

บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์

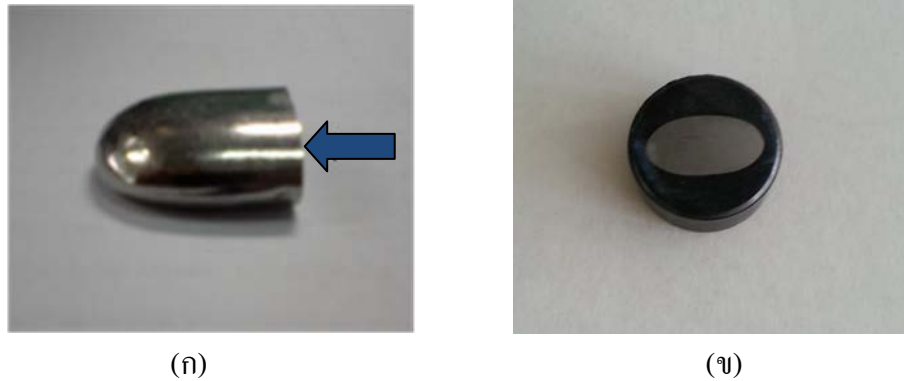
ในการทดลองเริ่มจากหลอมโลหะส่วนผสมตามต้องการได้แก่ Ti-12.5Mo, Ti-12.5Mo-5Nb, Ti-12.5Mo-10Nb, Ti-12.5Mo-15Nb และ Ti-12.5Mo-20Nb จากนั้นนำอินกอตไปวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี เพื่อยืนยันความถูกต้องและความสม่ำเสมอของส่วนผสมที่ผ่านการหลอมทั้งหมดทุกส่วนผสม หลังจากนั้นจะกล่าวถึงผลการศึกษาโครงสร้างและสมบัติทางกลของโลหะผสมที่ผ่านงานหล่อ งานรีดเย็น และหลังการทำการกรรมวิธีทางความร้อน

4.1 ลักษณะอินกอตและผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี

ในการทดลองได้เตรียมอินกอตของไทเทเนียมบริสุทธิ์และโลหะผสม Ti-12.5Mo-nNb (เมื่อ $n = 0, 5, 10, 15$ และ 20) โดยการหลอมด้วยเตาอาร์กอนอาร์ค ในการหลอมได้พลิกชิ้นงานกลับไปมาหลอมซ้ำอย่างน้อย 6-7 ครั้ง เพื่อความมั่นใจว่าส่วนผสมเข้ากันได้ดีแล้ว จากนั้นปล่อยให้เย็นตัวในเบ้าทองแดงที่มีน้ำหล่อเย็น อินกอตของโลหะผสมที่ได้มีน้ำหนักประมาณ 40 กรัม ลักษณะเป็นรูปทรงยาวรี มีความกว้าง 24 มิลลิเมตร ยาว 45 มิลลิเมตร หนา 11 มิลลิเมตร แสดงลักษณะอินกอตของโลหะผสมดังรูปที่ 4.1 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานส่วนผสมที่ต้องการศึกษา ในการวิจัยนี้ได้นำอินกอตไปตัดตามแนวขวางของอินกอต โดยนำส่วนหนึ่งไปหล่อเรซินเพื่อทำตัวเรือนจับยึดชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 4.2 หลังจากนั้นนำอินกอตส่วนที่เหลือไปวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี ด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence Spectrometry; XRF) ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์การใช้เครื่องมือจากบริษัท Cleverich รุ่น Thermo Scientific Niton Model XL3t 980 XRF Analyzers



รูปที่ 4.1 ลักษณะอินกอตโลหะผสมที่ได้จากการหล่อ



รูปที่ 4.2 ลักษณะของอินกอตที่ถูกตัด (ก) อินกอตส่วนที่เหลือจากการตัด (ข) อินกอตหลังทำตัวเรือน

ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ แสดงผลในตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์พบว่าค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับปริมาณธาตุผสมเริ่มต้น เพื่อความสะดวกในการเรียกชื่อโลหะผสมในการทดลองนี้ จึงใช้สัญลักษณ์ Ti-12.5Mo, Ti-12.5Mo-5Nb, Ti-12.5Mo-10Nb, Ti-12.5Mo-15Nb และ Ti-12.5Mo-20Nb แทนส่วนผสมที่ศึกษา

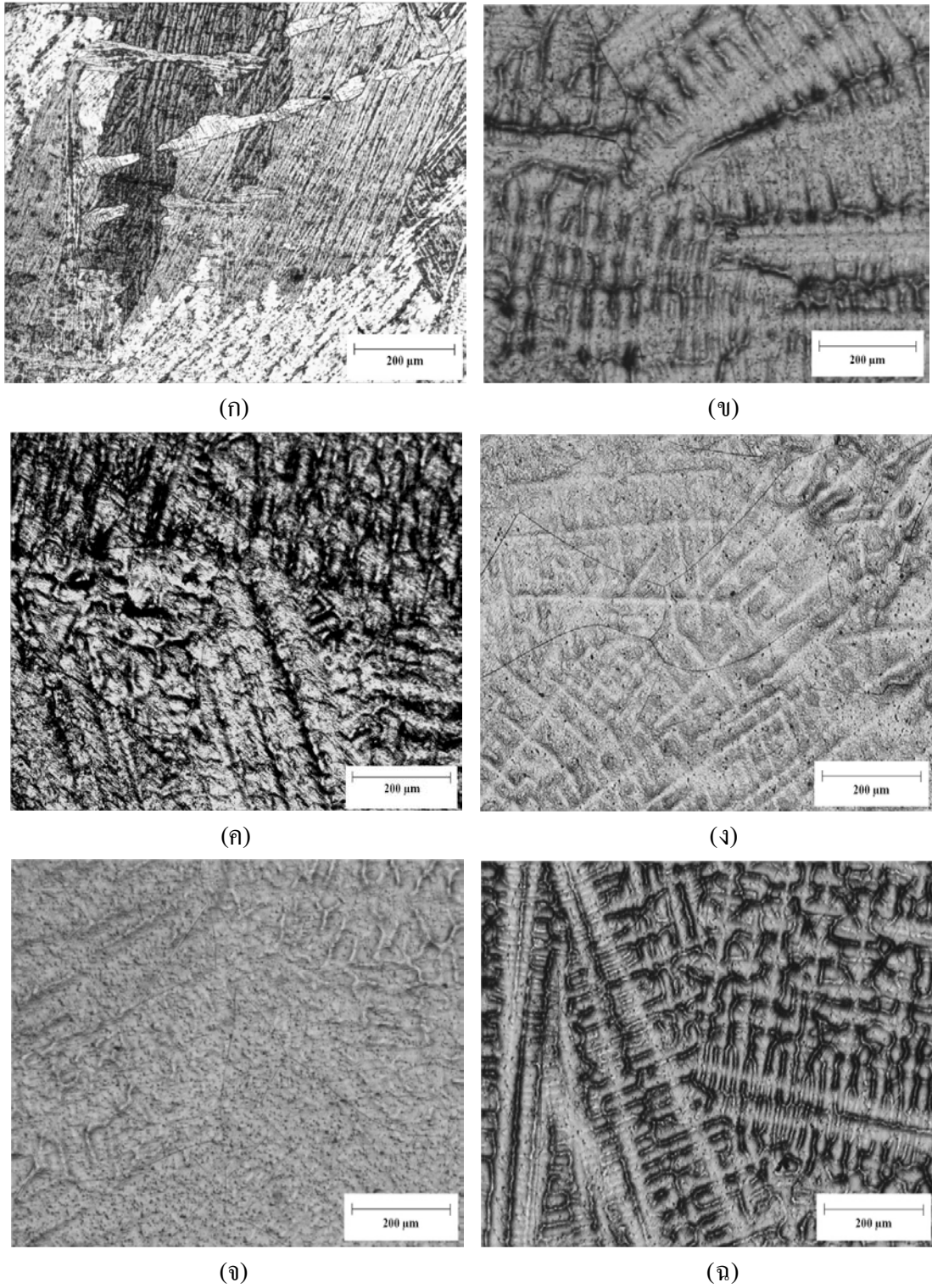
ตารางที่ 4.1 ผลวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค XRF ของอินกอตโลหะผสมไทเทเนียม

โลหะผสม	ปริมาณธาตุที่ได้จากการวิเคราะห์ (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)		
	ไทเทเนียม	โมลิบดีนัม	ไนโอเบียม
Ti-12.5Mo	87.58	12.42	-
Ti-12.5Mo-5Nb	82.44	12.46	5.10
Ti-12.5Mo-10Nb	77.60	12.38	10.02
Ti-12.5Mo-15Nb	72.51	12.27	15.22
Ti-12.5Mo-20Nb	67.26	12.51	20.23

4.2 โครงสร้างของอินกอตและความแข็งจุลภาค

4.2.1 โครงสร้างจุลภาคถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง

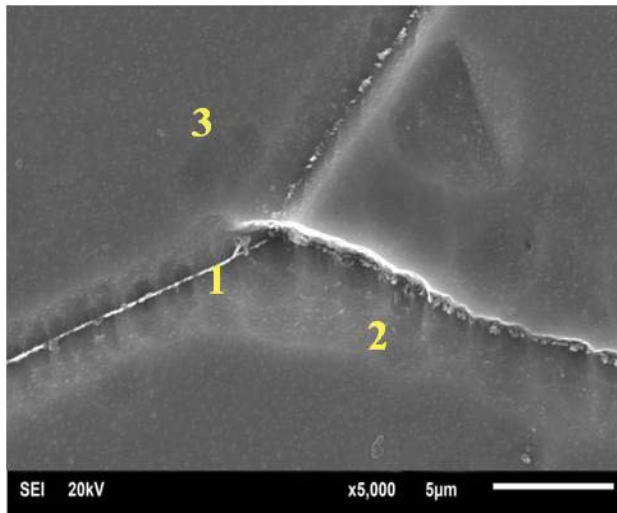
จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานไทเทเนียมบริสุทธิ์และไทเทเนียมผสม Ti-12.5Mo-nNb (เมื่อ $n = 0, 5, 10, 15$ และ 20) ตลอดหน้าตัด พบว่าบริเวณส่วนล่างที่สัมผัสกับเข้าทองแดงถึงส่วนผิวบนที่สัมผัสกับบรรยากาศภายในเตา มีโครงสร้างสม่ำเสมอตลอดหน้าตัดทุกส่วนผสม ดังนั้นผลการทดลองนี้จึงเลือกถ่ายรูปรูปบริเวณตรงกลางของชิ้นงาน โครงสร้างจุลภาคถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงของไทเทเนียมบริสุทธิ์และไทเทเนียมผสม Ti-12.5Mo-nNb (เมื่อ $n = 0, 5, 10, 15$ และ 20) แสดงในรูปที่ 4.3 (ก)-(ง) ตามลำดับ พบว่าโครงสร้างจุลภาคของอินกอตทุกส่วนผสมมีความสม่ำเสมอตลอดหน้าตัด ชิ้นงานไทเทเนียมบริสุทธิ์ โครงสร้างจะมีลักษณะเป็นกลุ่มของ Parallel alpha plate หรือ Lath ซึ่งเกิดจากการเย็นตัวของอินกอตไทเทเนียมบริสุทธิ์ภายในเตาหลังผ่านการหลอม ส่วนโครงสร้างจุลภาคของอินกอตโลหะผสม Ti-12.5Mo-nNb (เมื่อ $n = 0, 5, 10, 15$ และ 20) มีลักษณะเป็นเกรนค่อนข้างใหญ่และมีลักษณะของเดนไดรต์ (Dendrite) เกิดขึ้น ซึ่งเป็นลักษณะที่พบโดยทั่วไปที่พบในงานหล่อ เดนไดรต์มีการกระจายตัวสม่ำเสมอตลอดทั้งชิ้นงาน การที่โครงสร้างจุลภาคมีลักษณะเป็นเดนไดรต์ จึงมีการกระจายตัวของธาตุที่ไม่สม่ำเสมอในบริเวณเล็กๆ เรียก Microsegregation ซึ่งลักษณะโครงสร้างจุลภาคของไทเทเนียมผสมดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ho และคณะ [6] พบว่าโครงสร้างจุลภาคของไทเทเนียมผสม โมลิบดีนัมปริมาณร้อยละ 10-20 โดยน้ำหนัก มีลักษณะโครงสร้างจุลภาคเป็น Equixed Grains ขนาดใหญ่และมีเดนไดรต์ปะปนภายในโลหะผสมและโครงสร้างจุลภาคดังกล่าวยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Xu และคณะ [7] ได้ศึกษาเกี่ยวกับโลหะไทเทเนียมผสมกลุ่มบีตา พบว่าโครงสร้างจุลภาคมีลักษณะเป็น Equixed Grains ขนาดใหญ่และเกิดเดนไดรต์ภายในเกรนอยู่ทั่วชิ้นงานโลหะผสม



รูปที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงของอินกอต (ก) ไทเทเนียมบริสุทธิ์
 (ข) Ti-12.5Mo (ค) Ti-12.5Mo-5Nb (ง) Ti-12.5Mo-10Nb (จ) Ti-12.5Mo-15Nb
 (ฉ) Ti-12.5Mo-20Nb

4.2.2 โครงสร้างจุลภาคถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

โครงสร้างจุลภาคของอินกอตโลหะผสม Ti-12.5Mo ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดกำลังขยาย 5,000 เท่าและแสดงตำแหน่งของการวิเคราะห์ 3 ตำแหน่ง แสดงดังรูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS แสดงดังตารางที่ 4.2 บริเวณการวิเคราะห์ตำแหน่งที่ 1 เป็นบริเวณขอบเกรนมีส่วนผสมของโมลิบดีนัมร้อยละ 12.66 โดยน้ำหนัก ที่เหลือเป็นไทเทเนียม ส่วนตำแหน่งที่ 2 และตำแหน่งที่ 3 เป็นบริเวณของเฟสพื้นมีปริมาณโมลิบดีนัมใกล้เคียงกัน มีค่าร้อยละ 12.05 และ 12.18 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เห็นได้ว่าในแต่ละตำแหน่งมีปริมาณธาตุที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นเฟสสารละลายของแข็งที่มีไทเทเนียมเป็นธาตุผสมหลัก และ โมลิบดีนัมเป็นตัวถูกละลาย

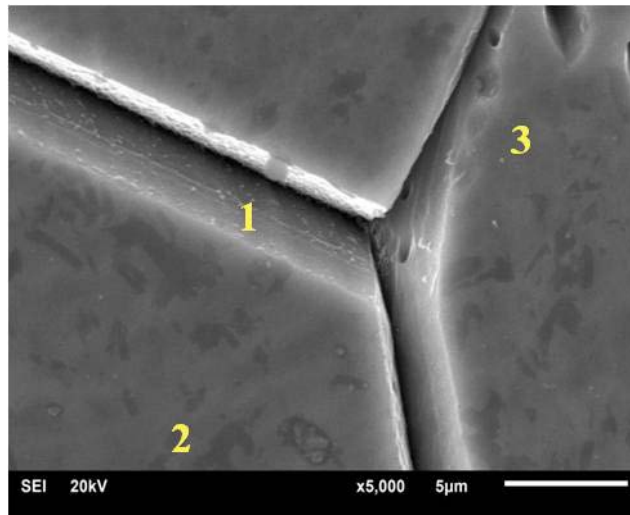


รูปที่ 4.4 โครงสร้างจุลภาคถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของอินกอต Ti-12.5Mo

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS ของอินกอต Ti-12.5Mo

ตำแหน่งที่วิเคราะห์	ปริมาณธาตุที่พบ (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	
	ไทเทเนียม	โมลิบดีนัม
1	87.34	12.66
2	87.95	12.05
3	87.82	12.18

โครงสร้างจุลภาคของอินกอตโลหะผสม Ti-12.5Mo-5Nb ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดกำลังขยาย 5,000 เท่า แสดงตำแหน่งของการวิเคราะห์ 3 ตำแหน่ง แสดงดังรูปที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีแสดงดังตารางที่ 4.3 บริเวณการวิเคราะห์ตำแหน่งที่ 1 เป็นบริเวณขอบเกรนมีส่วนผสมของโมลิบดีนัมร้อยละ 11.62 โดยน้ำหนัก และส่วนผสมของไนโอเบียมร้อยละ 4.48 โดยน้ำหนัก ที่เหลือเป็นไทเทเนียม ส่วนตำแหน่งที่ 2 และตำแหน่งที่ 3 มีปริมาณธาตุผสมใกล้เคียงกัน การที่ตำแหน่งที่ 1 มีปริมาณธาตุโมลิบดีนัมและไนโอเบียมต่ำกว่าบริเวณอื่น ทั้งนี้เนื่องจากเกิดการหลุดไปของธาตุในขั้นตอนของการกัดกรดเพราะบริเวณขอบเกรนเป็นบริเวณที่ง่ายต่อการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีสังเกตจากลักษณะของขอบเกรนที่มีลักษณะหนาและลึก

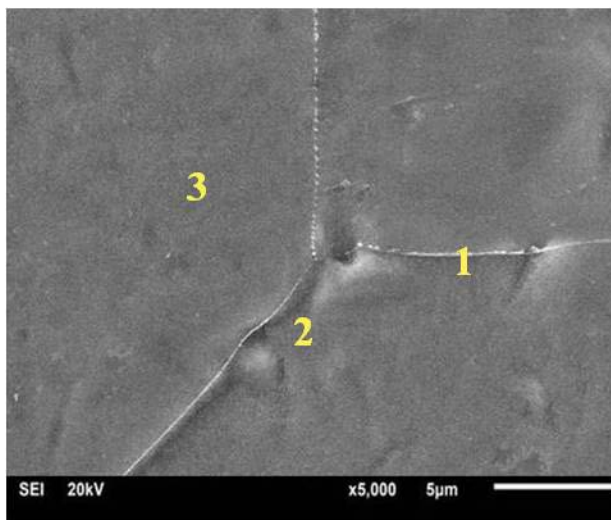


รูปที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของอินกอต Ti-12.5Mo-5Nb

