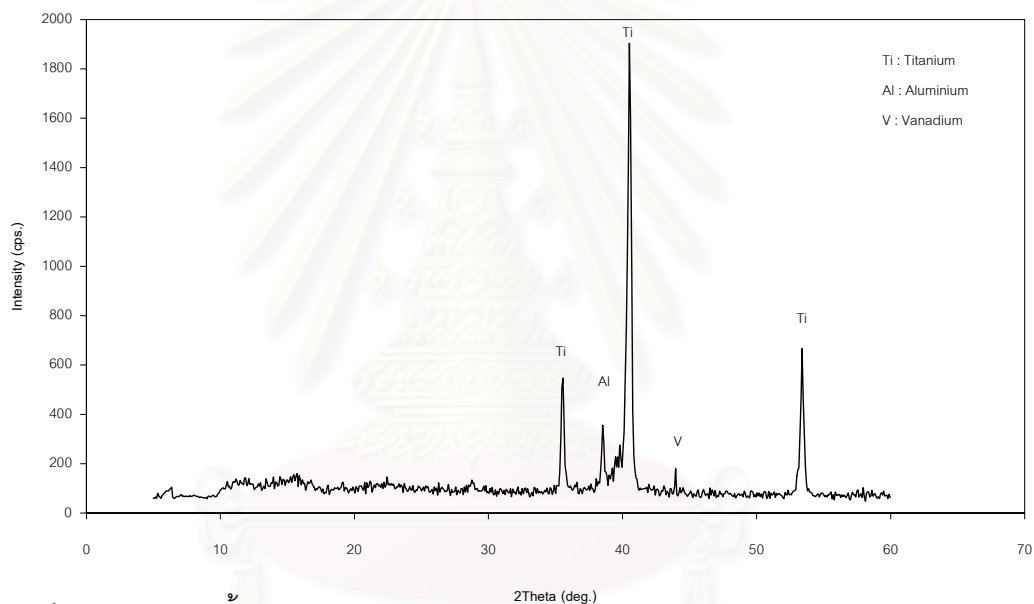
ความหนาแน่น = 4.386 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

ความแข็ง = 34.98 HRC

ชิ้นงาน No.8

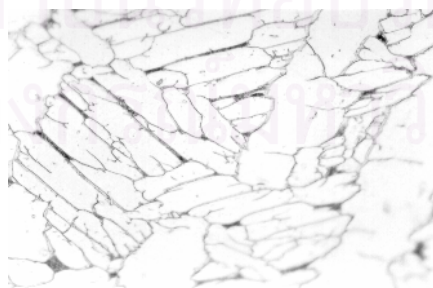
	ร้อยละของธาตุผสมโดยน้ำหนัก			
	Ti	Al	V	Other
ก่อนหลอม	89.97	6.03	4.00	-
หลังหลอมและ homoginize	90.89 ± 0.91	3.57 ± 0.21	5.39 ± 0.37	$Fe 0.14 \pm 0.25$

โครงสร้างทางเคมีของชิ้นงาน



โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน

- optical microscope (x500)



สัดส่วนเฟสอัลฟา : เฟสเบต้า = 89.90 : 10.10

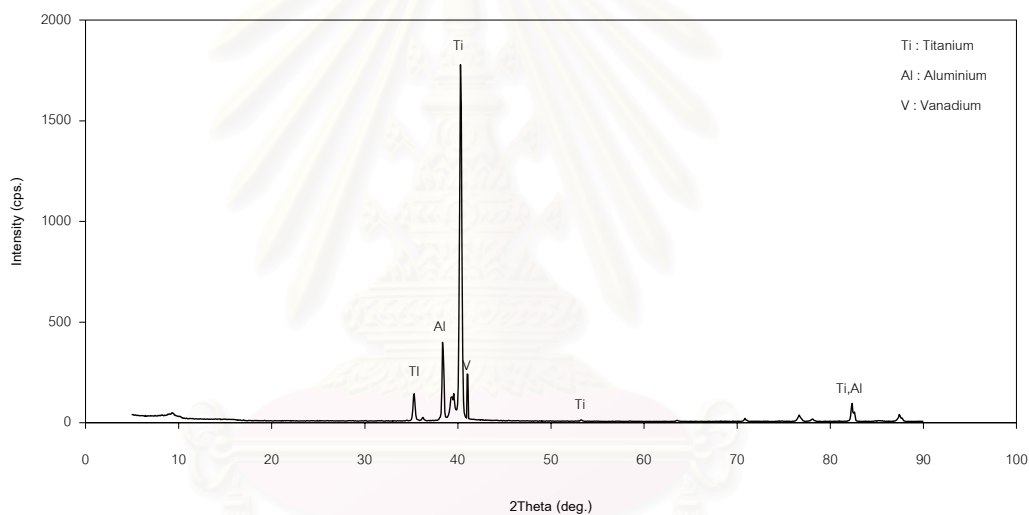
ความหนาแน่น = 4.386 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

ความแข็ง = 34.50 HRC

ชิ้นงาน No.9

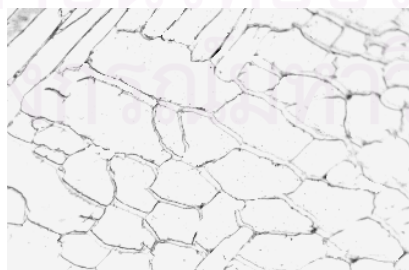
	ร้อยละของธาตุผสมโดยน้ำหนัก		
	Ti	Al	V
ก่อนหลอม	90.00	6.00	4.00
หลังหลอมและ homoginize	90.39 ± 0.74	5.51 ± 0.20	4.10 ± 0.45

โครงสร้างทางเคมีของชิ้นงาน



โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน

- optical microscope (x500)