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS ของอินกอต Ti-12.5Mo-5Nb

ตำแหน่งที่วิเคราะห์	ปริมาณธาตุที่พบ (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)		
	ไทเทเนียม	โมลิบดีนัม	ไนโอเบียม
1	83.90	11.62	4.48
2	81.76	13.13	5.11
3	81.95	12.93	5.50

โครงสร้างจุลภาคถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดกำลังขยาย 5,000 เท่าของอินกอต โลหะผสม Ti-12.5Mo-10Nb แสดงดังรูปที่ 4.6 พบว่ามีอนุภาคขนาดเล็กตามขอบเกรนสีขาว ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี 3 บริเวณด้วยเทคนิค EDS แสดงดังตารางที่ 4.4 พบว่าตำแหน่งที่ 1 เป็นบริเวณเฟสขนาดเล็กสีขาวที่อยู่ตามขอบเกรน ตำแหน่งที่ 2 และ 3 เป็นบริเวณเฟสพื้น ทั้ง 3 บริเวณมีปริมาณธาตุไทเทเนียม โมลิบดินัม และไนโอเบียมใกล้เคียงกับปริมาณธาตุผสมเริ่มต้น ซึ่งเป็นเฟสสารละลายของแข็งที่มีไทเทเนียมเป็นธาตุผสมหลัก โดยมีธาตุโมลิบดินัมและธาตุไนโอเบียมเป็นตัวถูกละลาย

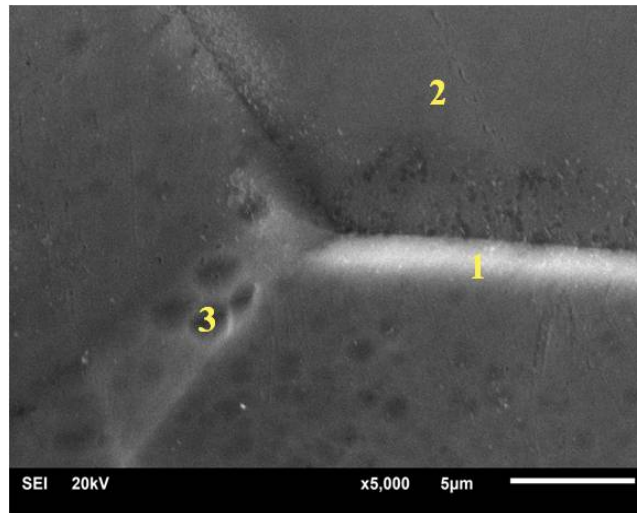


รูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของอินกอต Ti-12.5Mo-10Nb

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS ของอินกอต Ti-12.5Mo-10Nb

ตำแหน่งที่วิเคราะห์	ปริมาณธาตุที่พบ (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)		
	ไทเทเนียม	โมลิบดินัม	ไนโอเบียม
1	77.38	12.61	10.01
2	77.58	12.46	9.96
3	77.67	12.47	9.89

โครงสร้างจุลภาคถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดกำลังขยาย 5,000 เท่าของอินกอต โลหะผสม Ti-12.5Mo-15Nb ซึ่งตำแหน่งในการวิเคราะห์ปริมาณธาตุผสมด้วยเทคนิค EDS แสดงผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.7 และตารางที่ 4.5 พบว่าตำแหน่งที่ 1 เป็นบริเวณขอบเกรน ตำแหน่งที่ 2 เป็นบริเวณเฟสพื้น มีปริมาณธาตุไนโอเบียมใกล้เคียงกัน มีค่าร้อยละ 15.42 และ 15.53 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ส่วนบริเวณที่ 3 มีปริมาณธาตุไนโอเบียมร้อยละ 15.02 โดยน้ำหนัก เห็นได้ว่าในแต่ละบริเวณมีความแตกต่างกันของธาตุผสม แต่ส่วนผสมทุกตำแหน่งใกล้เคียงกับส่วนผสมตั้งต้นตามต้องการ

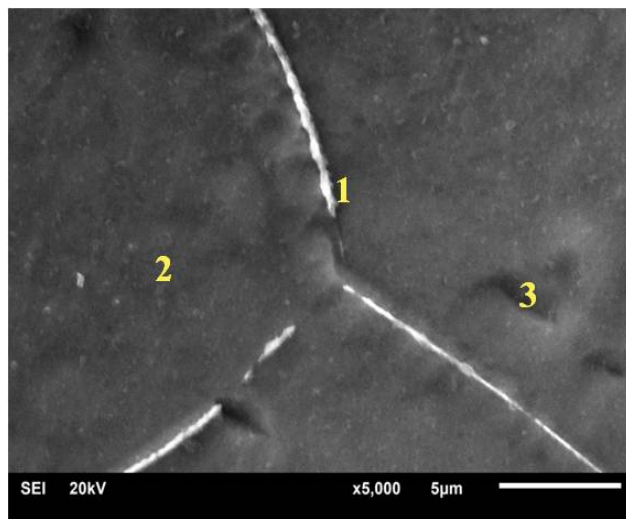


รูปที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของอินกอต Ti-12.5Mo-15Nb

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS ของอินกอต Ti-12.5Mo-15Nb

ตำแหน่งที่วิเคราะห์	ปริมาณธาตุที่พบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	ไทเทเนียม	โมลิบดีนัม	ไนโอเบียม
1	71.83	12.75	15.42
2	71.80	12.67	15.53
3	72.50	12.48	15.02

โครงสร้างจุลภาคถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดกำลังขยาย 5,000 เท่าของอินกอต โลหะผสม Ti-12.5Mo-20Nb แสดงดังรูปที่ 4.8 การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี 3 บริเวณด้วยเทคนิค EDS ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.6 พบว่าบริเวณตำแหน่งที่ 1 เป็นบริเวณขอบเกรน และตำแหน่งที่ 2 เป็นบริเวณเฟสพื้นมีปริมาณธาตุไนโอเบียมใกล้เคียงกันมีค่าร้อยละ 19.54 และ 19.74 โดยน้ำหนัก ส่วนตำแหน่งที่ 3 เป็นบริเวณเฟสพื้นมีปริมาณธาตุไนโอเบียมร้อยละ 20.32 โดยน้ำหนัก เห็นได้ว่าในแต่ละบริเวณที่ทำการวิเคราะห์มีความแตกต่างกันของธาตุผสม



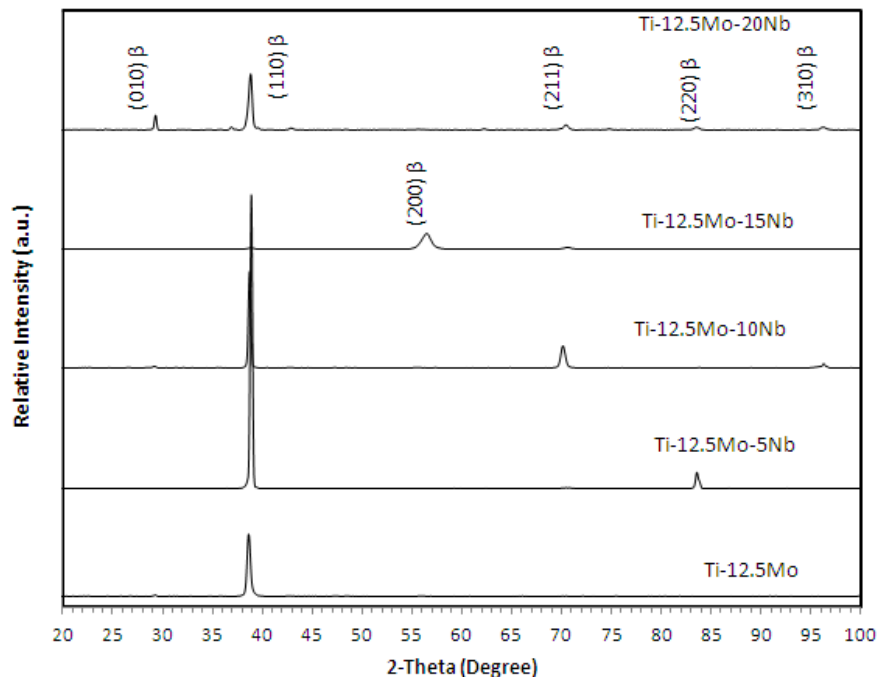
รูปที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดของอินกอต Ti- 12.5Mo-20Nb

ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS ของอินกอต Ti-12.5Mo-20Nb

ตำแหน่งที่วิเคราะห์	ปริมาณธาตุที่พบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	ไทเทเนียม	โมลิบดีนัม	ไนโอเบียม
1	68.21	12.25	19.54
2	67.85	12.41	19.74
3	67.15	12.53	20.32

4.2.3 โครงสร้างผลึกของอินกอต

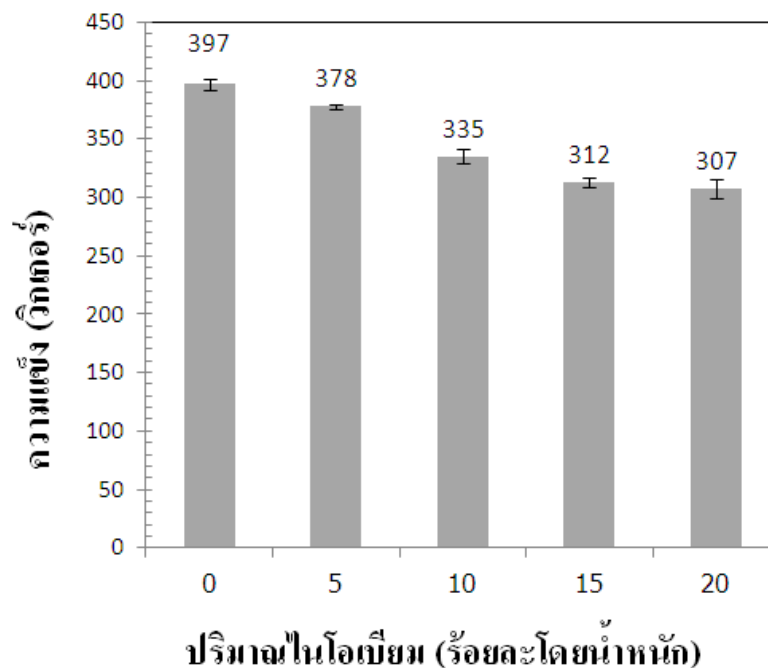
ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกของอินกอต ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บนชิ้นงาน Ti-12.5Mo-nNb (เมื่อ $n = 0, 5, 10, 15$ และ 20) แสดงในรูปที่ 4.9 พบว่าอินกอตของโลหะผสมทุกส่วนผสมมีโครงสร้างเป็นเฟสบีตา (β) ที่อุณหภูมิห้องมีโครงสร้างผลึกเป็น BCC เนื่องจากใน ส่วนผสมมีปริมาณ โมลิบดีนัม และไนโอเบียม ซึ่งจัดเป็นธาตุผสมที่ช่วยเพิ่มเสถียรภาพให้กับเฟสบีตา ในปริมาณที่มากพอที่จะทำให้โครงสร้างผลึกเปลี่ยนจาก HCP ไปเป็น BCC ที่อุณหภูมิห้องได้ สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Ho และคณะ [6] ได้ศึกษาผลของปริมาณ โมลิบดีนัมในไทเทเนียมบริสุทธิ์ Ti-xMo ($x = 6-20$ ร้อยละ โดยน้ำหนัก) พบว่าการเติม โมลิบดีนัมในไทเทเนียมบริสุทธิ์ปริมาณ ร้อยละ 6-9 โดยน้ำหนัก มีโครงสร้างผลึกเป็น HCP ของมาร์เทนไซต์ ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ พบในไทเทเนียมบริสุทธิ์และไทเทเนียมผสมธาตุอื่นต่ำ แต่เมื่อเติม โมลิบดีนัมเป็นร้อยละ 10-20 โดยน้ำหนัก ทำให้โครงสร้างผลึกเปลี่ยนเป็น BCC ของเฟสบีตาที่อุณหภูมิห้องทั้งหมดและ ไม่ปรากฏ HCP ของเฟสแอลฟาหรือเฟสอื่นเกิดขึ้น สอดคล้องกับการทดลองนี้ที่เติม โมลิบดีนัมปริมาณร้อยละ 12.5 โดย น้ำหนัก เพียงพอต่อการทำให้เกิดเฟสบีตาทั้งหมดที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 4.9 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บนอินกอต Ti-12.5Mo-nNb

4.2.4 ความแข็งแรงจุลภาคของอินกอต

ผลการวัดความแข็งแรงจุลภาคของอินกอตโลหะไทเทเนียมผสม Ti-12.5Mo-nNb (เมื่อ n= 0, 5, 10, 15 และ 20) แสดงดังรูปที่ 4.10 พบว่าความแข็งแรงเฉลี่ยของ โลหะไทเทเนียมผสม Ti-12.5Mo มีค่าความแข็งแรงเฉลี่ย 397 วิกเกอร์ เมื่อเติมไนโอเบียมในปริมาณร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก ค่าความแข็งแรงมีแนวโน้มลดลงเหลือ 378, 335, 312 และ 307 วิกเกอร์ ตามลำดับ ซึ่งค่าความแข็งแรงที่ได้มีแนวโน้มลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Xu และคณะ [7, 25] พบว่าการเติมไนโอเบียมร้อยละ 3 , 7 และ 10 ในโลหะไทเทเนียมผสม Ti-10Mo [7] และเติมไนโอเบียมปริมาณร้อยละ 5 , 10, 15 และ 20 ในโลหะผสม Ti-15Mo [25] ตามลำดับ มีผลทำให้ความแข็งแรงลดลงเช่นกัน และกล่าวไว้ว่าค่าความแข็งแรงที่ลดลงอาจเป็นผลมาจากขนาดของเกรนและโครงสร้างผลึก ซึ่งสามารถส่งผลต่อค่าความแข็งแรงได้



รูปที่ 4.10 ความแข็งแรงของอินกอต Ti-12.5Mo-nNb ที่เติมไนโอเบียมปริมาณต่างกัน

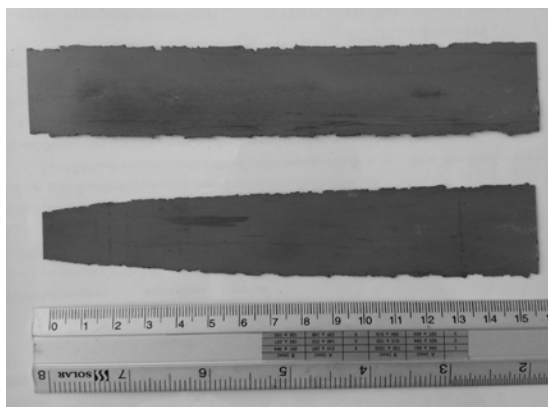
ในการทดลองได้นำอินกอตของโลหะผสมทุกส่วนผสมไปทำการรีดเย็นที่อุณหภูมิห้อง เพื่อเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงดึง ทั้งนี้เนื่องจากอินกอตที่ได้จากการหลอมมีขนาดเล็กจึงต้องทำการรีดเย็นเพื่อปรับขนาดชิ้นงานให้เหมาะสมสำหรับการทดสอบแรงดึง หลังการรีดเย็นพบว่าโลหะผสม Ti-12.5Mo สามารถรีดเย็นลดขนาดความหนาได้เพียงร้อยละ 43 โดยไม่แตก แต่หลังจากรีดเย็นลดขนาดความหนาลงมากขึ้น พบว่าชิ้นงานเกิดการแตกร้าวขึ้นไม่สามารถรีดต่อได้ ซึ่งลักษณะการแตก

ของชิ้นงานโลหะผสม Ti-12.5Mo รีดลดขนาดประมาณร้อยละ 38 แสดงในรูปที่ 4.11 ชิ้นงานจะเริ่มแตกร้าวจากบริเวณขอบของชิ้นงานแล้วขยายบริเวณกว้างเพิ่มขึ้นเมื่อทำการรีดลดขนาดต่อ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากค่าความแข็งของโลหะผสม Ti-12.5Mo นั้นมีความแข็งสูงถึง 397 วิกเกอร์ ทำให้การขึ้นรูปเย็นทำได้ยาก



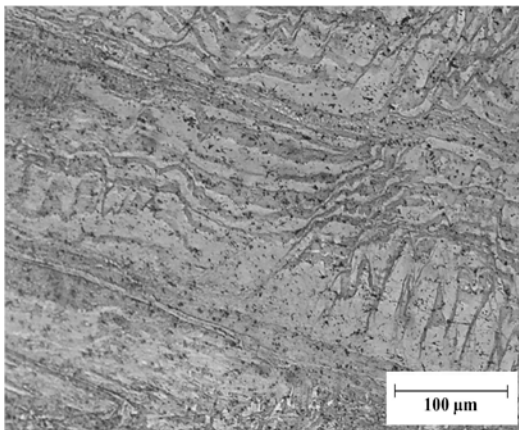
รูปที่ 4.11 ลักษณะการแตกของอินกอต Ti-12.5Mo ระหว่างรีดเย็น