สัดส่วนเฟสอัลฟา : เฟสเบต้า = 89.88 : 10.12

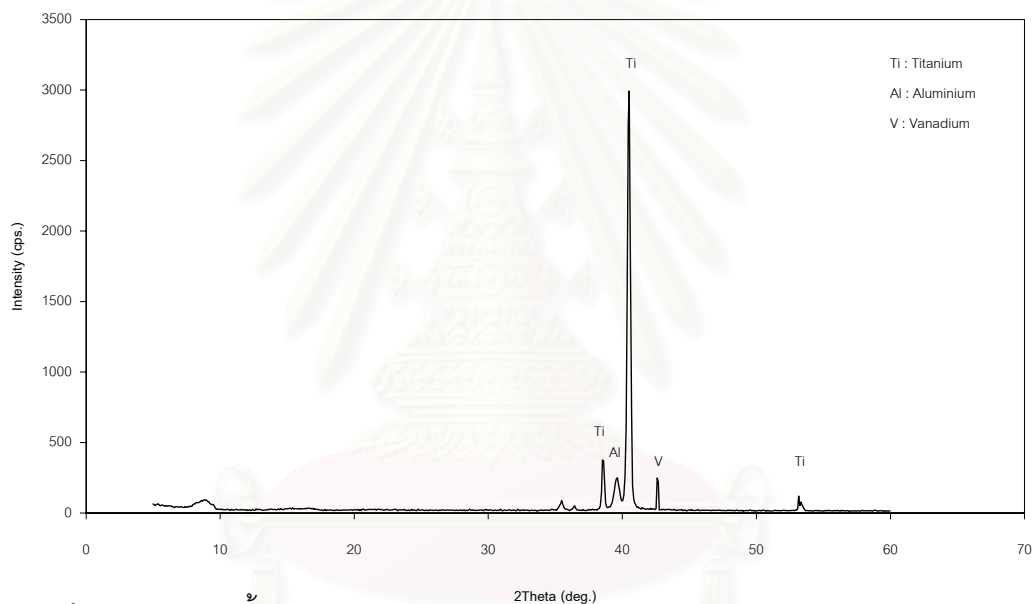
ความหนาแน่น = 4.442 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

ความแข็ง = 34.42 HRC

ชิ้นงาน No.10

	ร้อยละของธาตุผสมโดยน้ำหนัก			
	Ti	Al	V	Other
ก่อนหลอม	89.97	6.03	4.00	-
หลังหลอมและ homogenize	89.78 ± 0.73	5.55 ± 0.22	4.57 ± 0.28	$Fe 0.10 \pm 0.19$

โครงสร้างทางเคมีของชิ้นงาน



โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน

- optical microscope (x500)



สัดส่วนเฟสอัลฟา : เฟสเบต้า = 89.94 : 10.06

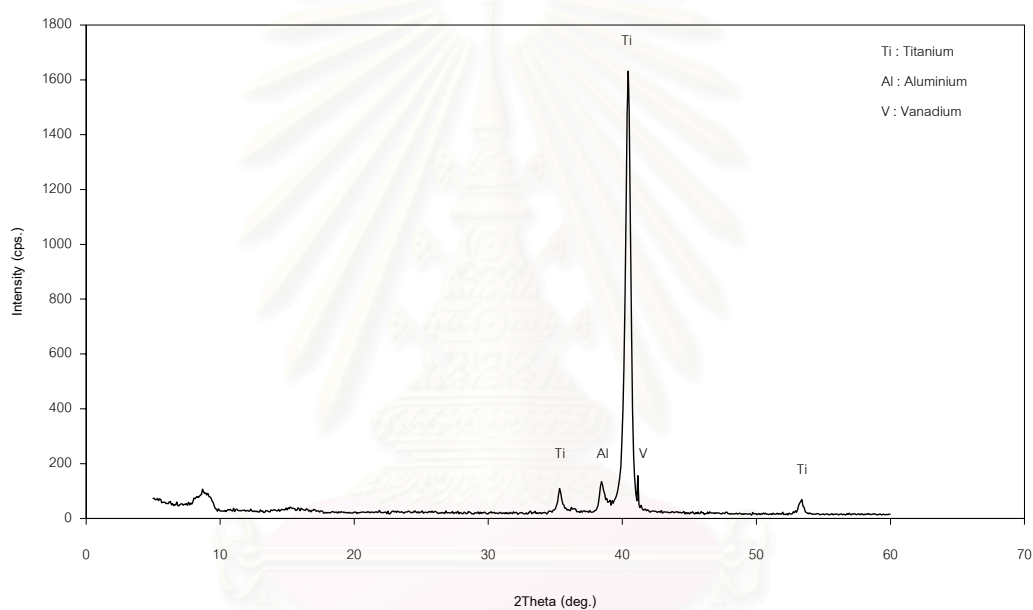
ความหนาแน่น = 4.448 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

ความแข็ง = 36.88 HRC

ชิ้นงาน No.11

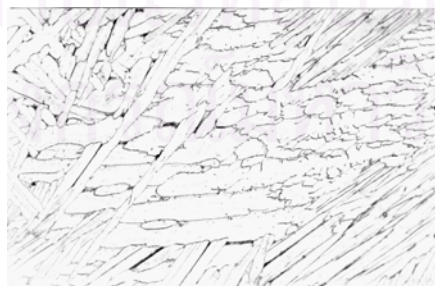
	ร้อยละของธาตุผสมโดยน้ำหนัก		
	Ti	Al	V
ก่อนหลอม	89.97	6.03	4.00
หลังหลอมและ homoginize	90.36 ± 0.71	5.61 ± 0.19	4.03 ± 0.27

โครงสร้างทางเคมีของชิ้นงาน



โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน

- optical microscope (x500)



สัดส่วนเฟสอัลฟา : เฟสเบต้า = 89.96 : 10.04

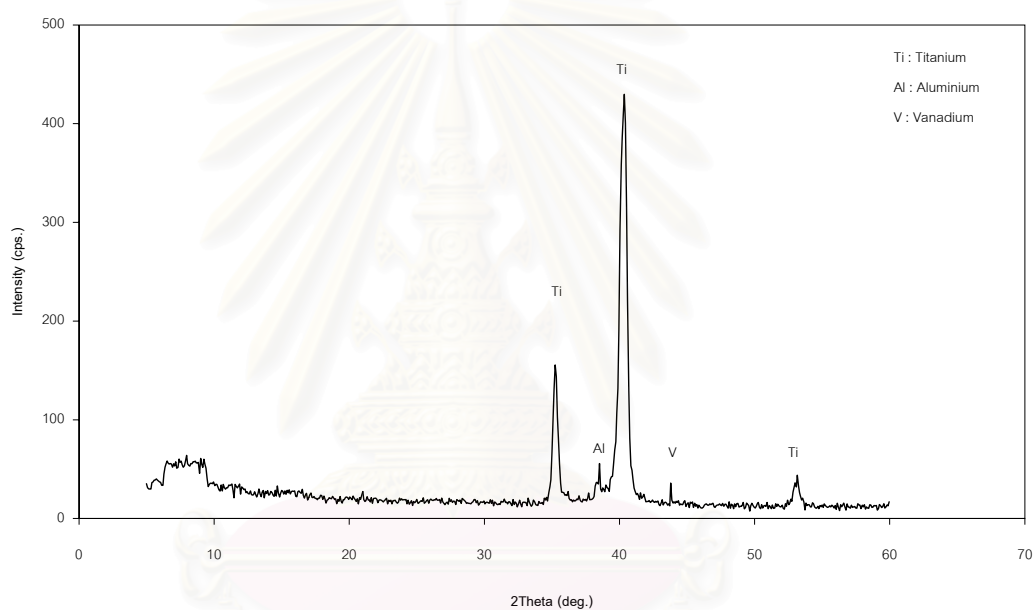
ความหนาแน่น = 4.451 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

ความแข็ง = 34.78 HRC

ชิ้นงาน No.12

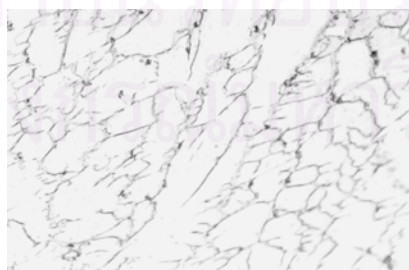
	ร้อยละของธาตุผสมโดยน้ำหนัก			
	Ti	Al	V	Other
ก่อนหลอม	89.97	6.03	4.00	-
หลังหลอมและ homoginize	89.91± 0.79	5.76 ± 0.22	4.22 ± 0.31	Fe 0.11 ± 0.21

โครงสร้างทางเคมีของชิ้นงาน



โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน

- optical microscope (x500)



สัดส่วนเฟสอัลฟา : เฟสเบต้า = 89.76 : 10.24

ความหนาแน่น = 4.458 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

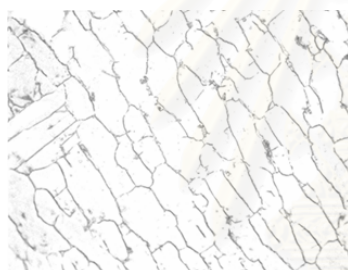
ความแข็ง = 36.40 HRC

ชิ้นงาน No.13

	ร้อยละของธาตุผสมโดยน้ำหนัก			
	Ti	Al	V	Other
ก่อนหลอม	90.00	6.00	4.00	-
หลังหลอมและ homoginize	90.37±0.72	5.94±0.28	3.31±0.38	Fe 0.39±0.27

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน

- optical microscope (x500)
- scanning electron microscope (x500)



สัดส่วนเฟสอัลฟา : เฟสเบต้า = 89.98 : 10.02

ความหนาแน่น = 4.423 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

ความแข็ง = 35.50 HRC

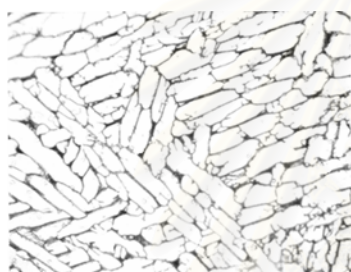
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชิ้นงาน No.14

	ร้อยละของธาตุผสมโดยน้ำหนัก			
	Ti	Al	V	Other
ก่อนหลอม	90.00	6.00	4.00	-
หลังหลอมและ homoginize	84.90±0.78	11.39±0.25	3.71±0.30	-

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน

- optical microscope (x500)



สัดส่วนเฟสอัลฟา : เฟสเบต้า = 83.14 : 16.86

ความหนาแน่น = 4.413 กรัมต่อลบ.ซม.

ความแข็ง = 28.90 HRC

ชิ้นงาน No.15

	ร้อยละของธาตุผสมโดยน้ำหนัก			
	Ti	Al	V	Other
ก่อนหลอม	89.94	6.06	4.00	-
หลังหลอมและ homoginize	89.40±1.02	6.18±0.29	3.91±0.41	Fe 0.51±0.29

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน

- optical microscope (x500)



สัดส่วนเฟสอัลฟา : เฟสเบต้า = 87.76 : 12.24

ความหนาแน่น = 4.481 กรัมต่อลบ.ซม.

ความแข็ง = 34.94 HRC

ชิ้นงาน No.16

	ร้อยละของธาตุผสมโดยน้ำหนัก			
	Ti	Al	V	Other
ก่อนหลอม	89.94	6.06	4.00	-
หลังหลอมและ homoginize	89.91 ± 0.76	5.59 ± 0.21	4.50 ± 0.46	-

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน

- optical microscope (x500)



สัดส่วนเฟสอัลฟา : เฟสเบต้า = 85.01 : 14.99

ความหนาแน่น = 4.427 กรัมต่อลบ.ซม.

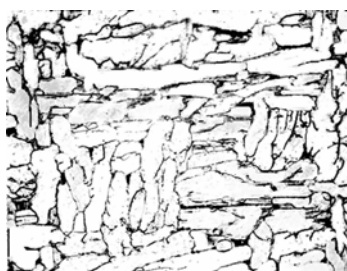
ความแข็ง = 34.42 HRC

ชิ้นงาน No.17

	ร้อยละของธาตุผสมโดยน้ำหนัก			
	Ti	Al	V	Other
ก่อนหลอม	89.97	6.03	4.00	-
หลังหลอมและ homoginize	89.29 ± 0.84	5.51 ± 0.21	4.50 ± 0.46	-

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน

- optical microscope (x500)



สัดส่วนเฟสอัลฟา : เฟสเบต้า = 84.35 : 15.65

ความหนาแน่น = 4.422 กรัมต่อลบ.ซม.

ความแข็ง = 34.42 HRC

ชิ้นงาน No.18

	ร้อยละของธาตุผสมโดยน้ำหนัก			
	Ti	Al	V	Other
ก่อนหลอม	89.97	6.03	4.00	-
หลังหลอมและ homoginize	89.35 ± 0.76	6.01 ± 0.21	4.56 ± 0.30	Fe 0.30 ± 0.07

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน

- optical microscope (x500)



สัดส่วนเฟสอัลฟา : เฟสเบต้า = 87.11 : 12.89

ความหนาแน่น = 4.431 กรัมต่อลบ.ซม.