ส่วนโลหะผสม Ti-12.5Mo-5Nb, Ti-12.5Mo-10Nb, Ti-12.5Mo-15Nb และ Ti-12.5Mo-20Nb สามารถรีดเย็นลดขนาดได้โดยไม่แตก จากความหนาเริ่มต้น 11 มิลลิเมตร สามารถรีดลดขนาดเป็นแผ่นได้ความหนาประมาณ 1 มิลลิเมตร จำนวนเป็นปริมาณการลดความหนาได้ประมาณร้อยละ 91 ตัวอย่างลักษณะชิ้นงานรีดที่สามารถรีดเย็นได้ของโลหะผสม Ti-12.5Mo-5Nb แสดงดังรูปที่ 4.12

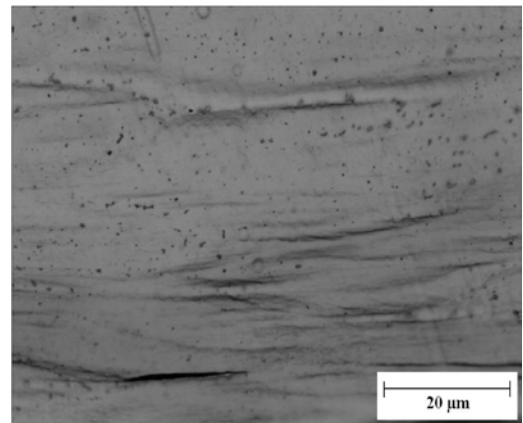


รูปที่ 4.12 ลักษณะชิ้นงานหลังผ่านการรีดเย็นของอินกอต Ti-12.5Mo-5Nb

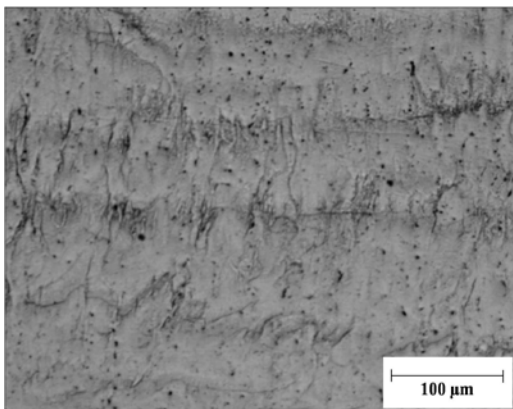
โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการรีดเย็นจากกล้องจุลทรรศน์แสงใช้เลนส์วัตถุกำลังขยาย 20 เท่า ถ่ายรูปโครงสร้างของงานรีดโลหะผสม Ti-12.5Mo-5Nb และ Ti-12.5Mo-20Nb ผิวด้านบนและในทิศทางตามแนวรีด (Longitudinal Cross Section) แสดงดังรูปที่ 4.13 (ก)-(ง) ตามลำดับ พบว่าลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานรีดมีลักษณะเป็นเกรนยาวรีตามแนวรีดคล้ายกันทั้งสองส่วนผสม ส่วนผลการศึกษาความแข็งของชิ้นงานหล่อและชิ้นงานที่ผ่านการรีดเย็นลดขนาดความหนาร้อยละ 91 แสดงในรูปที่ 4.14 พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการรีดเย็นมีความแข็งสูงกว่าชิ้นงานหล่อ ซึ่งค่าความแข็งที่เพิ่มขึ้นสามารถอธิบายได้ด้วยกลไกการเพิ่มความแข็งแรงจากการเกิด Work Hardening กล่าวคือในการรีดเย็นมีผลทำให้เกิดดิสโลเคชันเพิ่มมากขึ้น และทำหน้าที่ขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันกันเอง ส่งผลให้ค่าความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้น [26] ค่าความแข็งเฉลี่ยของงานรีดเย็นโลหะผสม Ti-12.5Mo-5Nb, Ti-12.5Mo-10Nb, Ti-12.5Mo-15Nb และ Ti-12.5Mo-20Nb มีค่า 436, 413, 391 และ 389 วิกเกอร์ ตามลำดับ



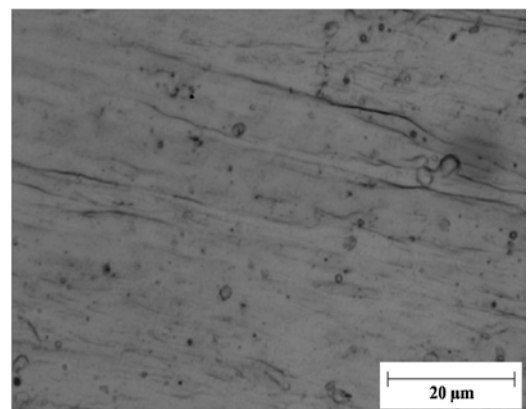
(ก)



(ข)

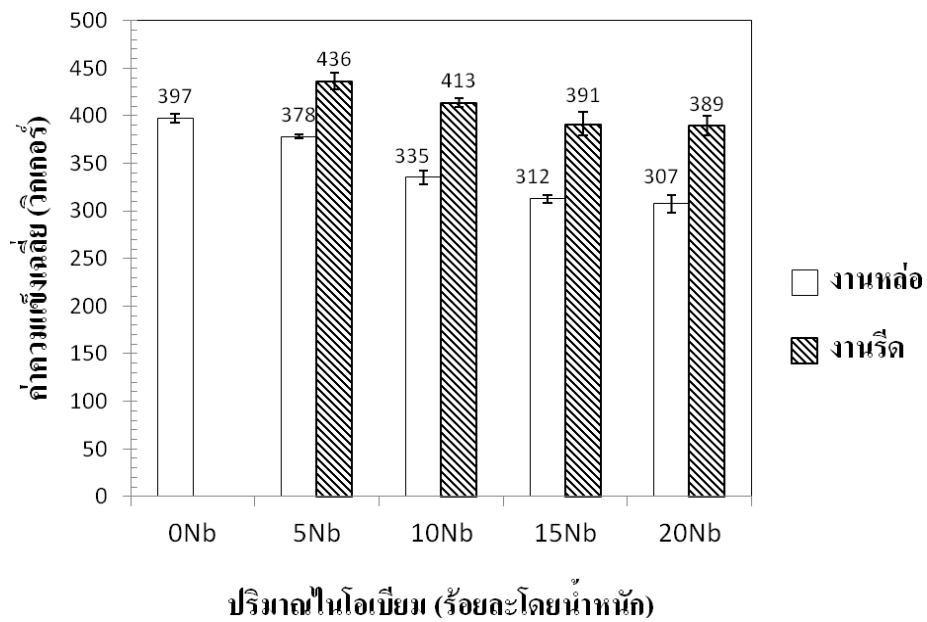


(ค)



(ง)

รูปที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาคของงานรีดเย็นของ Ti-12.5Mo-5Nb (ก) ด้านบน (ข) ด้านตัดขวาง และ Ti-12.5Mo-20Nb (ค) ด้านบน (ง) ด้านตัดขวาง



รูปที่ 4.14 ความแข็งแรงขึ้นงานรีดเย็นและอินกอต Ti-12.5Mo-nNb (เมื่อ $n = 0, 5, 10, 15$ และ 20)

4.3 สมบัติทางกลของโลหะผสมหลังผ่านการรีดเย็น

ผลการทดสอบแรงดึงของโลหะผสม Ti-12.5Mo-nNb (เมื่อ $n = 5, 10, 15$ และ 20) ที่ผ่านการรีดเย็น ร้อยละ 91 ได้ความหนาสุดท้ายประมาณ 1 มิลลิเมตร นำมาเตรียมเป็นชิ้นงานทดสอบแรงดึง โดยใช้วิธี ปั้นตัดด้วย 펀ช์ ผลการทดสอบพบว่าชิ้นงานเมื่อทำการทดสอบแล้วมีการยืดตัวออกที่เล็กน้อย จนกระทั่งชิ้นงานขาดออกจากกัน ลักษณะชิ้นงานที่ผ่านการดึง จนขาดออกจากกันของโลหะผสม Ti-12.5Mo-5Nb แสดงดังรูปที่ 4.15 และผลการทดสอบสมบัติทางกลของโลหะผสม ชิ้นงานรีดเย็นแสดง ดังตารางที่ 4.7



รูปที่ 4.15 ลักษณะชิ้นงานรีดเย็นของโลหะผสม Ti-12.5Mo-5Nb หลังผ่านการทดสอบแรงดึง

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบสมบัติทางกลของโลหะผสม Ti-12.5Mo-nNb หลังผ่านการรีดเย็น

โลหะผสม	ความต้านแรงดึงสูงสุด (เมกะพาสคัล)	มอดูลัส (จิกะพาสคัล)	ความแข็ง (วิกเกอร์)	การยืดตัว (ร้อยละ)
Ti-12.5Mo-5Nb	1,346	88	436	9
Ti-12.5Mo-10Nb	1,249	103	413	8
Ti-12.5Mo-15Nb	979	107	391	8
Ti-12.5Mo-20Nb	954	102	389	7

สมบัติทางกลของโลหะผสม Ti-12.5Mo-nNb (n=5, 10, 15 และ 20) หลังผ่านการรีดเย็นแล้วนำไปทดสอบแรงดึง พบว่าการเติมไนโอเบียมร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีผลทำให้ค่าความต้านแรงดึงสูงสุด มีค่าสูงที่สุดคือ 1,346 เมกะพาสคัล และมีแนวโน้มลดลงเมื่อเติมไนโอเบียมเป็นร้อยละ 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก ซึ่งค่าความต้านแรงดึงสูงสุดมีค่า 1,249, 979 และ 954 เมกะพาสคัล ตามลำดับ ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Xu และคณะ [7] ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของไนโอเบียมที่มีผลต่อโครงสร้างและสมบัติทางกลของไทเทเนียมผสม Ti-10Mo-nNb (n=3, 7 และ 9) และจัดเป็นไทเทเนียมผสมเฟสบีตา พบว่าค่าความต้านแรงดึงสูงสุดมีค่าลดลงเมื่อปริมาณไนโอเบียมเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Grabiell และคณะ [27] พบว่าการเติมไนโอเบียมในโลหะไทเทเนียมผสมเฟสบีตา มีผลทำให้ค่าความต้านแรงดึงสูงสุดมีค่าลดลง เช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าการเติมไนโอเบียมลงในโลหะผสมเฟสบีตาส่งผลให้ค่าความต้านแรงดึงลดลง

สำหรับค่ามอดูลัสของโลหะผสม Ti-12.5Mo-nNb (n=5, 10, 15 และ 20) ที่ได้จากการทดลองนี้พบว่าโลหะผสม Ti-12.5Mo-5Nb มีค่ามอดูลัสต่ำสุด 88 จิกะพาสคัล ส่วนโลหะไทเทเนียม Ti-12.5Mo-15Nb มีค่ามอดูลัสสูงสุดเป็น 107 จิกะพาสคัล จากการทดลองค่ามอดูลัส ที่ได้มีค่าไม่แน่นอนไม่มีทิศทางเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามปริมาณของไนโอเบียมที่ชัดเจน ทั้งนี้กลไกการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของค่ามอดูลัสยังไม่มีการอธิบายไว้อย่างชัดเจน ค่ามอดูลัสขึ้นกับพันธะระหว่างอะตอมของโลหะหรือโลหะผสม อย่างไรก็ตามการเติมธาตุที่เพิ่มเสถียรภาพของเฟสบีตา ซึ่งธาตุดังกล่าวจะเข้าไปปรับกวนแรงระหว่างพันธะในโครงสร้างผลึกส่งผลให้ค่ามอดูลัสมีค่าน้อยกว่าการเติมธาตุผสมที่เพิ่มความเสถียรให้กับเฟสแอลฟา [10] จากงานวิจัยของ Song และคณะ [28] ศึกษาทางทฤษฎีเกี่ยวกับอิทธิพลของธาตุผสมที่มีผลต่อความแข็งแรงและค่ามอดูลัสของไทเทเนียมผสมเฟสบีตา โดยการคำนวณโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Structure) โดยวิธี Discrete Variational Cluster Method (DVM) รายงานผลการคำนวณว่า การเติมไนโอเบียม โมลิบดีนัม วานาเดียม และแทนทาลัม ในโลหะไทเทเนียมผสมมี

ผลทำให้ความแข็งแรงสูงและมอดูลัสลดลง ในส่วนของร้อยละการยึดตัวของโลหะผสม Ti-12.5Mo-nNb (n=5, 10, 15 และ 20) มีค่าไม่แตกต่างกันมากนักมีค่าร้อยละ 9, 8, 9 และ 7 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

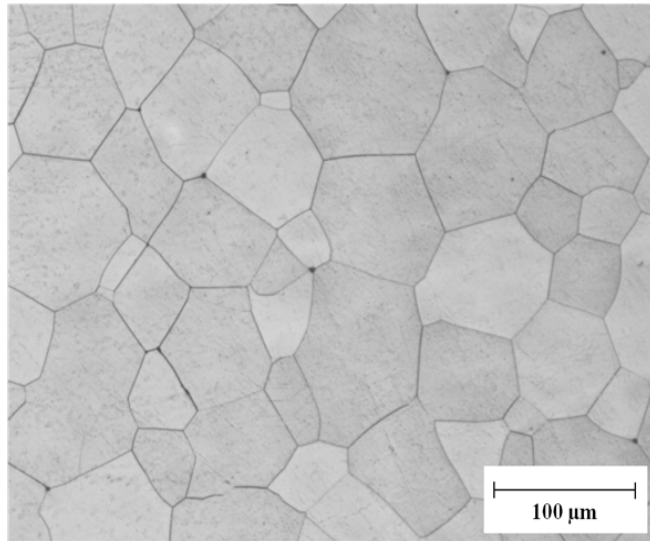
4.4 การทำกรรมวิธีทางความร้อนโลหะผสม Ti-12.5Mo-5Nb

ในการทดลองเพื่อศึกษากรรมวิธีทางความร้อนของโลหะผสม ได้นำอินกอตไปแปรรูป เนื่องจากอินกอตมีขนาดที่ไม่สามารถนำไปทดสอบสมบัติทางกลได้ จึงนำไปรีดเพื่อให้ความหนาลดลงและมีความยาวเพิ่มขึ้น จากนั้นนำไปป้อนตัดให้มีขนาดตามมาตรฐานที่ใช้ทดสอบแรงดึง คำนวณปริมาณการแปรรูปเย็นได้ประมาณร้อยละ 91 การทำกรรมวิธีทางความร้อนทำได้โดยนำชิ้นงานไปอบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นจุ่มน้ำที่แช่น้ำแข็งอุณหภูมิประมาณ 0 องศาเซลเซียสทันที จากนั้นนำชิ้นงานไปอบบ่มต่อทันที ใช้อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลาแตกต่างกันดังนี้ 2, 4, 6 และ 8 ชั่วโมง แล้วนำชิ้นงานทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างจุลภาค โครงสร้างผลึก และสมบัติทางกล ซึ่งจะบรรยายในลำดับต่อไป

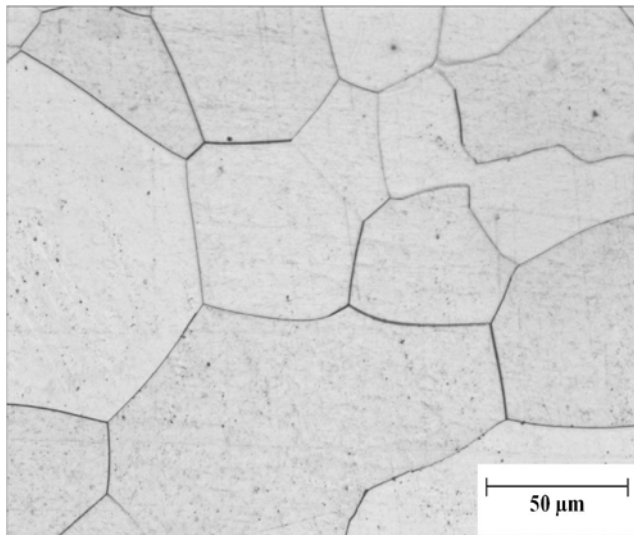
4.4.1 โครงสร้างจุลภาคโลหะผสม Ti-12.5Mo-5Nb หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน

โครงสร้างจุลภาคถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงของชิ้นงานโลหะผสม Ti-12.5Mo-5Nb ที่ผ่านการอบละลายเฟสด้วยอุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส แล้วจุ่มน้ำเย็นทันที แสดงดังรูปที่ 4.16 พบว่าโครงสร้างเป็นเฟสเดี่ยว เกรนมีลักษณะเป็น Equiaxed Grains ไม่พบลักษณะโครงสร้างที่เป็นเกรนยาวรีที่เกิดจากการรีดเหลืออยู่ ทั้งนี้เนื่องจากในการอบที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นการทำให้เกิดผลึกใหม่ (Recrystallization) และโลหะผสม Ti-12.5Mo-5Nb จัดเป็นไทเทเนียมผสมกลุ่มบีตา ดังนั้นหลังการอบละลายเฟสแล้วทำการเย็นตัวอย่างรวดเร็วจึงไม่เกิดเฟสมาร์เทนไซต์หรือเฟสแอลฟาซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Weiss และ Semiatin [29] ศึกษาเกี่ยวกับไทเทเนียมผสมกลุ่มบีตา Ti-15Mo พบว่าเมื่อทำการอบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงกว่า Beta Transus Temperature แล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วจะไม่เกิดเฟสของมาร์เทนไซต์ขึ้น

โครงสร้างจุลภาคถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงของโลหะผสม Ti-12.5Mo-5Nb หลังผ่านการอบบ่มที่ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2, 4, 6 และ 8 ชั่วโมง แสดงในรูปที่ 4.17-4.20 ตามลำดับ หลังการอบบ่มพบว่าการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคที่ต่างกันขึ้นกับเวลาที่ใช้ในการอบบ่ม การอบบ่มด้วยเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง ได้โครงสร้างที่คล้ายกัน โครงสร้างยังคงเป็นลักษณะของ Equiaxed Grains แต่ที่ขอบเกรนเกิดเฟสบางอย่างขึ้นมองเห็นเป็นแถบสีดำทำให้บริเวณขอบเกรนหนาขึ้น

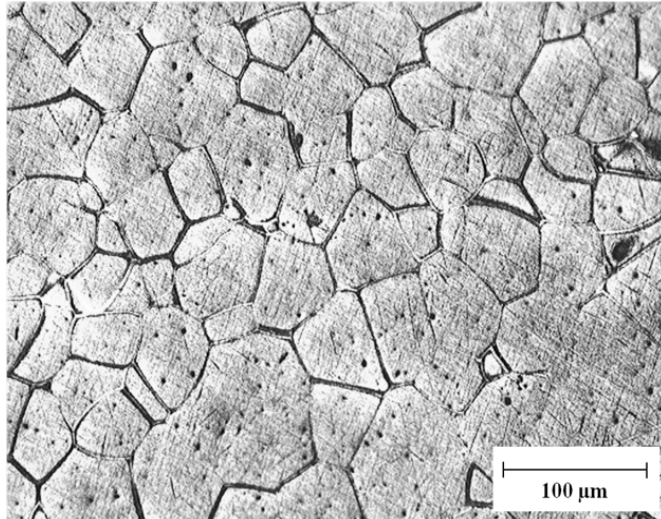


(ก)

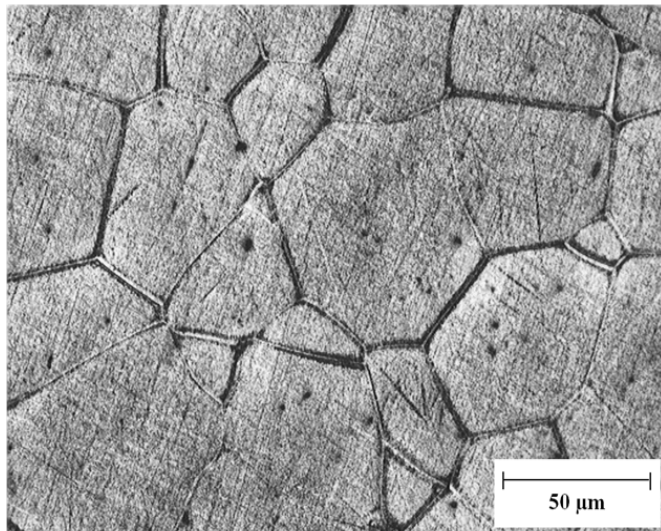


(ข)

รูปที่ 4.16 โครงสร้างจุลภาคถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงของโลหะผสม Ti-12.5Mo-5Nb หลังการอบละลายเฟส ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงแล้วจุ่มด้วยน้ำเย็น เหนือวัตุกำลังขยาย (ก) 10 เท่า (ข) 20 เท่า

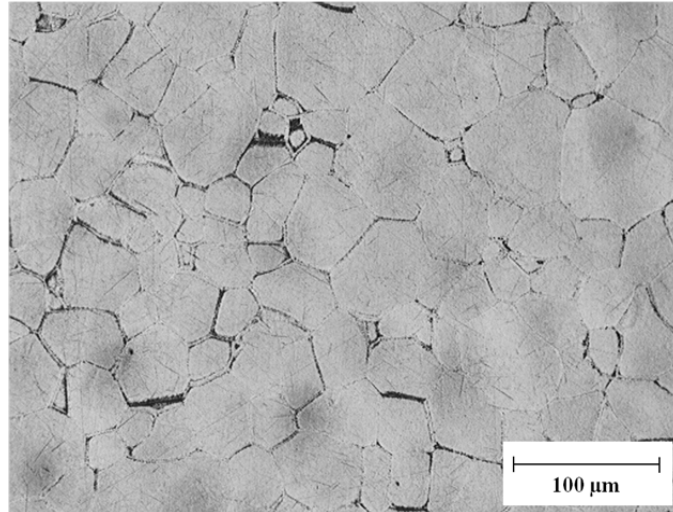


(ก)

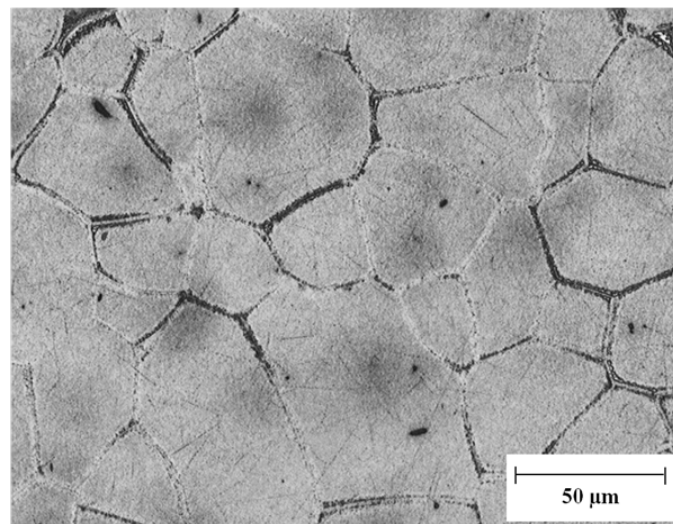


(ข)

รูปที่ 4.17 โครงสร้างจุลภาคถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงของโลหะผสม Ti-12.5Mo-5Nb หลังการอบบ่ม ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงแล้วจุ่มด้วยน้ำเย็น เลนส์วัตถุกำลังขยาย (ก) 10 เท่า (ข) 20 เท่า

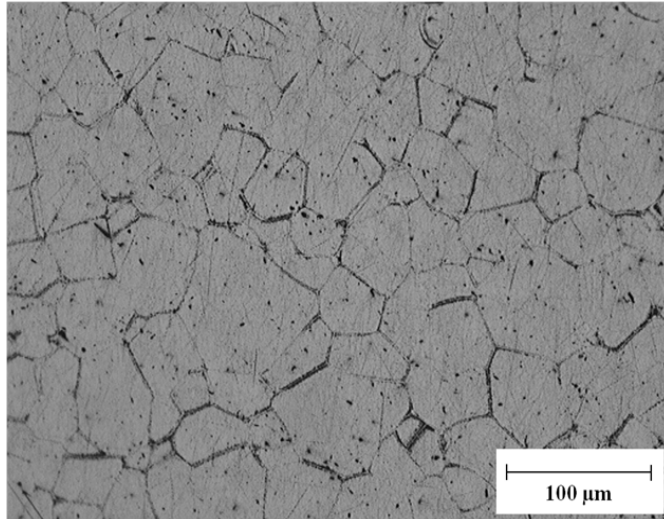


(ก)

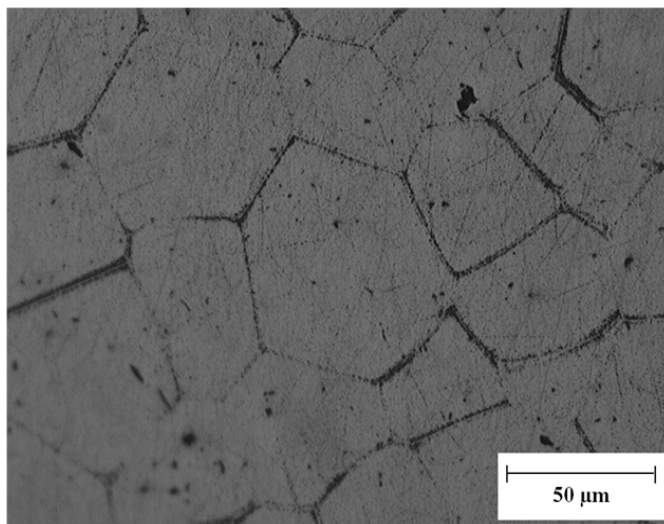


(ข)

รูปที่ 4.18 โครงสร้างจุลภาคถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงของโลหะผสม Ti-12.5Mo-5Nb หลังการอบบ่ม ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมงแล้วจุ่มด้วยน้ำเย็น เกล็ดสีวัดดูกำลังขยาย (ก) 10 เท่า (ข) 20 เท่า



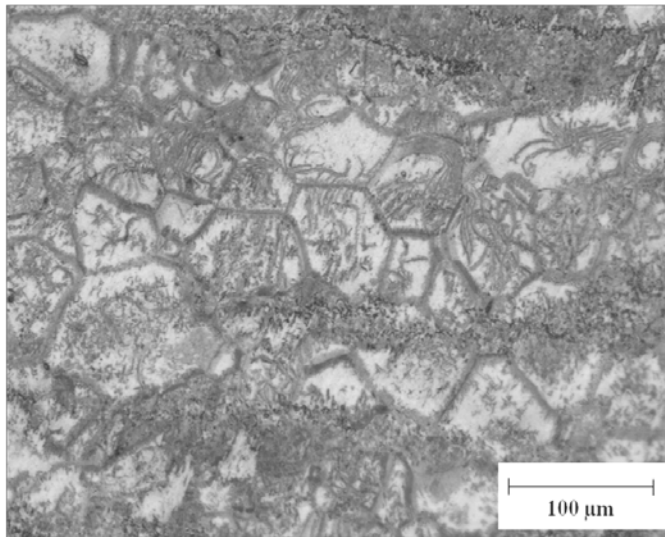
(ก)



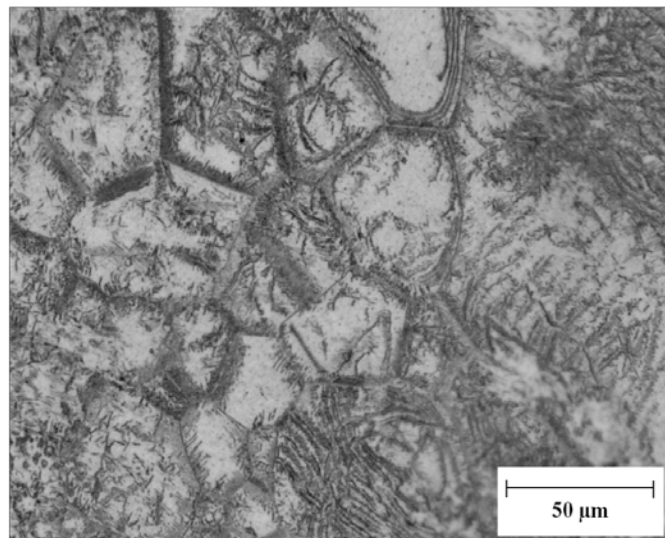
(ข)

รูปที่ 4.19 โครงสร้างจุลภาคถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงของโลหะผสม Ti-12.5Mo-5Nb หลังการอบบ่ม ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมงแล้วจุ่มด้วยน้ำเย็น เกล็ดวัสดุกำลังขยาย (ก) 10 เท่า (ข) 20 เท่า

โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม Ti-12.5Mo-5Nb หลังการอบบ่มที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง เกิดเฟสสีดำที่ขอบเกรนชัดเจนขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Guo และ Enomoto [30] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการตกผลึกของเฟสแอลฟาในไทเทเนียมผสมโมลิบดีนัมหลังการอบบ่ม 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง พบว่านิวเคลียสของเฟสแอลฟาจะเริ่มเกิดขึ้นบริเวณขอบเกรนของเฟสบีตาซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นปลายแหลมเล็กพุ่งออกจากบริเวณของขอบเกรนเรียงซ้อนกันและต่อเนื่องเข้าไปยังบริเวณภายในเกรนอีกด้วย



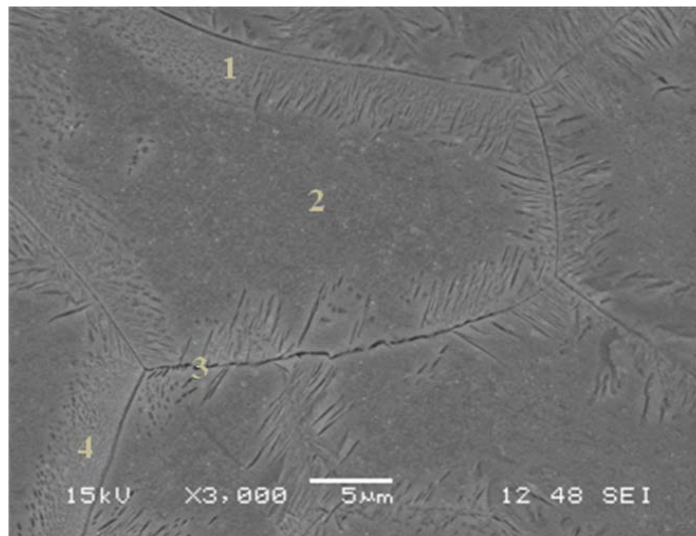
(ก)



(ข)

รูปที่ 4.20 โครงสร้างจุลภาคถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงของโลหะผสม Ti-12.5Mo-5Nb หลังการอบบ่ม ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 8 ชั่วโมงแล้วจุ่มในน้ำเย็น เสนอด้วยตัวคูณขยาย (ก) 10 เท่า (ข) 20 เท่า

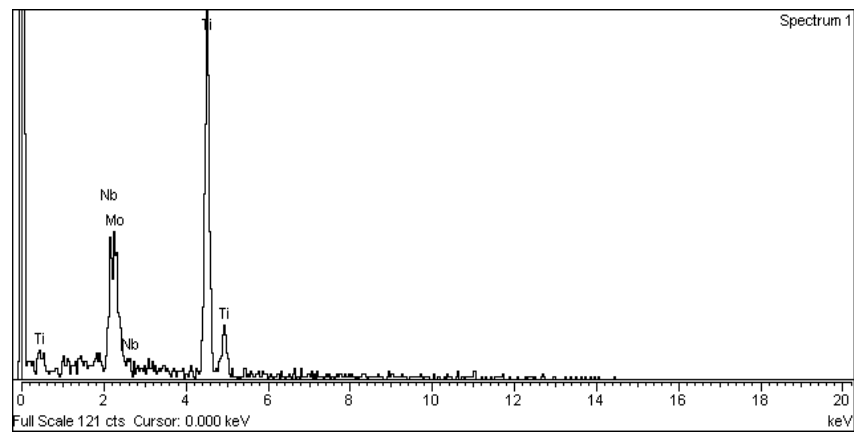
เพื่อต้องการศึกษาโครงสร้างจุลภาคบริเวณขอบเกรนจึงได้นำชิ้นงานที่อบบ่ม 8 ชั่วโมงไปศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด กำลังขยาย 3,000 เท่า แสดงในรูปที่ 4.21 เฟสที่เกิดขึ้นบริเวณขอบเกรนมีลักษณะเป็นรูปเข็มพุ่งออกจากขอบเกรนทั้งสองด้านเข้าไปในเกรน นอกจากนี้ยังพบเฟสลักษณะเดียวกันนี้ในเกรนอีกด้วย ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีโดยเทคนิค EDS ของโลหะผสม Ti-12.5Mo-5Nb หลังอบบ่ม 8 ชั่วโมง แสดงในตารางที่ 4.8 และรูปสเปกตรัมจากการยิง EDS แสดงในรูปที่ 4.22 ผลการวิเคราะห์ธาตุทั้ง 4 ตำแหน่ง พบว่าปริมาณธาตุผสมแตกต่างกัน บริเวณตำแหน่งที่ 1 และตำแหน่งที่ 4 เป็นบริเวณข้างขอบเกรน ตำแหน่งที่ 2 เป็นบริเวณกลางเกรน ส่วนตำแหน่งที่ 3 เป็นบริเวณขอบเกรน จะเห็นว่าเมื่อพิจารณาปริมาณธาตุของทั้ง 4 ตำแหน่งที่ทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุมีค่าต่างกันเนื่องจากบริเวณที่สังเกตเห็นว่ามีการตกผลึกของเฟสเกิดขึ้นมีลักษณะเป็นแผ่นบาง ส่วนผสมทั้ง 4 ตำแหน่ง จัดเป็นส่วนผสมของเฟสบีตา ดังนั้นการใช้ EDS วิเคราะห์เฟสของชิ้นงานนี้จึงไม่สามารถระบุได้ว่าเกิดเฟสแอลฟา



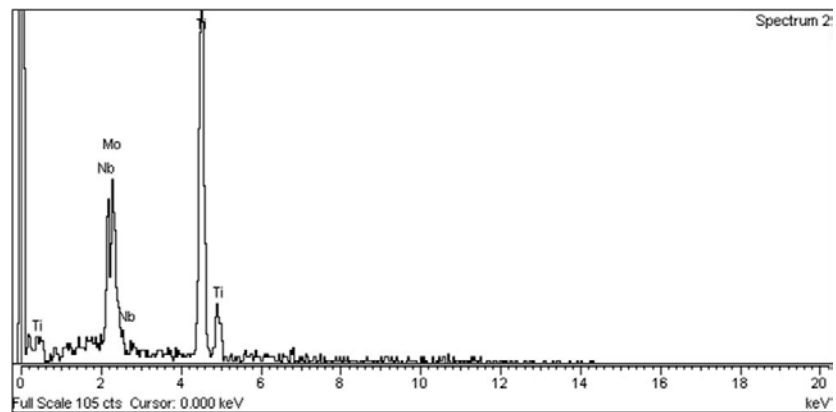
รูปที่ 4.21 โครงสร้างจุลภาคถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดกำลังขยาย 3,000 เท่า ของโลหะผสม Ti-12.5Mo-5Nb หลังการอบบ่มที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.8 ผลวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS ของอินกอตโลหะผสมไทเทเนียมผสม Ti-12.5Mo-5Nb หลังอบบ่มเป็นเวลา 8 ชั่วโมง