ความแข็ง = 34.30 HRC

ชิ้นงาน No.19

	ร้อยละของธาตุผสมโดยน้ำหนัก			
	Ti	Al	V	Other
ก่อนหลอม	90.00	6.00	4.00	-
หลังหลอมและ homoginize	90.34 ± 0.96	5.82 ± 0.27	3.84 ± 0.61	-

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน

- optical microscope (x500)



สัดส่วนเฟสอัลฟา : เฟสเบต้า = 82.05 : 17.95

ความหนาแน่น = 4.442 กรัมต่อลบ.ซม.

ความแข็ง = 34.28 HRC

ชิ้นงาน No.20

	ร้อยละของธาตุผสมโดยน้ำหนัก			
	Ti	Al	V	Other
ก่อนหลอม	90.00	6.00	4.00	-
หลังหลอมและ homoginize	89.80 ± 1.01	5.69 ± 0.29	4.33 ± 0.41	Fe 0.19 ± 0.28

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน

- optical microscope (x500)



สัดส่วนเฟสอัลฟา : เฟสเบต้า = 86.22: 13.78

ความหนาแน่น = 4.429 กรัมต่อลบ.ซม.

ความแข็ง = 33.30 HRC

ชิ้นงาน No.21

	ร้อยละของธาตุผสมโดยน้ำหนัก			
	Ti	Al	V	Other
ก่อนหลอม	89.94	6.06	4.00	-
หลังหลอมและ homoginize	90.11 ± 0.93	5.20 ± 0.26	4.69 ± 0.58	-

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน

- optical microscope (x500)



สัดส่วนเฟสอัลฟา : เฟสเบต้า = 88.39 : 11.61

ความหนาแน่น = 4.421 กรัมต่อลบ.ซม.

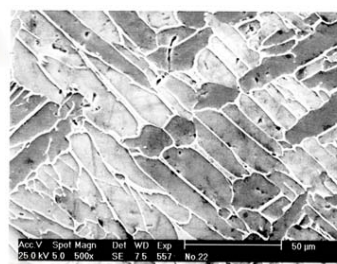
ความแข็ง = 37.36 HRC

ชิ้นงาน No.22

	ร้อยละของธาตุผสมโดยน้ำหนัก			
	Ti	Al	V	Other
ก่อนหลอม	89.97	6.03	4.00	-
หลังหลอมและ homogenize	90.47 ± 0.83	5.47 ± 0.23	4.06 ± 0.51	-

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน

- optical microscope (x500)
- scanning electron microscope (x500)



สัดส่วนเฟสอัลฟา : เฟสเบต้า = 88.20 : 11.80

ความหนาแน่น = 4.434 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

ความแข็ง = 35.22 HRC

ศูนย์วิจัยและบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชิ้นงาน No.23

	ร้อยละของธาตุผสมโดยน้ำหนัก			
	Ti	Al	V	Other
ก่อนหลอม	90.00	6.00	4.00	-
หลังหลอมและ homoginize	91.42 ± 0.92	5.26 ± 0.26	3.32 ± 0.57	-

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน

- optical microscope (x500)



สัดส่วนเฟสอัลฟา : เฟสเบต้า = 87.76 : 12.24

ความหนาแน่น = 4.440 กรัมต่อลบ.ซม.

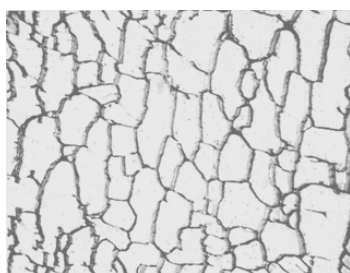
ความแข็ง = 34.88 HRC

ชิ้นงาน No.24

	ร้อยละของธาตุผสมโดยน้ำหนัก			
	Ti	Al	V	Other
ก่อนหลอม	90.00	6.00	4.00	-
หลังหลอมและ homoginize	90.62 ± 0.82	5.64 ± 0.23	3.75 ± 0.51	-

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน

- optical microscope (x500)



สัดส่วนเฟสอัลฟา : เฟสเบต้า = 87.87 : 12.13

ความหนาแน่น = 4.426 กรัมต่อลบ.ซม.

ความแข็ง = 32.54 HRC

ชิ้นงาน No.25

	ร้อยละของธาตุผสมโดยน้ำหนัก			
	Ti	Al	V	Other
ก่อนหลอม	89.97	6.03	4.00	-
หลังหลอมและ homoginize	90.36 ± 1.03	5.40 ± 0.28	4.24 ± 0.64	-

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน

- optical microscope (x500)



สัดส่วนเฟสอัลฟา : เฟสเบต้า = 88.03 : 11.97

ความหนาแน่น = 4.420 กรัมต่อลบ.ซม.

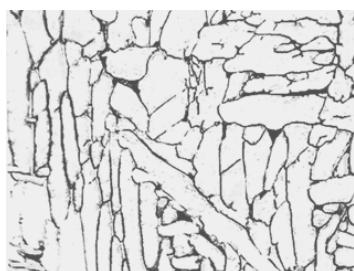
ความแข็ง = 34.10 HRC

ชิ้นงาน No.26

	ร้อยละของธาตุผสมโดยน้ำหนัก			
	Ti	Al	V	Other
ก่อนหลอม	89.97	6.03	4.00	-
หลังหลอมและ homoginize	90.81 ± 1.03	5.63 ± 0.29	3.55 ± 0.64	-

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน

- optical microscope (x500)



สัดส่วนเฟสอัลฟา : เฟสเบต้า = 87.66 : 12.34

ความหนาแน่น = 4.428 กรัมต่อลบ.ซม.

ความแข็ง = 33.76 HRC

ชิ้นงาน No.27

	ร้อยละของธาตุผสมโดยน้ำหนัก			
	Ti	Al	V	Other
ก่อนหลอม	90.00	6.00	4.00	-
หลังหลอมและ homoginize	90.64±0.81	5.66±0.22	3.70±0.50	-

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน

- optical microscope (x500)



สัดส่วนเฟสอัลฟา : เฟสเบต้า = 89.56 : 10.44

ความหนาแน่น = 4.433 กรัมต่อลบ.ซม.

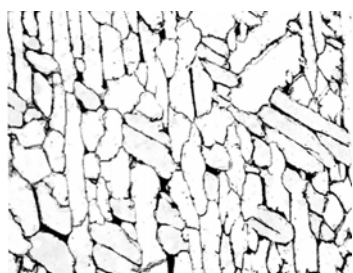
ความแข็ง = 35.28 HRC

ชิ้นงาน No.28

	ร้อยละของธาตุผสมโดยน้ำหนัก			
	Ti	Al	V	Other
ก่อนหลอม	90.00	6.00	4.00	-
หลังหลอมและ homoginize	90.08±0.98	5.55±0.27	4.26±0.60	Fe 0.11±0.28

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน

- optical microscope (x500)



สัดส่วนเฟสอัลฟา : เฟสเบต้า = 88.09 : 11.91

ความหนาแน่น = 4.244 กรัมต่อลบ.ซม.

ความแข็ง = 34.88 HRC

ชิ้นงาน No.29

	ร้อยละของธาตุผสมโดยน้ำหนัก			
	Ti	Al	V	Other
ก่อนหลอม	89.97	6.03	4.00	-
หลังหลอมและ homoginize	87.77 ± 0.83	6.32 ± 0.23	5.91 ± 0.53	-

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน

- optical microscope (x200)



ความหนาแน่น = 4.425 กรัมต่อลบ.ซม.

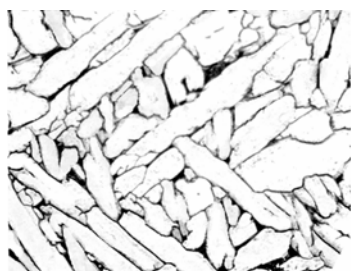
ความแข็ง = 35.30 HRC

ชิ้นงาน No.30

	ร้อยละของธาตุผสมโดยน้ำหนัก			
	Ti	Al	V	Other
ก่อนหลอม	89.97	6.03	4.00	-
หลังหลอมและ homoginize	89.16 ± 0.79	5.79 ± 0.22	5.05 ± 0.49	-

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน

- optical microscope (x500)



สัดส่วนเฟสอัลฟา : เฟสเบต้า = 89.02 : 10.98

ความหนาแน่น = 4.432 กรัมต่อลบ.ซม.

ความแข็ง = 32.70 HRC

ชิ้นงาน No.31

	ร้อยละของธาตุผสมโดยน้ำหนัก			
	Ti	Al	V	Other
ก่อนหลอม	90.00	6.00	4.00	-
หลังหลอมและ homoginize	90.57 ± 0.83	5.35 ± 0.23	4.08 ± 0.51	-

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน

- optical microscope (x500)



สัดส่วนเฟสอัลฟา : เฟสเบต้า = 88.80: 11.20

ความหนาแน่น = 4.436 กรัมต่อลบ.ซม.

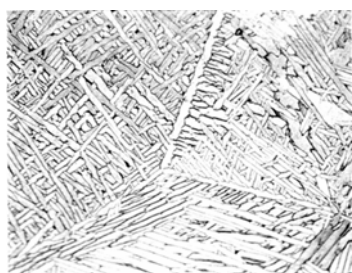
ความแข็ง = 37.20 HRC

ชิ้นงาน No.32

	ร้อยละของธาตุผสมโดยน้ำหนัก			
	Ti	Al	V	Other
ก่อนหลอม	90.00	6.00	4.00	-
หลังหลอมและ homoginize	90.67 ± 0.78	5.48 ± 0.21	3.85 ± 0.47	-

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน

- optical microscope (x200)



ความหนาแน่น = 4.433 กรัมต่อลบ.ซม.

ความแข็ง = 37.02 HRC

ชิ้นงาน No.33

	ร้อยละของธาตุผสมโดยน้ำหนัก			
	Ti	Al	V	Other
ก่อนหลอม	90.00	6.00	4.00	-
หลังหลอมและ homoginize	89.65 ± 0.72	5.91 ± 0.20	4.44 ± 0.44	-

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน

- optical microscope (x500)
- scanning electron microscope (x500)



สัดส่วนเฟสอัลฟา : เฟสเบต้า = 88.38 : 11.62

ความหนาแน่น = 4.427 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

ความแข็ง = 35.82 HRC

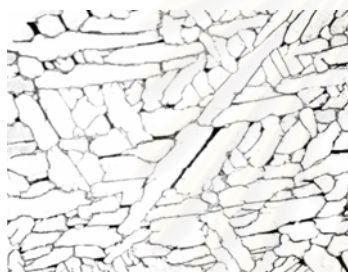
ศูนย์วิจัยและบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชิ้นงาน No.34

	ร้อยละของธาตุผสมโดยน้ำหนัก			
	Ti	Al	V	Other
ก่อนหลอม	90.00	6.00	4.00	-
หลังหลอมและ homoginize	90.00±0.78	5.91±0.21	4.10±0.30	-

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน

- optical microscope (x500)



สัดส่วนเฟสอัลฟา : เฟสเบต้า = 88.79 : 11.21

ความหนาแน่น = 4.423 กรัมต่อลบ.ซม.

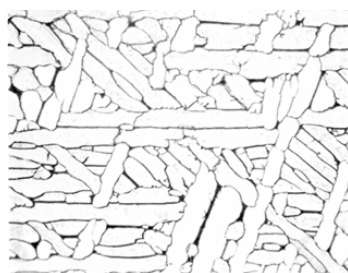
ความแข็ง = 36.34 HRC

ชิ้นงาน No.35

	ร้อยละของธาตุผสมโดยน้ำหนัก			
	Ti	Al	V	Other
ก่อนหลอม	90.00	6.00	4.00	-
หลังหลอมและ homoginize	90.33±0.72	5.68±0.20	4.00±0.44	-

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน

- optical microscope (x500)



สัดส่วนเฟสอัลฟา : เฟสเบต้า = 88.57 : 11.43

ความหนาแน่น = 4.410 กรัมต่อลบ.ซม.

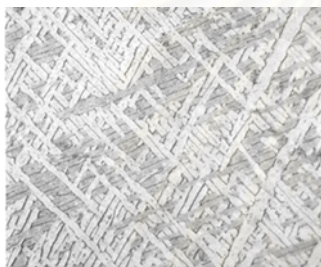
ความแข็ง = 34.30 HRC

ชิ้นงาน No.36

	ร้อยละของธาตุผสมโดยน้ำหนัก			
	Ti	Al	V	Other
ก่อนหลอม	90.00	6.00	4.00	-
หลังหลอมและ homoginize	90.05±0.71	5.74±0.19	4.21±0.43	-

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน

- optical microscope (x200)



ความหนาแน่น = 4.432 กรัมต่อลบ.ซม.