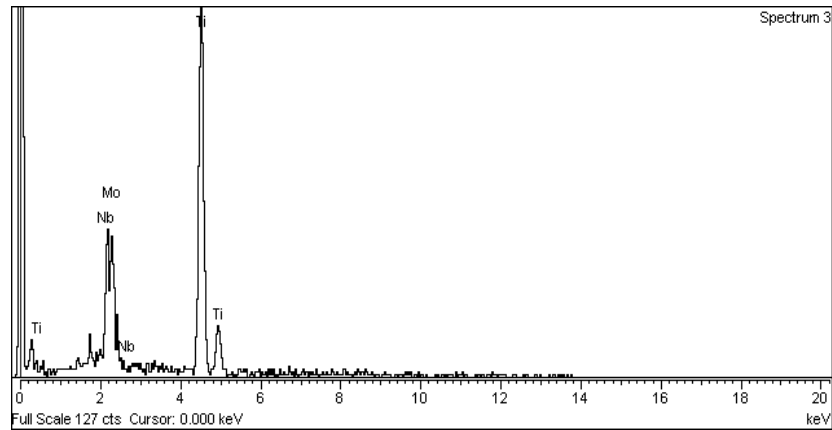
ตำแหน่งที่วิเคราะห์	ปริมาณธาตุที่พบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	ไทเทเนียม	โมลิบดีนัม	ไนโอเบียม
ตำแหน่งที่ 1 ข้างขอบเกรน	83.52	10.80	5.68
ตำแหน่งที่ 2 กลางเกรน	82.20	12.87	4.93
ตำแหน่งที่ 3 ขอบเกรน	83.17	12.45	4.38
ตำแหน่งที่ 4 ข้างขอบเกรน	84.92	10.35	4.73



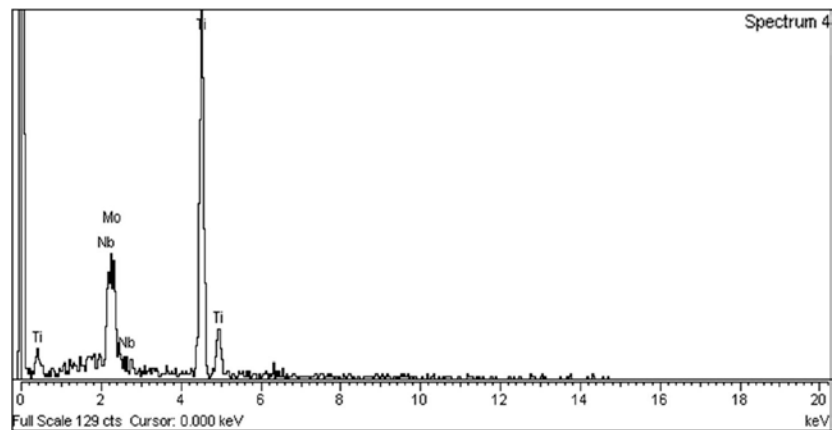
(ก)



(ข)



(ค)



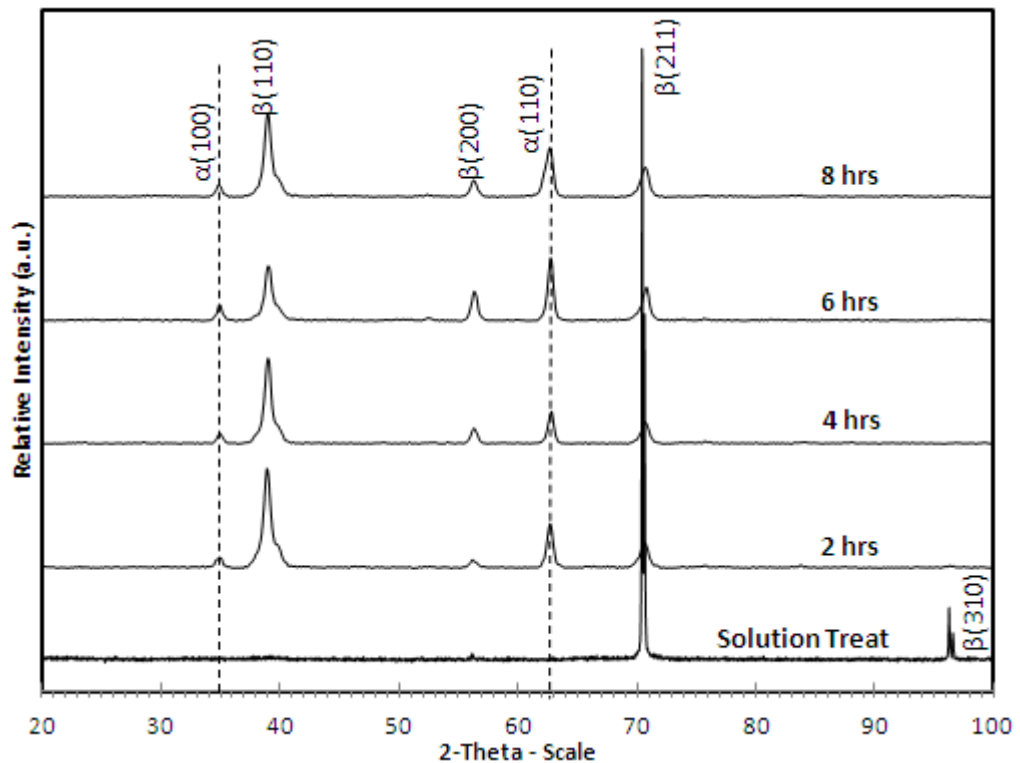
(ง)

รูปที่ 4.22 สเปกตรัมของโลหะผสม Ti-12.5Mo-5Nb หลังผ่านการอบบ่มที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง (ก) ตำแหน่งที่ 1 บริเวณใกล้ขอบเกรน (ข) ตำแหน่งที่ 2 บริเวณเฟสพื้น (ค) ตำแหน่งที่ 3 บริเวณขอบเกรน และ (ง) ตำแหน่งที่ 4 บริเวณขอบเกรน

4.4.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกหลังอบบ่มโลหะผสม Ti-12.5Mo-5Nb

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของโลหะผสม Ti-12.5Mo-5Nb หลังอบละลายเฟสและหลังอบบ่มที่เวลา 2, 4, 6 และ 8 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ได้รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ดังรูปที่ 4.23 พบว่าชิ้นงานโลหะผสม Ti-12.5Mo-5Nb หลังอบละลายเฟสมีโครงสร้างผลึกแบบ BCC เพียงโครงสร้างเดียว ทั้งนี้เนื่องจากในส่วนผสมมีปริมาณโมลิบดีนัม และไนโอเบียม ซึ่งจัดเป็นธาตุผสมที่

ช่วยเพิ่มเสถียรภาพให้กับเฟสบีตาในปริมาณที่มากพอที่จะทำให้โครงสร้างผลึกเปลี่ยนจาก HCP ไปเป็น BCC ที่อุณหภูมิห้องได้ ซึ่งเป็นการยืนยันว่า โลหะผสม Ti-12.5Mo-5Nb หลังการอบละลายเฟสแล้วทำการเย็นตัวอย่างรวดเร็วแล้วไม่เกิดเฟสมาร์เทนไซต์หรือเฟสแอลฟา ส่วนชิ้นงานหลังการอบบ่มพบว่ามีการเกิดโครงสร้างผลึกแบบ HCP และ BCC ซึ่ง HCP เป็นโครงสร้างผลึกของเฟสแอลฟาเกิดขึ้นในทุกช่วงเวลาที่อบบ่ม 2-8 ชั่วโมง ซึ่งผลการทดสอบนี้เป็นการยืนยันว่าเฟสที่เกิดขึ้นหลังการอบบ่มเป็นเฟสแอลฟา



รูปที่ 4.23 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในโลหะผสม Ti-12.5Mo-5Nb หลังผ่านการอบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมงและ อบบ่มที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เวลา 2-8 ชั่วโมง

4.4.3 สมบัติทางกลของโลหะผสม Ti-12.5Mo-5Nb หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน

ผลการทดสอบสมบัติทางกลของโลหะผสม Ti-12.5Mo-5Nb แสดงดังตารางที่ 4.9 ผลการวัดความแข็งของโลหะผสม Ti-12.5Mo-5Nb หลังการอบละลายเฟสแล้วจุ่มน้ำเย็นทันทีพบว่ามีความแข็งเฉลี่ย

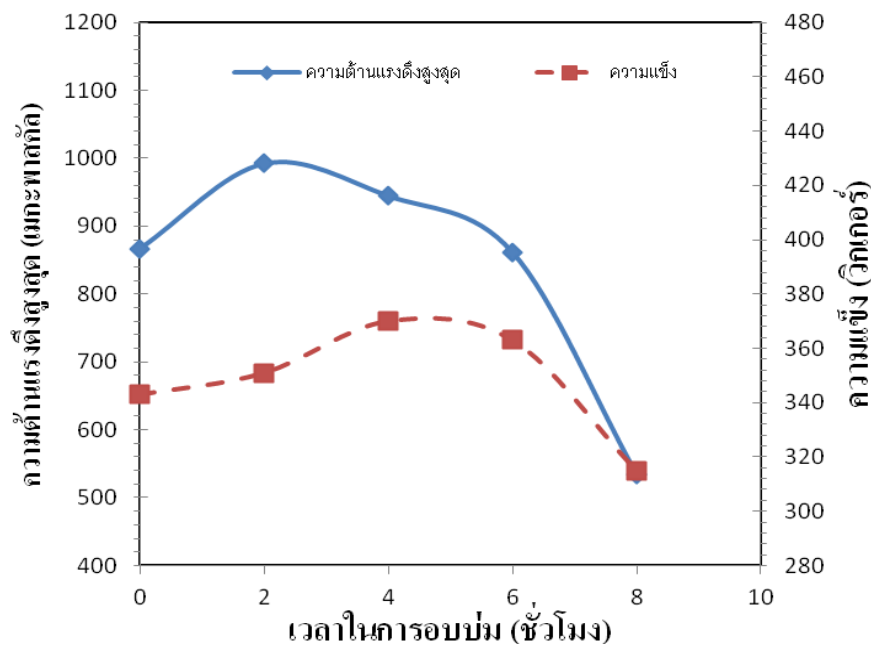
343 วิกเกอร์ หลังจากนั้นก็นำไปอบบ่มที่เวลาต่างกัน 2-8 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความแข็งมีค่าแตกต่างกันไปขึ้นกับเวลาที่ใช้ในการอบบ่ม การอบบ่มชิ้นงานด้วยเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง ค่าความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็น 351, 370 และ 363 วิกเกอร์ ตามลำดับ แต่เมื่อใช้เวลาอบบ่ม 8 ชั่วโมง ความแข็งมีค่าลดลง จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคพบว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการอบบ่มจะทำให้เฟสแอลฟาที่เกิดขึ้นมีความหยาบและมีขนาดใหญ่ขึ้น ความแข็งของชิ้นงานหลังอบด้วยเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากลักษณะการขยายตัวของเฟสแอลฟาทำให้มีขนาดเหมาะสมที่จะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน แต่เมื่อทำการอบบ่มที่เวลา 8 ชั่วโมง ค่าความแข็งมีค่าลดลงอีกครั้งเนื่องมาจากขนาด ของเฟสแอลฟามีการขยายตัวใหญ่ขึ้นมากและกระจายตัวทั่วทั้งเฟสพื้นและตามขอบเกรนซึ่งทำให้สูญเสียความต้านทานการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน ดังนั้นจึงส่งผลให้ความแข็งมีค่าลดลง

ตารางที่ 4.9 สมบัติทางกลของ Ti-12.5Mo-5Nb หลังการอบบ่มในช่วงเวลา 2-8 ชั่วโมง

เวลาในการอบบ่ม (ชั่วโมง)	ความแข็ง (วิกเกอร์)	ความต้านแรงดึงสูงสุด (เมกะพาสคัล)	มอดูลัส (จิกะพาสคัล)	การยืดตัว (ร้อยละ)
0	343	867	72	5
2	351	993	87	6
4	370	945	60	6
6	363	862	71	4
8	315	534	71	3

เพื่อดูแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงความต้านแรงดึงสูงสุดและความแข็งของโลหะผสม Ti-12.5Mo-5Nb หลังผ่านการอบละลายเฟสและอบบ่มที่เวลาแตกต่างกันแสดงเป็นกราฟดังรูปที่ 4.24 พบว่าชิ้นงานโลหะผสมที่ผ่านการอบละลายเฟส มีค่าความต้านแรงดึงสูงสุด 867 เมกะพาสคัล เมื่อทำการอบบ่มเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ค่าความต้านแรงดึงสูงสุด มีค่าสูงขึ้นเท่ากับ 993 เมกะพาสคัล แต่เมื่ออบบ่มที่เวลาเพิ่มขึ้นเป็น 4, 6 และ 8 ชั่วโมง ค่าความต้านแรงดึงสูงสุดมีแนวโน้มลดต่ำลงเป็น 945, 862 และ 534 เมกะพาสคัล ตามลำดับ ซึ่งการอบบ่มเวลา 2 ชั่วโมงมีค่าความต้านแรงดึงสูงสุด มีค่าสูงที่สุด ทั้งนี้เนื่องมาจากขนาดของอนุภาคเฟสแอลฟา ที่ตกผลึกขยายตัวขึ้นอย่างเหมาะสม ทำให้มีผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคมากพอที่ทำให้ดิสโลเคชันเคลื่อนที่ได้ยากขึ้นส่งผลให้ความต้านแรงดึงที่จุดสูงสุด แต่เมื่อทำการอบบ่มด้วยเวลามากขึ้นเป็น 4, 6 และ 8 ชั่วโมง จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคเห็นได้ว่า

ลักษณะโครงสร้างมีปริมาณของอนุภาคกระจายตัวเพิ่มขึ้นจึง ส่งผล ให้ความสัมพันธ์เชิงโครงสร้าง (Coherency) ระหว่างเฟสที่ตกผลึกและโครงสร้างพื้นลดลงทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดมี แนวโน้มลดลง สำหรับในส่วนของค่ามอดูลัสจะมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 87 จิกะพาสคัล เมื่ออบบ่มเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 60 จิกะพาสคัล เมื่ออบบ่มเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ในส่วนของร้อยละ การยืดตัวพบว่าชิ้นงานหลังอบบ่มเวลา 2 และ 4 ชั่วโมง มีค่าสูงสุดที่ร้อยละ 6 และมีค่าต่ำสุดที่ร้อยละ 3 หลังอบบ่มที่เวลา 8 ชั่วโมง



รูปที่ 4.24 สมบัติทางกลของ โลหะผสม Ti-12.5Mo-5Nb หลังการอบบ่มที่เวลา 2-8 ชั่วโมง

4.5 การทำกรรมวิธีทางความร้อนโลหะผสม Ti-12.5Mo-20Nb

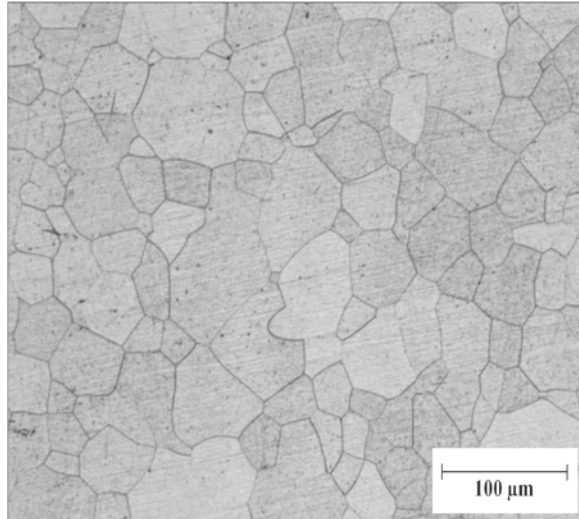
4.5.1 โครงสร้างจุลภาคโลหะผสม Ti-12.5Mo-20Nb หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน

โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม Ti-12.5Mo-20Nb หลังผ่านการรีดเย็นปริมาณร้อยละ 91 จากนั้นนำ ชิ้นงานไปอบละลายเฟสที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วจุ่มน้ำเย็นทันที แล้วนำ ชิ้นงานมาศึกษาโครงสร้างจุลภาค พบว่าโครงสร้างของชิ้นงานหลังเย็นตัวเป็นเฟสเดี่ยวและ โครงสร้างจุลภาคมีลักษณะเป็น Equiaxed Grains ไม่พบว่ามีเฟสชนิดอื่นเกิดขึ้นเนื่องจากโลหะผสม Ti-12.5Mo-20Nb จัดเป็นไทเทเนียมผสมกลุ่มบีตา โครงสร้างจุลภาคถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงของ

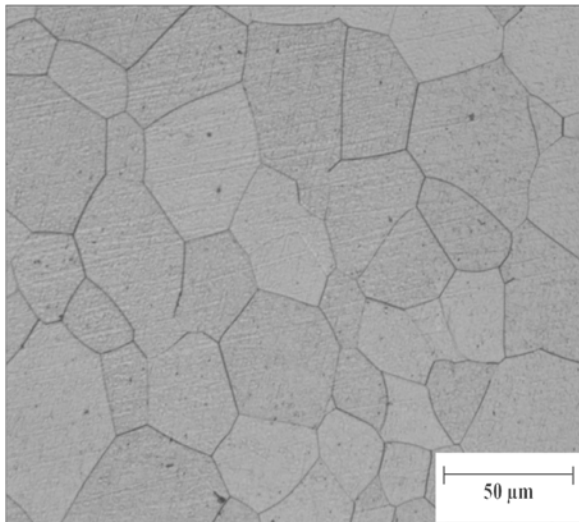
โลหะผสม Ti-12.5Mo-20Nb หลังผ่านการอบละลายเฟส แสดงดังรูปที่ 4.25 จากนั้นนำชิ้นงานหลังผ่านการอบละลายเฟสไปอบบ่มที่เวลาแตกต่างกันคือ 2, 4, 6 และ 8 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

เพื่อศึกษาอิทธิพลของเวลาที่ใช้ในการอบบ่มที่มีผลต่อโครงสร้างและสมบัติทางกลของโลหะผสม Ti-12.5-20Nb พบว่าโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม Ti-12.5Mo-20Nb หลังผ่านการอบบ่มที่เวลา 2 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 4.26 พบว่าโครงสร้างที่ได้มีลักษณะเป็น Equiaxed Grains มองเห็นขอบเกรนมีลักษณะหนาและชัดเจนมากขึ้นกว่าโครงสร้างที่ได้จากการอบละลายเฟส ลักษณะของเกรนมีรูปร่างและขนาดไม่สม่ำเสมอกระจายขนาดเล็กและขนาดใหญ่สลับกันทั่วทั้งชิ้นงาน สังเกตเห็นว่าที่ขอบเกรนที่มีลักษณะหนาขึ้นตามแนวขอบเกรนของบีตาแต่เกิดขึ้นบางเกรนเท่านั้น ซึ่งลักษณะของขอบเกรนที่หนาขึ้นดังกล่าวสันนิษฐานได้ว่าเป็นการเริ่มเกิดเฟสแอลฟาขึ้นในโลหะผสม โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม Ti-12.5Mo-20Nb

หลังอบบ่มที่เวลา 4 และ 6 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 4.27-4.28 พบว่าโครงสร้างหลักเป็นเฟสบีตาและมีอนุภาคเกิดขึ้นที่บริเวณขอบเกรน มีปริมาณเพิ่มขึ้นกระจายอยู่ทั่วไปทั้งขอบเกรนและภายในเกรน อนุภาคที่เกิดขึ้นดังกล่าวอาจเป็นอนุภาคของเฟสแอลฟา ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Banerjee และ Naik [31] พบว่าเฟสแอลฟาของโลหะผสม Ti-15Mo จะเกิดขึ้นเมื่อทำการอบบ่มที่อุณหภูมิ 602 องศาเซลเซียส และจากงานวิจัยของ Nag และคณะ [32] รายงานว่าโลหะผสม Ti-15Mo หลังการอบบ่มที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส จะมีเฟสแอลฟากระจายตัวทั้งในเกรนและขอบเกรน ซึ่งเฟสแอลฟาจะมีลักษณะเป็นแถบซ้อนกันอยู่บนพื้นของเฟสบีตา ส่วนโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานโลหะผสม Ti-12.5Mo-20Nb หลังอบบ่มเป็นเวลา 8 ชั่วโมง แสดงในรูปที่ 4.29 พบว่ามีปริมาณของอนุภาคกระจายตัวหนาขึ้นทั่วทั้งขอบเกรนและภายในเกรนมี ลักษณะเป็นรูปเข็มพุ่งออกจากขอบเกรนหนาขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับหลังอบบ่มที่เวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง อย่างชัดเจน

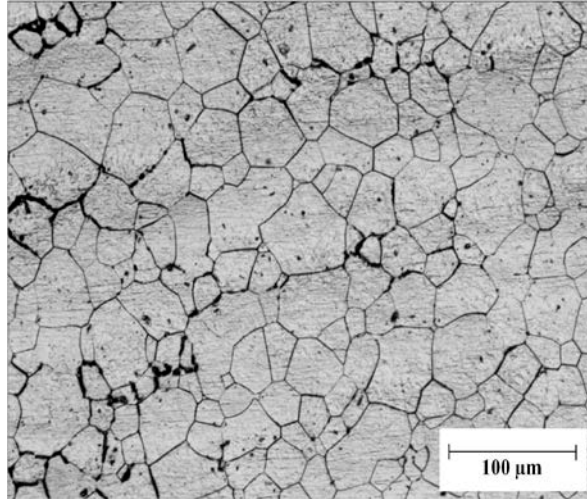


(ก)

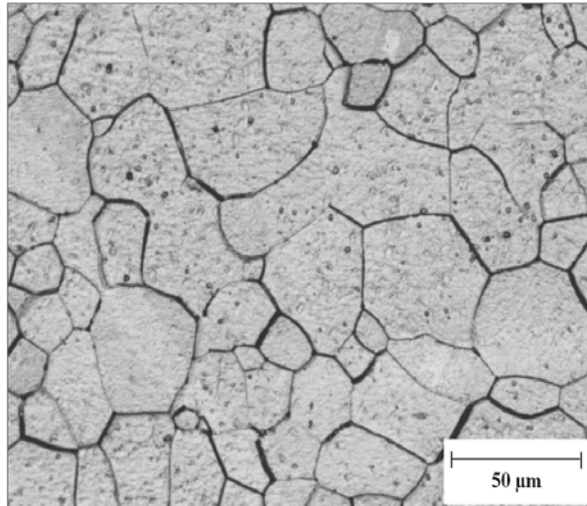


(ข)

รูปที่ 4.25 โครงสร้างจุลภาคถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงของโลหะผสม Ti-12.5Mo-20Nb หลังการ
อบละลายเฟส ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงแล้วจุ่มด้วยน้ำเย็น เกลนส์
วัตถุกำลังขยาย (ก) 10 เท่า (ข) 20 เท่า

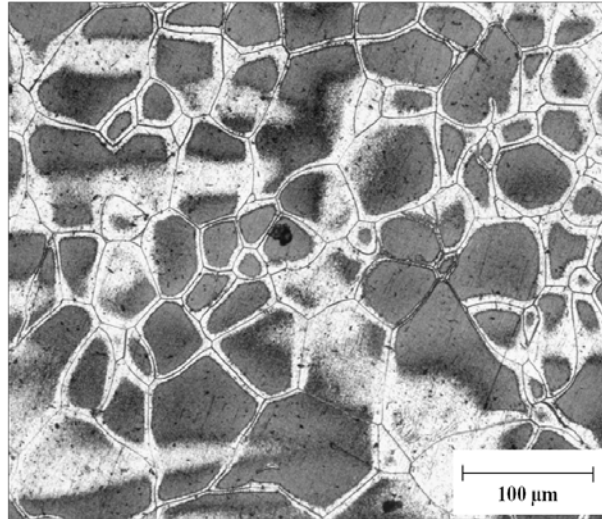


(ก)

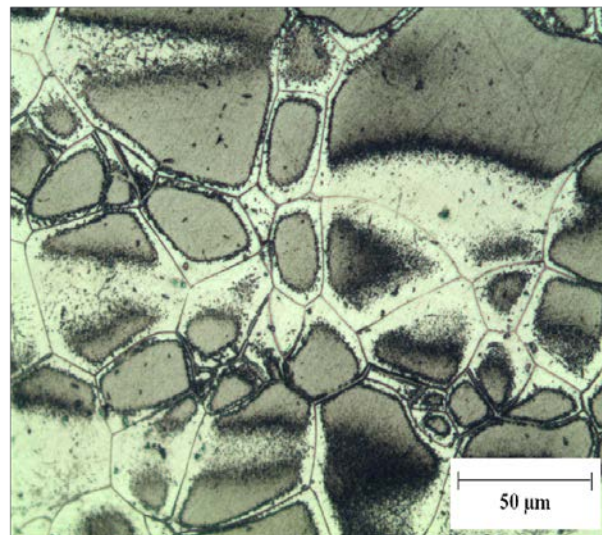


(ข)

รูปที่ 4.26 โครงสร้างจุลภาคถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงโลหะผสม Ti-12.5Mo-20Nb หลังการอบบ่ม ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงแล้วจุ่มด้วยน้ำเย็น เลนส์วัตถุกำลังขยาย (ก) 10 เท่า (ข) 20 เท่า

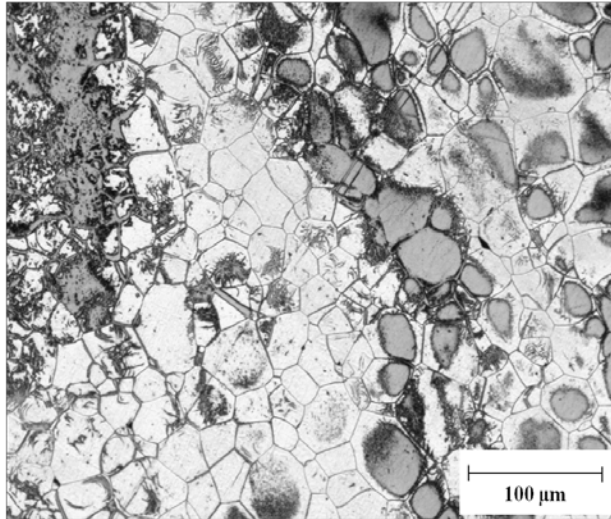


(ก)

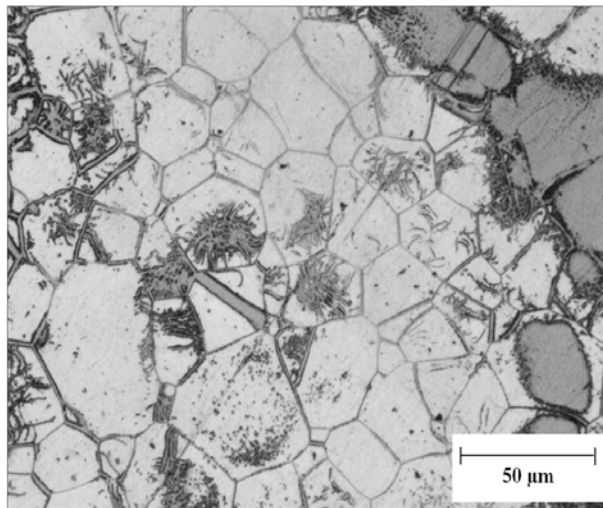


(ข)

รูปที่ 4.27 โครงสร้างจุลภาคถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงของโลหะผสม Ti-12.5Mo-20Nb หลังการอบบ่ม ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมงแล้วจุ่มด้วยน้ำยาลิ้นเลนส์วัตถุกำลังขยาย (ก) 10 เท่า (ข) 20 เท่า

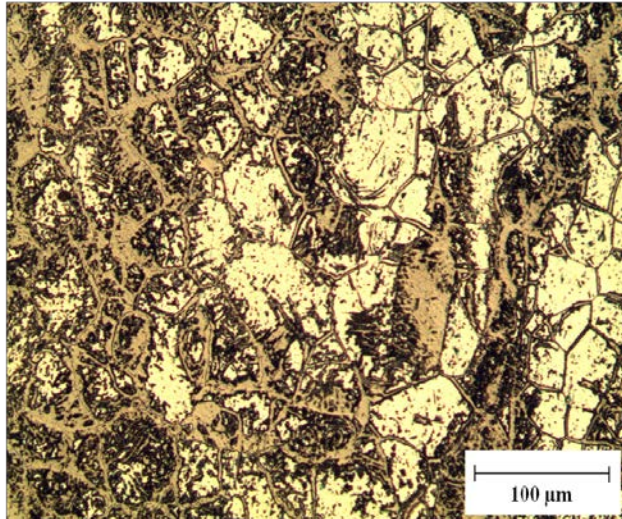


(ก)

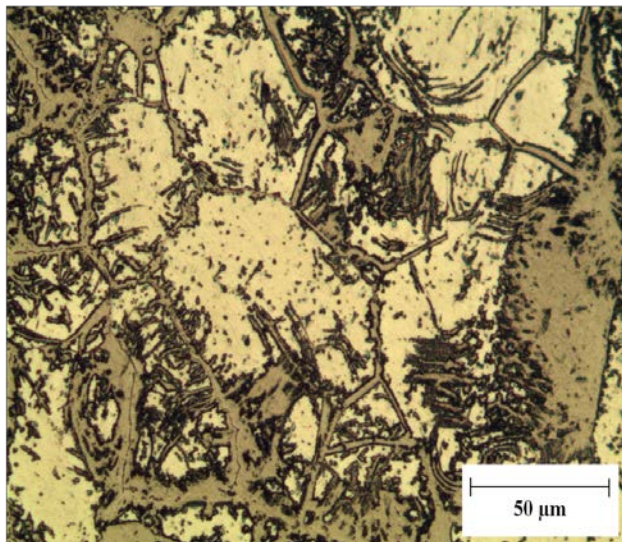


(ข)

รูปที่ 4.28 โครงสร้างจุลภาคถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงของโลหะผสม Ti-12.5Mo-20Nb หลังการอบบ่ม ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมงแล้วจุ่มด้วยน้ำเย็น เชนส์วัดถุกำลังขยาย (ก) 10 เท่า (ข) 20 เท่า



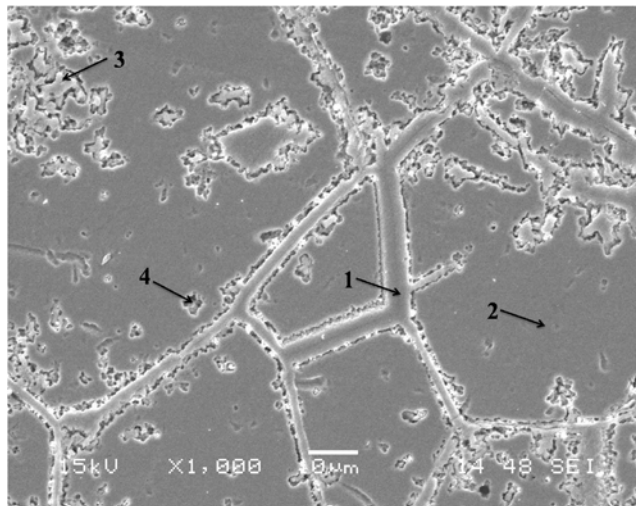
(ก)



(ข)

รูปที่ 4.29 โครงสร้างจุลภาคถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงของโลหะผสม Ti-12.5Mo-20Nb หลังการอบบ่ม ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมงแล้วจุ่มด้วยน้ำเย็น เลนส์วัตถุกำลังขยาย (ก) 10 เท่า (ข) 20 เท่า

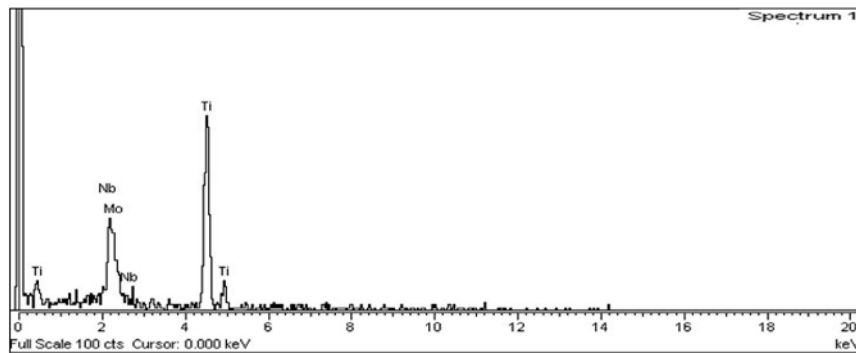
ในการทดลองนี้ได้ศึกษาโครงสร้างจุลภาคถ่าย ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด กำลังขยาย 1,000 เท่า ของชิ้นงานอบบ่ม 8 ชั่วโมง แสดงในรูปที่ 4.30 เฟสที่เกิดขึ้นบริเวณขอบเกรนมีลักษณะเป็นรูปเข็มพุ่งออกจากขอบเกรนทั้งสองด้านเข้าไปในเกรน นอกจากนี้ยังพบเฟสลักษณะเดียวกันนี้ในเกรนอีกด้วย ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีโดยเทคนิค EDS ของโลหะผสม Ti-12.5Mo-20Nb หลังอบบ่ม 8 ชั่วโมง แสดงในตารางที่ 4.10 และรูปสเปกตรัมจากการยิง EDS แสดงในรูปที่ 4.31 ผลการวิเคราะห์ธาตุทั้ง 4 ตำแหน่ง พบว่าปริมาณธาตุผสมแตกต่างกัน บริเวณตำแหน่งที่ 1 เป็นบริเวณขอบเกรนมีปริมาณธาตุไทเทเนียมร้อยละ 71.4 โมลิบดีนัมร้อยละ 11.4 ไนโอเบียมร้อยละ 17.2 โดยน้ำหนัก ตำแหน่งที่ 2 เป็นบริเวณโครงสร้างเฟสพื้น พบว่ามีปริมาณไทเทเนียม โมลิบดีนัม และไนโอเบียมใกล้เคียงกับส่วนผสมเริ่มต้น ส่วนตำแหน่งที่ 3 เป็นบริเวณกลุ่มของเฟสในโครงสร้างพื้น และตำแหน่งที่ 4 เป็นบริเวณอนุภาคในโครงสร้างพื้นพบว่ามีปริมาณ โมลิบดีนัมต่ำสุด แสดงว่าการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS ไม่สามารถสรุปได้ว่าเฟสที่เกิดขึ้นที่ขอบเกรนเป็นเฟสแอลฟา