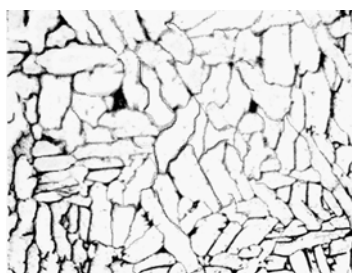
ความแข็ง = 36.90 HRC

ชิ้นงาน No.37

	ร้อยละของธาตุผสมโดยน้ำหนัก			
	Ti	Al	V	Other
ก่อนหลอม	90.00	6.00	4.00	-
หลังหลอมและ homoginize	90.46±0.63	6.00±0.17	3.54±0.36	-

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน

- optical microscope (x500)



สัดส่วนเฟสอัลฟา : เฟสเบต้า = 87.71 : 12.29

ความหนาแน่น = 4.429 กรัมต่อลบ.ซม.

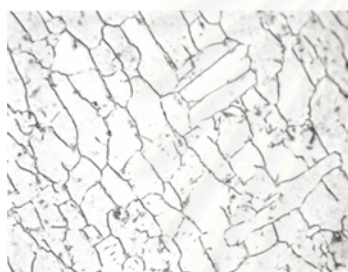
ความแข็ง = 35.98 HRC

ชิ้นงาน No.38

	ร้อยละของธาตุผสมโดยน้ำหนัก			
	Ti	Al	V	Other
ก่อนหลอม	90.00	6.00	4.00	-
หลังหลอมและ homoginize	90.07±0.67	5.90±0.19	4.04±0.40	-

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน

- optical microscope (x500)



สัดส่วนเฟสอัลฟา : เฟสเบต้า = 89.07 : 10.93

ความหนาแน่น = 4.449 กรัมต่อลบ.ซม.

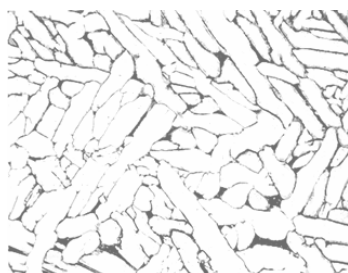
ความแข็ง = 35.92 HRC

ชิ้นงาน No.39

	ร้อยละของธาตุผสมโดยน้ำหนัก			
	Ti	Al	V	Other
ก่อนหลอม	90.00	6.00	4.00	-
หลังหลอมและ homoginize	90.41±0.73	5.72±0.20	3.87±0.44	-

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน

- optical microscope (x500)



สัดส่วนเฟสอัลฟา : เฟสเบต้า = 89.34 : 10.66

ความหนาแน่น = 4.458 กรัมต่อลบ.ซม.

ความแข็ง = 36.30 HRC

ชิ้นงาน No.40

	ร้อยละของธาตุผสมโดยน้ำหนัก			
	Ti	Al	V	Other
ก่อนหลอม	90.00	6.00	4.00	-
หลังหลอมและ homoginize	90.05 ± 0.76	5.78 ± 0.21	4.16 ± 0.46	-

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน

- optical microscope (x500)



สัดส่วนเฟสอัลฟา : เฟสเบต้า = 89.25 : 10.75

ความหนาแน่น = 4.451 กรัมต่อลบ.ซม.

ความแข็ง = 36.62 HRC

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

- ผลการเปรียบเทียบส่วนผสมทางเคมีจากการวิเคราะห์ด้วย EDS และ AA

◆ ชิ้นงาน NO.8

EDS	AA
Ti = 90.89 ± 0.91 wt%	Ti = 91.27 wt%
Al = 3.57 ± 0.21 wt%	Al = 4.37 wt%
V = 5.39 ± 0.37 wt%	V = 4.31 wt% *
Other = none	Other = Fe 0.047wt%

◆ ชิ้นงาน NO.14

EDS	AA
Ti = 84.90 ± 0.78 wt%	Ti = 85.51 wt%
Al = 11.39 ± 0.25 wt%	Al = 10.55 wt%
V = 3.71 ± 0.30 wt%	V = 3.91 wt% *
Other = none	Other = Fe 0.035 wt%

◆ ชิ้นงาน NO.15

EDS	AA
Ti = 89.40 ± 1.02 wt%	Ti = 89.90 wt%
Al = 6.18 ± 0.29 wt%	Al = 6.22 wt%
V = 3.91 ± 0.41 wt%	V = 3.85 wt% *
Other = 0.51 ± 0.29 wt%	Other = Fe 0.023 wt%

◆ ชิ้นงาน NO.21

EDS	AA
Ti = 90.11 ± 0.93 wt%	Ti = 90.08 wt%
Al = 5.20 ± 0.26 wt%	Al = 5.67 wt%
V = 4.69 ± 0.58 wt%	V = 4.23 wt% *
Other = none	Other = Fe 0.016 wt%

◆ ชิ้นงาน NO.23

EDS	AA
Ti = 91.42 ± 0.92 wt%	Ti = 91.41 wt%
Al = 5.26 ± 0.26 wt%	Al = 5.27 wt%
V = 3.32 ± 0.57 wt%	V = 3.32 wt% *
Other = none	Other = Fe 0.005 wt%

◆ ชิ้นงาน NO.29

EDS	AA
Ti = 87.77 ± 0.83 wt%	Ti = 88.68 wt%
Al = 6.32 ± 0.23 wt%	Al = 5.98 wt%
V = 5.91 ± 0.53 wt%	V = 5.34 wt% *
Other = none	Other = Fe = 0.002 wt%

◆ ชิ้นงาน NO.38

EDS	AA
Ti = 90.07 ± 0.67 wt%	Ti = 90.21 wt%
Al = 5.90 ± 0.19 wt%	Al = 5.89 wt%
V = 4.04 ± 0.40 wt%	V = 3.89 wt% *
Other = none	Other = Fe 0.008 wt%

*หมายเหตุ : ร้อยละของวาเนเดียมจากผลการวิเคราะห์ด้วย AA คำนวณได้จาก

$$\text{wt\% V} = 100 - (\text{wt\% Ti} + \text{wt\% Al} + \text{wt\% Fe})$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

การ์ดมาตรฐาน JCPD

Reference pattern: 05-0682

Name : Titanium
Name : Titanium, syn
Formula : Ti
Elements : Ti
Groups : --
Subfiles : Inorganic, Minerals, Alloys, Common phases, NBS patterns,
Forensics, Educational patterns
Pattern deleted: NO
Radiation : Cu K α
Wavelength : 1.54186

d value	Angle	Rel. Int.
2.5570	35.095	30
2.3420	38.438	26
2.2440	40.187	100
1.7260	53.059	19
1.4750	63.022	17
1.3320	70.729	16
1.2760	74.339	2
1.2470	76.374	16
1.2330	77.401	13
1.1708	82.366	2
1.1220	86.803	2
1.0653	92.718	3
0.9895	102.359	6
0.9458	109.197	11
0.9175	114.334	10
0.8927	119.445	4
0.8796	122.436	4
0.8634	126.480	2
0.8514	129.778	4
0.8211	139.736	12
0.8005	148.757	9

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Reference pattern: 04-0787

 Name : Aluminum
 Name : Aluminum, syn [NR]
 Formula : Al
 Elements : Al
 Groups : --
 Subfiles : Inorganic, Minerals, Alloys, Common phases, NBS patterns,
 Forensics, Educational patterns
 Pattern deleted: NO

Radiation : Cu K α
 Wavelength : 1.54186

d value	Angle	Rel. Int.
2.3380	38.506	100
2.0240	44.778	47
1.4310	65.195	22
1.2210	78.306	24
1.1690	82.520	7
1.0124	99.191	2
0.9289	112.185	8
0.9055	116.726	8
0.8266	137.705	8

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Reference pattern: 22-1058

Name : Vanadium
 Formula : V
 Elements : V
 Groups : --
 Subfiles : Inorganic, Alloys, Common phases, NBS patterns, Forensics,
 Educational patterns
 Pattern deleted: NO
 Radiation : Cu K α
 Wavelength : 1.54186

d value	Angle	Rel. Int.
2.1411	42.208	100
1.5141	61.217	12
1.2363	77.156	19
1.0704	92.147	5
0.9575	107.250	8
0.8739	123.811	3
0.8091	144.662	11

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

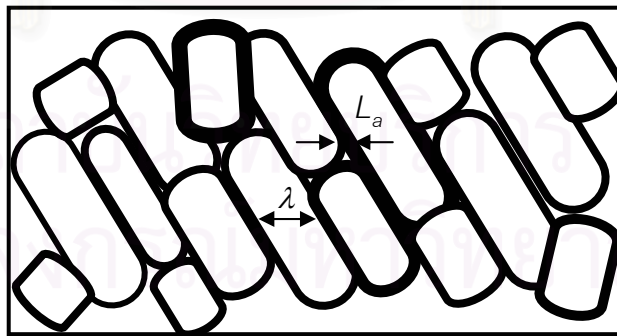
ภาคผนวก ง

การหาสัดส่วนเฟสจาก Image Analyzer

การคำนวณหาปริมาณสัดส่วนเฟสอัลฟาและเบต้าในชิ้นงาน Ti-6Al-4V ที่ปรากฏในโครงสร้างจุลภาคด้วยวิธี Quantitative Metallography เป็นการคำนวณหาปริมาณเฟสอัลฟาและเบต้าโดยปริมาตร จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน เนื่องจากผลจากการใช้กรดกัดผิวทำให้เกิดพบความแตกต่างของเฟสเนื่องจากแต่ละเฟสจะทำปฏิกิริยากับกรดไม่เท่ากัน พบว่าเฟสเบต้าจะอยู่บริเวณขอบเกรน โดยมีเฟสอัลฟาเป็นเนื้อเกรน จึงสามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$\lambda = (L_a) \left[\frac{1 - (V_v)_a}{(V_v)_a} \right]$$

เมื่อ	λ	คือ	ระยะห่างของเฟสเบต้าถึงเบต้าที่อยู่ตามขอบเกรน
	$(V_v)_a$	คือ	อัตราส่วนโดยปริมาตรของเฟสเบต้า
	L_a	คือ	ความกว้างเฉลี่ยของเฟสเบต้า



รูปแสดงระยะ λ และ L_a

สิ่งที่สำคัญอีกประการหนึ่งของการหาปริมาณสัดส่วนของเฟสอัลฟาและเบต้า คือ ต้องพิจารณาถึงค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่เกิดขึ้น โดยค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานคำนวณได้ดังนี้

$$SD = \left\{ \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x - \bar{x})^2 \right\}^{1/2}$$

โดย	n	คือ	จำนวนครั้งการวัด
	X	คือ	ค่าสัดส่วนเฟสที่ได้จากการวัดแต่ละครั้ง
	\bar{X}	คือ	ค่าเฉลี่ยเลขคณิตของการวัดสัดส่วนเฟส