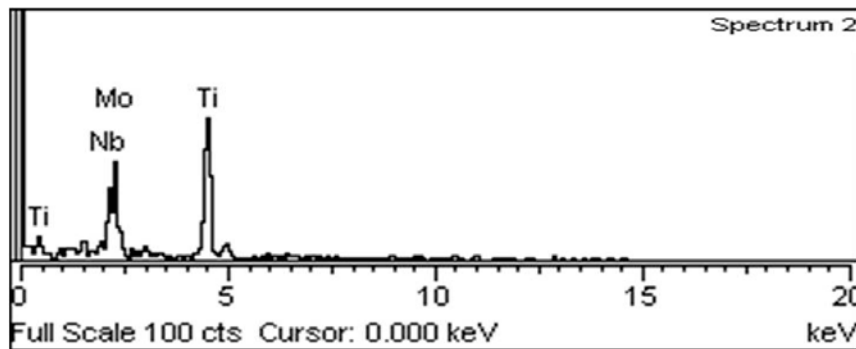
รูปที่ 4.30 โครงสร้างจุลภาคถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดกำลังขยาย 1,000 เท่าของ โลหะผสม Ti-12.5Mo-20Nb หลังการอบบ่ม ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมงแล้วจุ่มด้วยน้ำเย็น

ตารางที่ 4.10 ผลวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS ของอินกอตโลหะผสมไทเทเนียมผสม Ti-12.5Mo-20Nb

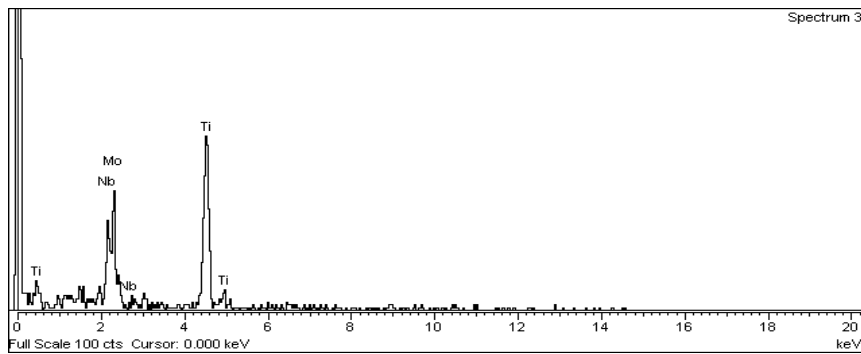
ตำแหน่งที่วิเคราะห์	ปริมาณธาตุที่พบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	ไทเทเนียม	โมลิบดีนัม	ไนโอเบียม
ตำแหน่งที่ 1 ขอบเกรน	71.4	11.4	17.2
ตำแหน่งที่ 2 โครงสร้างเฟสพื้น	66.9	12.7	20.4
ตำแหน่งที่ 3 กลุ่มของเฟสในโครงสร้างพื้น	70.5	11.0	18.5
ตำแหน่งที่ 4 อนุภาคในโครงสร้างพื้น	71.3	9.2	19.5



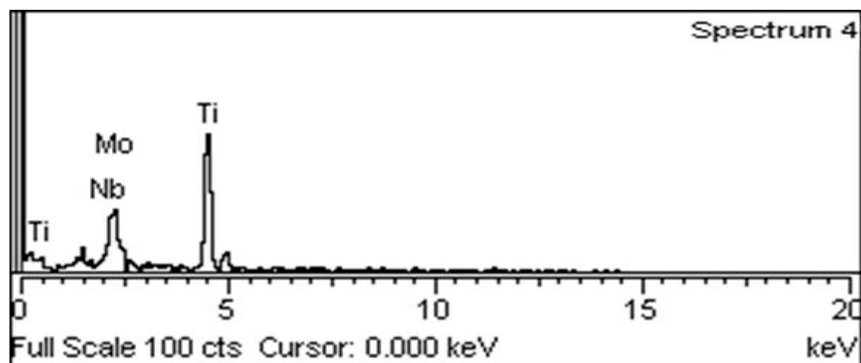
(ก)



(ข)



(ค)



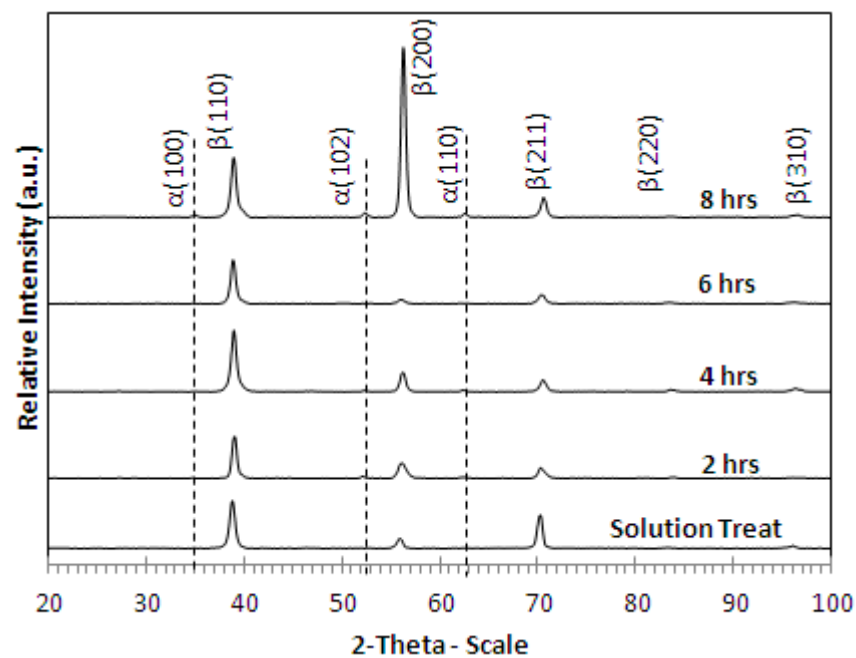
(ง)

รูปที่ 4.31 สเปกตรัมจากการวิเคราะห์ EDS ของโลหะผสม Ti-12.5Mo-20Nb หลังผ่านการอบบ่มที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง (ก) บริเวณขอบเกรน (ข) บริเวณโครงสร้างเฟสพื้น (ค) บริเวณกลุ่มของเฟสในโครงสร้างพื้น และ (ง) บริเวณอนุภาคในโครงสร้างพื้น

4.5.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกหลังอบบ่มโลหะผสม Ti-12.5Mo-20Nb

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของโลหะผสม Ti-12.5Mo-20Nb หลังอบละลายเฟสและหลังอบบ่มเวลา 2, 4, 6 และ 8 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ได้รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ดังรูปที่ 4.32 พบว่าชิ้นงานโลหะผสม Ti-12.5Mo-20Nb หลังอบละลายเฟสมีโครงสร้างผลึกแบบ BCC เพียงโครงสร้างเดียว ทั้งนี้เนื่องจากในส่วนผสมมีปริมาณโมลิบดีนัม และไนโอเบียม ซึ่งจัดเป็นธาตุผสมที่ช่วยเพิ่มเสถียรภาพให้กับเฟสบีตาในปริมาณที่มากพอที่จะทำให้โครงสร้างผลึกเปลี่ยนจาก HCP ไปเป็น BCC ที่อุณหภูมิห้องได้ และชิ้นงานโลหะผสม Ti-12.5Mo-20Nb หลังอบบ่มที่เวลา 2, 4, 6 และ 8 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสพบว่ามีโครงสร้างผลึกแบบ BCC ซึ่งเป็นโครงสร้าง

ผลึกของเฟสบีตาและโครงสร้างผลึกแบบ HCP ซึ่งเป็นโครงสร้างผลึกของเฟสแอลฟาปรากฏขึ้นด้วย แสดงให้เห็นว่าเกิดเฟสแอลฟาขึ้นในโลหะผสม Ti-12.5Mo-20Nb ตั้งแต่การอบบ่ม 2 ชั่วโมง ซึ่งเป็นการยืนยันข้อสันนิษฐานที่ว่าเฟสที่เกิดขึ้นหลังการอบบ่มเป็นเฟสแอลฟา ซึ่งสอดคล้องกับ โลหะผสม Ti-12.5Mo-5Nb ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น และผลการทดลองนี้ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Geetha และคณะ[33] พบว่าโลหะไทเทเนียมผสม Ti-20Nb-20Zr หลังการอบละลายเฟสที่อุณหภูมิบริเวณเฟส บีตา แล้วเย็นตัวในน้ำ จากนั้นทำการอบบ่มที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จะพบ โครงสร้างของโลหะผสมเป็นเฟส α และ β ไม่ปรากฏเฟสของ α'' และ ω เกิดขึ้น



รูปที่ 4.32 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในโลหะผสม Ti-12.5Mo-20Nb หลังผ่านการอบละลาย เฟสอุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมงและ อบบ่มที่อุณหภูมิ 600 องศา เซลเซียส เวลา 2-8 ชั่วโมง

4.5.3 สมบัติทางกลของโลหะผสม Ti-12.5Mo-20Nb หลังผ่านกรรมวิธีทางความร้อน

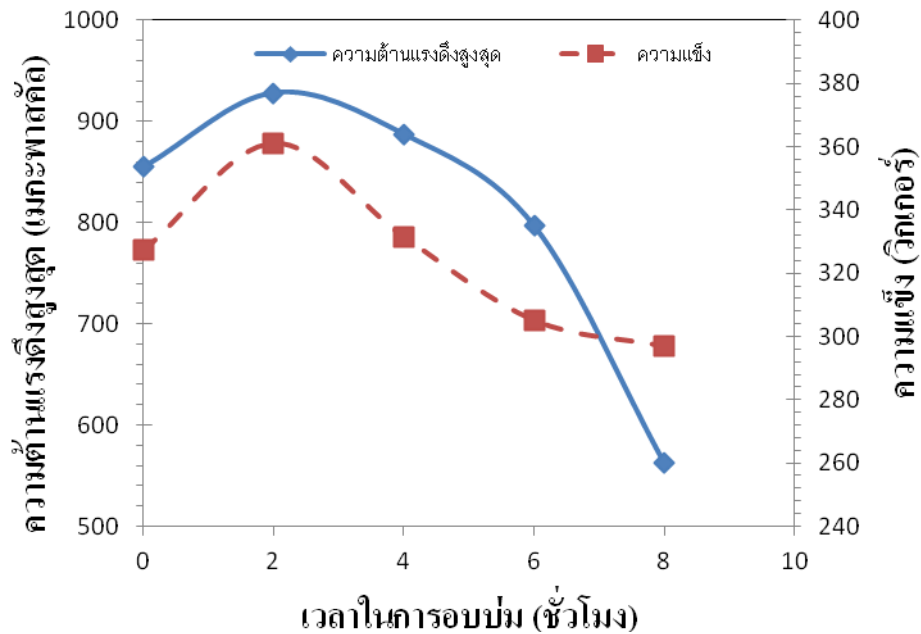
ผลการทดสอบสมบัติทางกลของโลหะผสม Ti-12.5Mo-20Nb แสดงดังตารางที่ 4.11 ผลการวัดความแข็งแรงของโลหะผสม Ti-12.5Mo-20Nb หลังการอบละลายเฟสแล้วจุ่มน้ำเย็นทันทีพบว่ามีความแข็งแรงเฉลี่ย 327 วิกเกอร์ หลังจากนั้นนำไปอบที่เวลาต่างกัน 2-8 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสพบว่าค่าความแข็งแรงมีค่าแตกต่างกันไปขึ้นกับเวลาที่ใช้ในการอบบ่มนี้ การอบบ่มชิ้นงานด้วยเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง พบว่าการอบบ่ม 2 ชั่วโมงค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเป็น 361 วิกเกอร์ แต่เมื่อทำการอบบ่มที่เวลา 4, 6 และ 8 ชั่วโมง ค่าความแข็งแรงมีค่าลดลงเป็น 331, 305 และ 297 วิกเกอร์ ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากเมื่อใช้เวลานานในการอบบ่มเป็นเวลานานขึ้นจึงทำให้เฟสแอลฟาที่เกิดขึ้นมีความหยาบและมีขยายใหญ่ขึ้นกระจายตัวทั่วทั้งเฟสบีตาที่เป็นเฟสพื้นและตามบริเวณแนวขอบเกรนจึงส่งผลให้ความแข็งแรงมีค่าลดลง

ตารางที่ 4.11 สมบัติทางกลของ Ti-12.5Mo-20Nb หลังการอบบ่มในช่วงเวลา 2-8 ชั่วโมง

เวลาในการอบบ่ม (ชั่วโมง)	ความแข็งแรงเฉลี่ย (วิกเกอร์)	ความต้านแรงดึงสูงสุด (เมกะพาสคัล)	มอดูลัส (จิกะพาสคัล)	การยืดตัว (ร้อยละ)
อบละลายเฟส	327	855	53	4
2	361	928	63	5
4	331	887	67	6
6	305	797	50	5
8	297	562	58	4

เพื่อดูแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงความต้านแรงดึงสูงสุดและความแข็งแรงของโลหะผสม Ti-12.5Mo-20Nb หลังผ่านการอบบ่มที่เวลาแตกต่างกันแสดงเป็นกราฟดังรูปที่ 4.33 พบว่าชิ้นงานโลหะผสมที่ผ่านการอบละลายเฟสมีความต้านแรงดึงสูงสุด 855 เมกะพาสคัล เมื่อทำการอบบ่มเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ค่าความต้านแรงดึงสูงสุดมีค่าสูงขึ้นเท่ากับ 928 เมกะพาสคัล แต่เมื่ออบบ่มที่เวลาเพิ่มขึ้นเป็น 4, 6 และ 8 ชั่วโมง ค่าความต้านแรงดึงสูงสุดมีแนวโน้มลดต่ำลงเป็น 887, 797 และ 562 เมกะพาสคัล ตามลำดับ ซึ่งการอบบ่มเป็นเวลา 2 ชั่วโมง มีค่าความต้านแรงดึงสูงสุด ที่ให้ค่าสูงที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากขนาดของอนุภาคเฟสแอลฟาที่ตกผลึกมีขนาดเหมาะสมที่สามารถต้านทานแรงดึงได้มากที่สุด แต่เมื่อทำการอบบ่มด้วยเวลามากขึ้นเป็น 4, 6 และ 8 ชั่วโมง จากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาคเห็นได้ว่าลักษณะโครงสร้างมีขนาดหยาบขึ้นจึงทำให้ค่าความต้านแรงดึงที่จุดสูงสุดลดต่ำลง สำหรับในส่วนของค่ามอดูลัสจะมี

ค่าสูงสุดเป็น 67 จิกะพาสคัล เมื่ออบบ่มเป็นเวลา 4 ชั่วโมง และมีค่ามอดูลัสต่ำสุดเท่ากับ 50 จิกะพาสคัล เมื่ออบบ่มเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ในส่วนของร้อยละการยึดตัว จะเห็นว่าชิ้นงานหลังการอบบ่มเป็นเวลา 4 ชั่วโมง มีค่าสูงที่สุดคือร้อยละ 6 และมีร้อยละการยึดตัวต่ำที่สุดเมื่อทำการอบบ่มเป็นเวลา 8 ชั่วโมง ซึ่งมีค่าร้อยละ 4

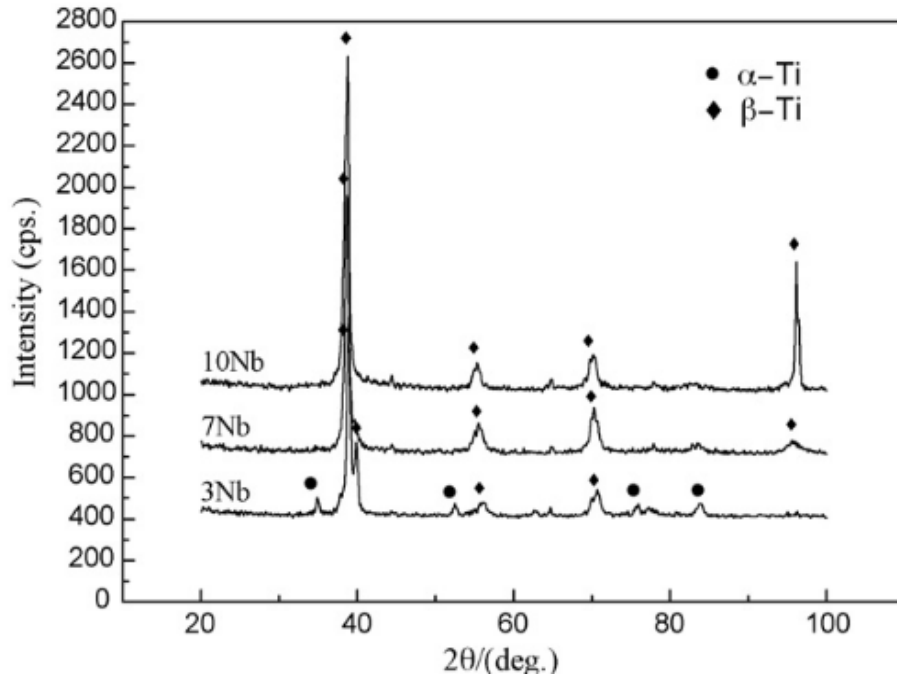


รูปที่ 4.33 สมบัติทางกลของโลหะผสม Ti-12.5Mo-20Nb หลังการอบบ่มที่เวลา 2-8 ชั่วโมง

4.6 การอภิปรายผลการทดลอง

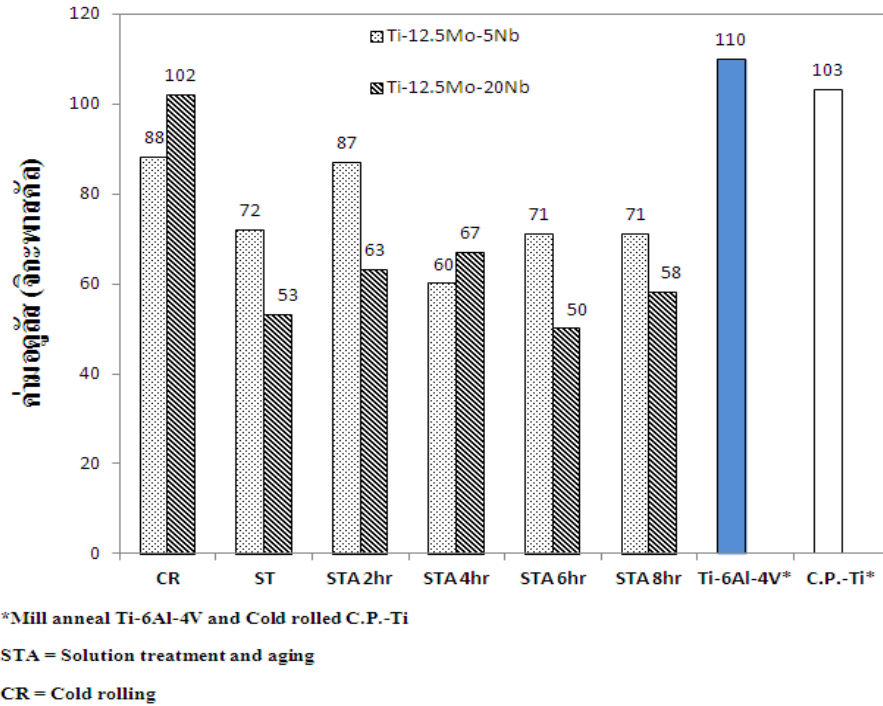
เมื่อพิจารณาผลจากการเติมไนโอเบียมในปริมาณที่ต่างกันต่อโครงสร้างผลึกของโลหะผสม Ti-12.5Mo-nNb ($n = 0, 5, 10, 15$ และ 20) เห็นได้ว่าการเติมไนโอเบียมในทุกส่วนผสมสามารถทำให้โลหะไทเทเนียมผสมมีโครงสร้างเป็น BCC ที่อุณหภูมิห้องได้ เนื่องจากการเติมโมลิบดีนัมและไนโอเบียมในปริมาณที่มากพอและทั้งสองธาตุจัดเป็นธาตุผสมกลุ่มที่ช่วยเพิ่มเสถียรภาพให้กับเฟสบีตา ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Xu และคณะ [7] ได้ศึกษาโลหะไทเทเนียมผสมกลุ่มบีตา Ti-10Mo-nNb ($n = 3, 7$ และ 10) พบว่าการไนโอเบียมปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เป็นปริมาณที่ไม่สามารถทำให้โลหะไทเทเนียมผสมมีโครงสร้างเป็น BCC ที่อุณหภูมิห้องได้ แต่เมื่อเพิ่มเพิ่มไนโอเบียมเป็นร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก ไม่พบโครงสร้างผลึก HCP ซึ่งเป็นโครงสร้างผลึกของเฟสแอลฟาจึงสามารถทำ

ให้โลหะไทเทเนียมผสมมีโครงสร้างเป็น BCC ที่อุณหภูมิห้องได้ แสดงผลรูปแบบการเลี้ยวเบนของ รังสีเอกซ์ Ti-10Mo-nNb (n = 3, 7 และ 10) ซึ่งเป็นงานวิจัยของ Xu และคณะดังรูปที่ 4.34



รูปที่ 4.34 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ Ti-10Mo-nNb (n = 3, 7 และ 10) [7]

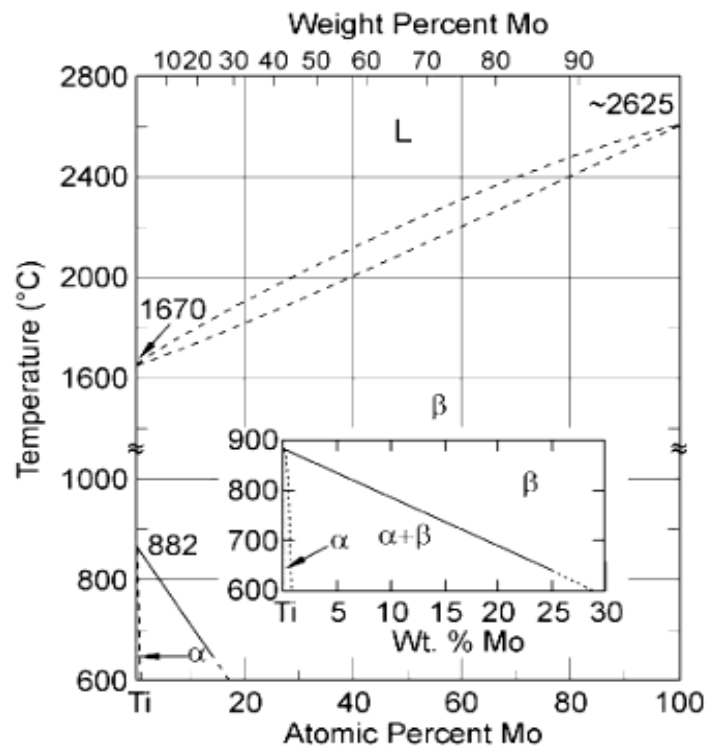
ผลของค่ามอดูลัสของชิ้นงานโลหะผสม Ti-12.5Mo-5Nb และ Ti-12.5Mo-20Nb ที่ผ่านการรีดเย็นและ ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน เปรียบเทียบกับ โลหะที่ใช้เป็นวัสดุทางการแพทย์ในปัจจุบัน คือ CP-Ti และ Ti-6Al-4V แสดงการเปรียบเทียบดังรูปที่ 4.35 พบว่ามอดูลัสของชิ้นงานที่ผ่านการรีดเย็น และผ่านกรรมวิธีทางความร้อนมีค่าน้อยกว่าโลหะผสม Ti-6V-4Al และไทเทเนียมบริสุทธิ์ซึ่งมีค่า มอดูลัสเท่ากับ 110 และ 103 จิกะพาสคัล ตามลำดับ [16] ส่วนโลหะผสม Ti-12.5Mo-20Nb หลังอบ บ่มเป็นเวลา 6 ชั่วโมง มีค่ามอดูลัสต่ำสุดเท่ากับ 50 จิกะพาสคัล



รูปที่ 4.35 การเปรียบเทียบค่ามอดูลัสของโลหะผสม Ti-12.5Mo-5Nb, Ti-12.5Mo-20Nb, CP-Ti และ Ti-6Al-4V

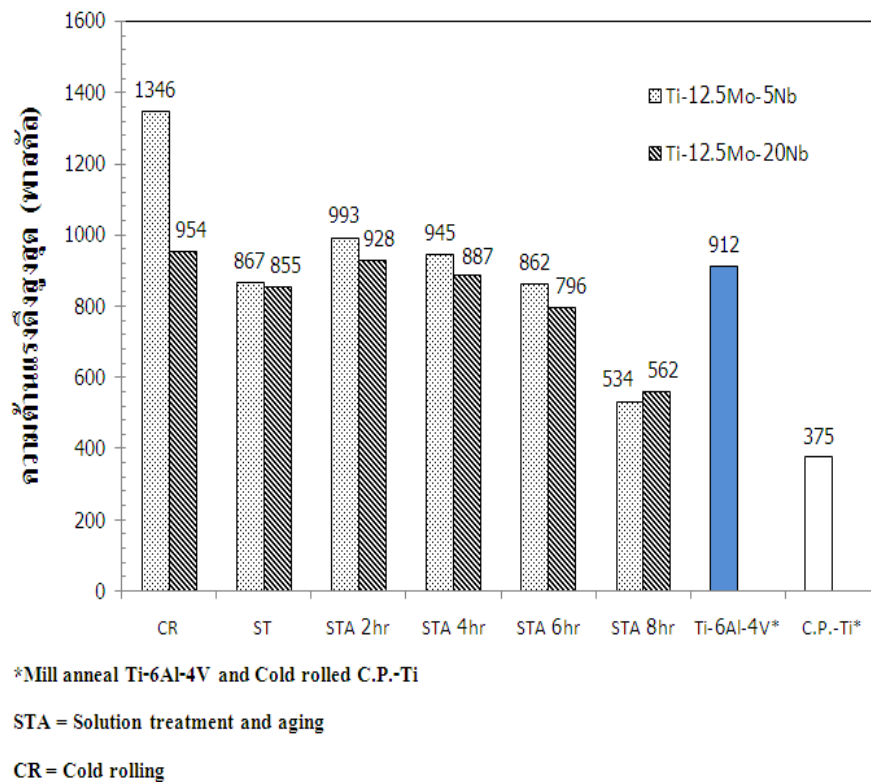
ผลการทดสอบความต้านแรงดึงสูงสุด ของชิ้นงาน โลหะผสม Ti-12.5Mo-5Nb และ Ti-12.5Mo-20Nb ที่ผ่านการรีดเย็นและ ชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน เปรียบเทียบกับ โลหะที่ใช้เป็นวัสดุทางการแพทย์ในปัจจุบัน คือ CP-Ti และ Ti-6Al-4V แสดงผลของค่าความต้านแรงดึง สูงสุดดังรูปที่ 4.37 พบว่าโลหะผสม Ti-12.5Mo-5Nb และ Ti-12.5Mo-20Nb ที่ผ่านการรีดเย็นมีค่าความเค้นแรงดึงสูงที่สุด มากกว่าชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอื่นๆ เนื่องจากการรีดเย็นมีผลทำให้โครงสร้างจุลภาคเกรนเกิดการบิดเบี้ยว มีปริมาณดิสโลเคชันเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้โลหะผสมมีความแข็งและความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาชิ้นงานที่ผ่านการทำกรรมวิธีทางความร้อนพบว่าเมื่อใช้เวลาในการอบบ่มเวลา 2 ชั่วโมง มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดเพิ่มขึ้นจากโลหะผสมที่ผ่านการอบละลายเฟส เนื่องจากอนุภาคแอลฟาที่เกิดขึ้นในโลหะผสมจากการอบบ่มไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชันทำให้โลหะผสมมีความต้านแรงดึงสูงสุดสูงขึ้น สามารถยืนยันการเกิดขึ้นของเฟสแอลฟาได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกและพิจารณาจากเฟสสมมูลของ ไทเทเนียม-โมลิบดีนัม ที่อุณหภูมิอบบ่ม 600 องศาเซลเซียสซึ่งปรากฏเฟสของแอลฟาขึ้นภายในโลหะผสมแสดง เฟสสมมูลของไทเทเนียม-โมลิบดีนัม [10] ดังรูปที่ 4.36



รูปที่ 4.36 แผนภาพเฟสสมดุลของไทเทเนียม-โมลิบดีนัม [10]

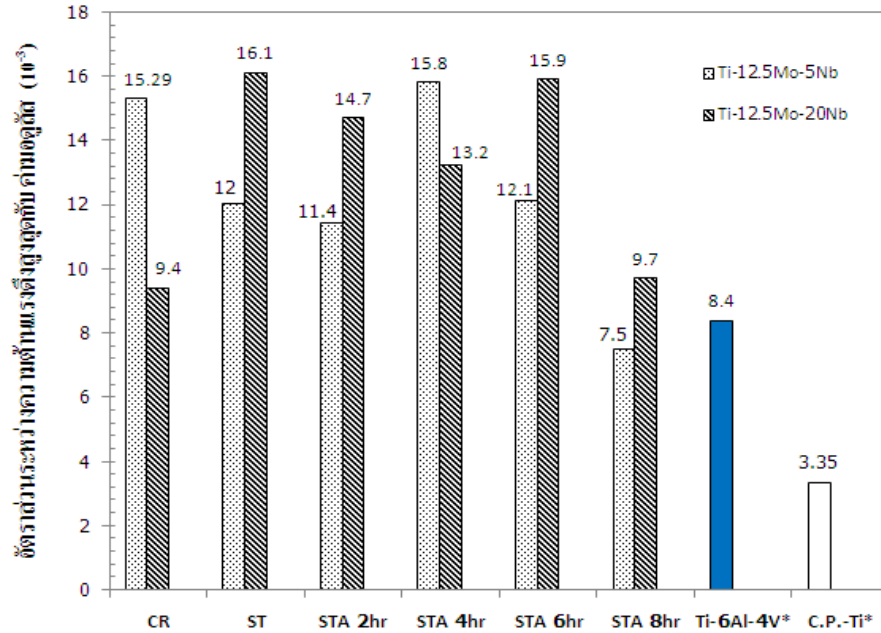
ส่วนค่าความต้านทานแรงดึง สูงสุดเมื่อเวลาอบบ่มเพิ่มขึ้นจาก 4-8 ชั่วโมง พบว่าโลหะผสมมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดลดลง เนื่องจากเมื่อเวลาอบบ่มนานขึ้นอนุภาคของแอลฟาจะมีลักษณะหยาบขึ้น และมีการกระจายตัวของอนุภาคเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึง สูงสุดมีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานโลหะผสม Ti-12.5Mo-5Nb และ Ti-12.5Mo-20Nb ที่ผ่านการรีดเย็น กับ CP-Ti และ Ti-6Al-4V จะเห็นได้ว่าชิ้นงานโลหะผสม มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด 1,346 และ 954 เมกะพาสคัล ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของโลหะผสม CP-Ti และ Ti-6Al-4V ที่มีค่า 965 และ 345 เมกะพาสคัล ตามลำดับ เมื่อพิจารณาชิ้นงานที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดสูงกว่า CP-Ti และ Ti-6Al-4V ส่วนชิ้นงานที่ใช้เวลา 8 ชั่วโมง พบว่ามีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดต่ำกว่า Ti-6Al-4V แต่อย่างไรก็ตามชิ้นงานโลหะผสมที่ได้จากการทดลองมีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดสูงกว่า CP-Ti ซึ่งมีค่าเพียง 345 เมกะพาสคัล



รูปที่ 4.37 การเปรียบเทียบค่าความต้านแรงดึงสูงสุดของโลหะผสม Ti-12.5Mo-5Nb, Ti-12.5Mo-20Nb, CP-Ti และ Ti-6Al-4V

เมื่อเปรียบเทียบผลจากการทดสอบสมบัติทางกลที่ได้จากการทดลองชิ้นงานรีดเย็นและอบบ่มของโลหะผสม Ti-12.5Mo-5Nb Ti-12.5Mo-20Nb และ Ti-6Al-4V ซึ่งเป็นวัสดุทางการแพทย์ที่ใช้ในปัจจุบัน ในการบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของวัสดุทางการแพทย์สามารถพิจารณาได้จากอัตราส่วนระหว่างความต้านแรงดึงสูงสุดกับค่ามอดูลัส เมื่ออัตราส่วนระหว่างความต้านแรงดึงสูงสุดกับค่ามอดูลัสมีค่ามาก วัสดุนั้นจะมีสมบัติทางกลที่เหมาะสมในการนำไปใช้เป็นวัสดุทางการแพทย์ [30] และเมื่ออัตราส่วนระหว่างความต้านแรงดึงสูงสุดกับค่ามอดูลัสมีค่านั้นแสดงว่าวัสดุนั้นมีค่าความต้านแรงดึงที่มากในขณะที่มีค่ามอดูลัสที่ต่ำด้วยจึงทำให้เหมาะสมที่จะนำไปใช้เป็นวัสดุทางการแพทย์ การเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างค่าความต้านแรงดึงสูงสุดกับค่ามอดูลัสของโลหะผสมที่ได้จากการทดลองและโลหะที่ใช้เป็นวัสดุทางการแพทย์ในปัจจุบัน Ti-6Al-4V แสดงดังรูปที่ 4.38 พบว่าโลหะผสม Ti-12.5Mo-5Nb และ 12.5Mo-20Nb ที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนมีค่าอัตราส่วนระหว่างความต้านแรงดึงสูงสุดกับค่ามอดูลัส มีค่ามากกว่าโลหะไทเทเนียมบริสุทธิ์หลังผ่านการรีดเย็นและโลหะผสม Ti-6Al-4V ที่ใช้เป็นวัสดุทางการแพทย์ในปัจจุบัน ซึ่งมีค่าเป็น 3.35×10^{-3} และ 8.4×10^{-3} ดังนั้นโลหะไทเทเนียมผสม Ti-12.5Mo-5Nb และ 12.5Mo-20Nb จึงมีสมบัติที่สามารถใช้งานในทางวัสดุ

ทางการแพทย์ได้ ยกเว้นชิ้นงานไทเทเนียมผสม Ti-12.5Mo-5Nb ที่ผ่านการอบบ่มที่เวลา 8 ชั่วโมง มีค่า 7.5×10^{-3} อย่างไรก็ตามต้องทดสอบสมบัติด้านอื่นเพิ่มเติม



*Mill anneal Ti-6Al-4V and Cold rolled C.P.-Ti

STA = Solution treatment and aging

CR = Cold rolling

รูปที่ 4.38 อัตราส่วนระหว่างความต้านแรงดึงสูงสุดกับค่ามอดูลัสของโลหะผสมหลังการอบบ่มที่อุณหภูมิต่างกันเปรียบเทียบกับ CP-Ti และ Ti-6Al-4V