เมื่อกำหนดค่าความเชื่อมั่นให้มีค่า 95% จะได้ขอบเขตของความเชื่อมั่น (CL) ดังสมการ

$$CL = \pm 1.96 \frac{SD}{\sqrt{n}}$$

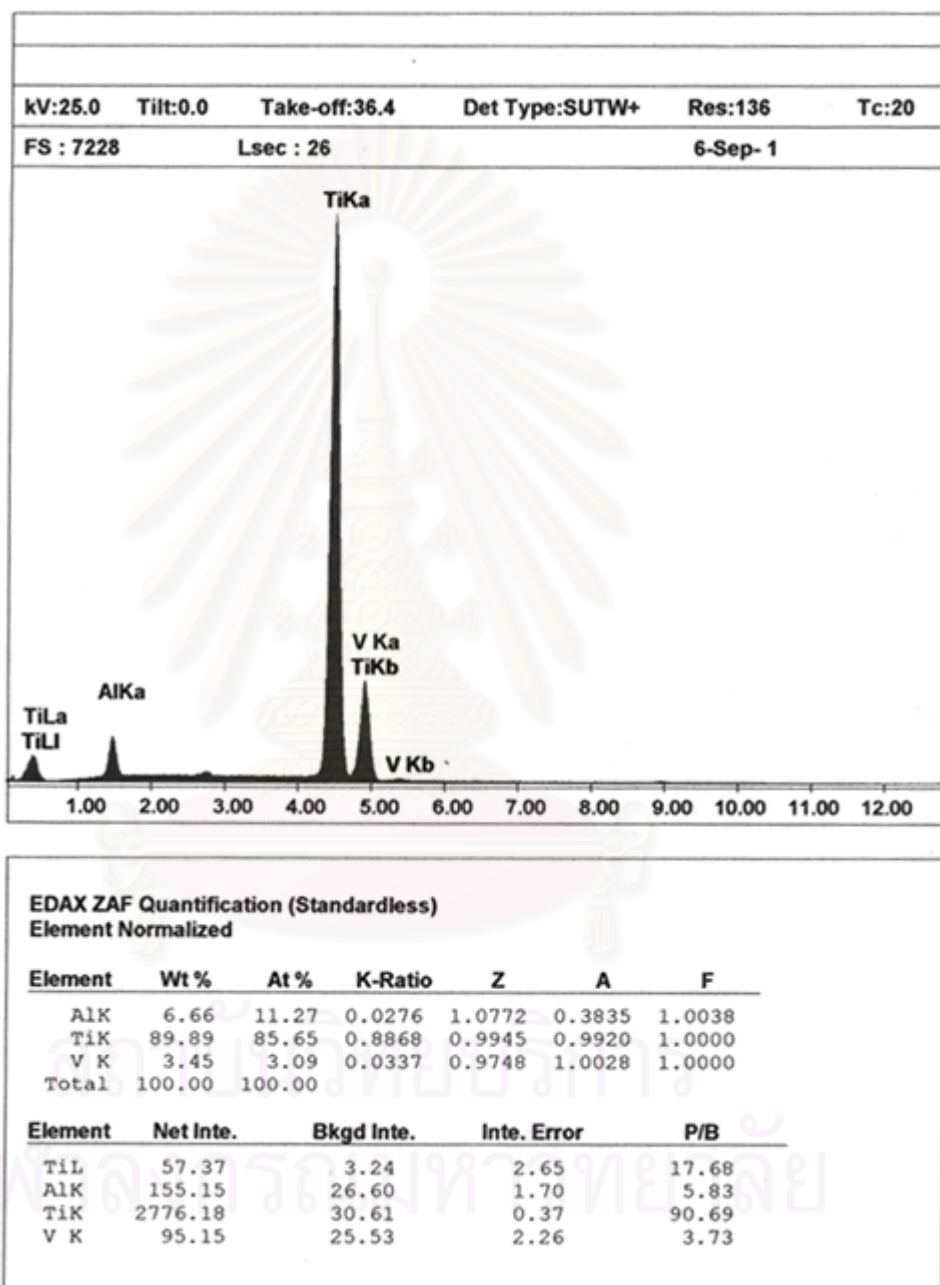
ดังนั้นปริมาณค่าสัดส่วนของเฟสอัลฟาและเบต้าจะอยู่ในช่วง $V_v = \bar{X} \pm CL$

และมีค่าความผิดพลาด (%error) = $\frac{CL}{\bar{X}} \times 100$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ

ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วย EDS



ภาคผนวก จ

ผลการทดสอบความแข็ง

ชั้นที่	ค่าความแข็งจุดที่					ค่าความแข็งเฉลี่ย (HRC)
	1	2	3	4	5	
No.1	35.0	34.8	37.2	38.0	37.2	36.44
No.2	36.8	35.9	36.2	37.3	38.0	36.84
No.3	36.8	35.0	35.7	33.5	33.0	34.80
No.4	34.4	31.5	37.5	34.7	37.2	35.06
No.5	35.6	35.8	36.0	36.0	35.8	35.84
No.6	36.0	40.0	40.3	39.8	40.1	39.24
No.7	36.0	32.6	33.8	36.2	36.3	34.98
No.8	35.4	37.1	32.4	34.0	33.6	34.50
No.9	34.6	34.2	35.5	33.7	34.1	34.42
No.10	37.8	36.8	36.7	35.7	37.4	36.88
No.11	33.2	34.0	33.9	34.8	38.0	34.78
No.12	35.3	35.7	38.5	38.0	34.5	36.40
No.13	39.8	36.0	31.0	35.2	35.5	35.50
No.14	27.0	29.0	29.0	31.0	28.5	28.90
No.15	32.5	38.5	35.0	35.5	33.2	34.94
No.16	36.2	34.0	36.4	33.0	32.5	34.42
No.17	36.0	32.7	35.2	33.5	34.7	34.42
No.18	34.2	36.0	34.5	34.0	32.8	34.30
No.19	34.1	39.5	32.7	33.8	31.3	34.28
No.20	35.7	33.0	33.0	32.5	32.3	33.30
No.21	38.5	35.5	39.5	35.5	37.8	37.36

ชั้นที่	ค่าความแข็งจุดที่					ค่าความแข็งเฉลี่ย (HRC)
	1	2	3	4	5	
No.22	36.2	34.8	34.0	36.3	34.8	35.22
No.23	36.0	34.6	36.8	32.0	35.0	34.88
No.24	33.3	33.0	32.0	33.2	31.2	32.54
No.25	35.0	34.0	34.5	34.8	32.2	34.10
No.26	34.5	34.0	33.3	32.0	35.0	33.76
No.27	35.0	34.5	35.2	34.5	37.2	35.28
No.28	32.5	37.6	36.2	32.0	33.6	34.38
No.29	34.0	35.5	37.0	36.0	34.0	35.30
No.30	33.0	31.0	33.0	32.0	34.5	32.70
No.31	36.7	34.8	38.8	37.2	38.5	37.20
No.32	35.8	37.2	35.2	39.0	38.2	37.08
No.33	35.8	35.0	34.8	39.0	34.5	35.82
No.34	36.0	33.5	37.2	39.0	36.0	36.34
No.35	34.2	32.0	34.8	36.2	34.3	34.30
No.36	36.8	36.5	37.0	39.2	35.0	36.90
No.37	36.2	36.0	35.9	35.6	36.2	35.98
No.38	35.7	35.5	36.2	36.4	35.8	35.92
No.39	36.2	36.2	36.5	35.8	36.8	36.30
No.40	37.2	35.4	36.8	36.5	37.2	36.62
ค่าเฉลี่ย						35.21
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน						1.6976

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวปริญดา ปิยะคิม เกิดเมื่อวันที่ 18 พฤษภาคม พ.ศ. 2519 เริ่มเข้าศึกษาระดับ
อุดมศึกษาที่ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา
2537 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิตในปีการศึกษา 2540 จากนั้นจึงเข้าศึกษาต่อ
ในหลักสูตรวิศวกรรมโลหการมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเมื่อปี
พ.ศ. 2541



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย