

Pengaruh Oksidasi Termal terhadap Kekerasan Permukaan, Ketebalan Oxide Scale, dan Morfologi Paduan Ti-29Nb-13Ta-4.6Zr

(*Effects of Thermal Oxidation on Surface Hardness, Oxide Scale Thickness, and Morphology of Ti-29Nb-13Ta-4.6Zr Alloy*)

Muh Azizul¹⁾, Zuldesmi Mansjur^{2*)}, Yohanis Ramp³⁾.

^{1) 2) 3)} Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Manado

E-mail: ^{1*} zuldesmi@unima.ac.id

Abstrak

Paduan Ti-29Nb-13Ta-4.6Zr (TNTZ), dengan modulus elastisitas rendah dan biokompatibilitas yang baik, dapat digunakan sebagai implan. Namun, untuk membuatnya lebih tahan terhadap gesekan dan kerusakan, sifat permukaannya harus ditingkatkan. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk melihat bagaimana oksidasi termal mempengaruhi kekerasan permukaan, ketebalan skala oksida, dan morfologi permukaan TNTZ pada suhu 600°C, 700°C, dan 800°C dengan waktu tahan 2, 6, 24, dan 48 jam. *Grinding*, *polishing*, dan pembersihan ultrasonik dilakukan sebelum spesimen dipanaskan dalam tungku dengan suhu 5 °C/menit. Kekerasan diuji menggunakan metode *Vickers*, ketebalan skala oksida diukur dengan *Gauge* Ketebalan GM 280, dan morfologi diamati melalui pengamatan visual dan *Scanning Electron Microscope* (SEM). Hasil menunjukkan bahwa kekerasan lapisan permukaan secara konsisten ditingkatkan oleh oksidasi termal; selama 48 jam, nilai tertinggi mencapai 502 HV pada 800°C. Dengan pengamatan SEM, lapisan oksida semakin tebal, kasar, dan berpori pada temperatur tinggi. Namun, nilai yang diperoleh menunjukkan ketebalan skala oksida keseluruhan, bukan lapisan TiO₂ kompak. Hasil penelitian menunjukkan bahwa meskipun oksidasi termal dapat meningkatkan kualitas permukaan TNTZ, kondisi ekstrim dapat menghasilkan partikel oksida berlebih dan menurunkan stabilitas mekanik logam dasar. Oleh karena itu, temperatur yang ideal disarankan antara 600 dan 700°C.

Kata kunci: Material Implan, Oksidasi termal, Tribologi, SEM, Ti-29Nb-13Ta-4.6Zr.

Abstract

Ti-29Nb-13Ta-4.6Zr (TNTZ) alloy, with its low elastic modulus and good biocompatibility, can be used as an implant. However, to make it more resistant to friction and damage, its surface properties must be improved. The purpose of this study was to see how thermal oxidation affects the surface hardness, oxide scale thickness, and surface morphology of TNTZ at temperatures of 600°C, 700°C, and 800°C with holding times of 2, 6, 24, and 48 hours. Grinding, polishing, and ultrasonic cleaning were performed before the specimens were heated in a furnace at 5°C/min. Hardness was tested using the Vickers method, oxide scale thickness was measured with a GM 280 Thickness Gauge, and morphology was observed through visual observation and Scanning Electron Microscope (SEM). The results showed that the surface layer hardness was consistently increased by thermal oxidation; for 48 hours, the highest value reached 502 HV at 800°C. SEM observations show that the oxide layer becomes thicker, rougher, and more porous at higher temperatures. However, the obtained values indicate

the thickness of the overall oxide scale, not the compact TiO₂ layer. The results indicate that although thermal oxidation can improve the surface quality of TNTZ, extreme conditions can produce excess oxide particles and reduce the mechanical stability of the base metal. Therefore, an ideal temperature between 600 and 700°C is recommended.

Keywords: *Implant Material, thermal oxidation, tribology, SEM, Ti-29Nb-13Ta-4.6Zr.*

1. PENDAHULUAN

Karena sifat fisiologis dan mekanisnya yang luar biasa, timah dan paduannya merupakan biomaterial yang sangat penting dalam bidang medis, terutama dalam aplikasi ortopedi dan dental. Untuk mengurangi risiko perlindungan stres, material implan yang ideal harus memiliki modulus elastisitas, biokompatibilitas, ketahanan korosi, dan kekuatan yang tinggi [1]. Paduan beta titanium (β -Ti) adalah kandidat terbaik di antara berbagai paduan titanium karena memiliki modulus elastisitas lebih rendah daripada paduan tipe alfa dan alfa+ β . Ti-29Nb-13Ta-4.6Zr (TNTZ), salah satu paduan beta titanium yang paling potensial, memiliki modulus elastisitas sekitar 58 GPa, jauh lebih mendekati modulus elastisitas tulang (30 GPa) daripada paduan titanium biasa, sehingga mampu meningkatkan kompatibilitas mekanik [2], [3].

Namun, paduan TNTZ masih memiliki beberapa kelemahan yang signifikan. Sifat tribologi dan ketahanan aus yang rendah karena permukaan material yang lunak merupakan kelemahan utama. Kondisi gesekan dan kontak berulang antara komponen logam atau antara logam dan jaringan dapat menyebabkan keausan, ketidakstabilan permukaan, dan penurunan umur pakai implan saat menggunakan implan. Oleh karena itu, untuk meningkatkan kekerasan permukaan dan stabilitas lapisan oksida pada paduan TNTZ tanpa mengubah sifat mekanik *bulk material*, diperlukan usaha. Salah satu metode yang efektif, sederhana, dan ekonomis untuk meningkatkan kualitas permukaan titanium adalah oksidasi termal. Proses ini menghasilkan lapisan oksida TiO₂ yang keras dan stabil melalui mekanisme difusi oksigen dan pembentukan fase oksida pada temperatur tinggi. Lapisan oksida yang terbentuk dapat meningkatkan kekerasan permukaan, ketahanan aus, serta memberikan warna dan morfologi tertentu yang mencerminkan perubahan struktur mikro. Parameter utama dalam proses oksidasi termal adalah temperatur dan waktu pemanasan, yang berpengaruh langsung terhadap ketebalan lapisan oksida,

morfologi mikro, dan gradien difusi oksigen ke arah logam dasar. Fenomena ini juga menghasilkan lapisan *oxygen diffusion zone* (ODZ) di bawah oksida, yang berkontribusi terhadap kenaikan kekerasan pada daerah logam dasar [2][4].

Penelitian mengenai oksidasi termal pada titanium murni dan beberapa paduan titanium telah banyak dilakukan, namun studi komprehensif pada paduan TNTZ masih terbatas. Selain itu, sebagian besar penelitian sebelumnya hanya mengevaluasi temperatur tunggal, rentang waktu pendek, atau fokus pada karakter oksida permukaan tanpa melihat hubungan simultan antara kekerasan permukaan, ketebalan lapisan oksida, dan perubahan mikrostruktur. Gap penelitian juga terlihat pada kurangnya kajian mengenai efek waktu oksidasi panjang (hingga 48 jam) terhadap pertumbuhan lapisan oksida, ketebalan lapisan difusi, serta dampaknya terhadap peningkatan kekerasan permukaan dan logam dasar pada paduan TNTZ [5]–[7].

Berdasarkan gap tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi efek temperatur oksidasi termal (600°C , 700°C , dan 800°C) dan variasi waktu tahan (2, 6, 24, dan 48 jam) terhadap sifat mekanik dan karakteristik permukaan paduan Ti-29Nb-13Ta-4.6Zr. Hasil penelitian ini melihat peningkatan kekerasan permukaan, perubahan kekerasan pada logam dasar yang disebabkan oleh difusi oksigen, ketebalan lapisan oksida, dan perubahan morfologi yang diamati melalui *scanning electron microscopy* (SEM). Peningkatan suhu dan waktu oksidasi menunjukkan peningkatan kekerasan dan ketebalan lapisan oksida yang signifikan, menunjukkan bahwa mekanisme pertumbuhan oksida dikendalikan oleh difusi dan pembentukan. Hasil ini meningkatkan pemahaman ilmiah tentang fenomena oksidasi termal pada paduan TNTZ dan membuka jalan untuk mengembangkan material implan yang memiliki kinerja permukaan yang lebih baik.

2. METODE PENELITIAN

Dalam penelitian ini, paduan Ti-29Nb-13Ta-4.6Zr (TNTZ) digunakan sebagai material utama. Komposisi unsur penyusunnya meliputi 44,52 wt% Ti, 29,32 wt% Nb, 12,97 wt% Ta, dan 4,35 wt% Zr. Bahan pendukung lainnya termasuk serbuk alumina (Al_2O_3) untuk proses *polishing*, dan alkohol untuk pembersihan ultrasonik. Alat yang digunakan termasuk penggiling, jangka sorong, timbangan

digital, alat pembersih ultrasonik, tungku pemanas jenis *Nabertherm*, alat uji kekerasan *Future Tech FM 810* (standar SNI 19-0409-1989), timbangan ketebalan GM 280, dan *Scanning Electron Microscope* (SEM).

Spesimen TNTZ dipotong dari batang material menggunakan *grinder*. Kemudian, silinder dengan diameter 15 mm dan ketebalan 50 mm dibentuk. Untuk membuat permukaan rata dan halus, proses *grinding* bertingkat digunakan menggunakan amplas *mesh* 500–2000. Selanjutnya, kain beludru dan serbuk alumina digunakan untuk mepolish permukaan hingga menjadi mengilap dan bebas goresan. Ini memungkinkan pengamatan mikrostruktur yang lebih baik. Setelah itu, spesimen dibersihkan menggunakan pembersih ultrasonik untuk menghilangkan sampah, bahan kimia, dan sisa abrasif yang ada pada permukaannya.

Dalam tungku pemanas, oksigenasi termal dilakukan dengan laju pemanasan 5 °C/menit pada tiga suhu 600 °C, 700 °C, dan 800 °C. Ada empat variasi waktu tahan, yaitu 2 jam, 6 jam, 24 jam, dan 48 jam. Untuk setiap kombinasi parameter, tiga spesimen digunakan, sehingga total 36 spesimen diuji, dengan satu sampel tanpa perlakuan sebagai kontrol. Setiap sampel didinginkan secara alami pada suhu ruang setelah proses oksidasi selesai.

Metode *Vickers* dan alat *Future Tech FM 810* digunakan untuk menguji kekerasan. Pengujian dilakukan pada dua area: permukaan lapisan oksida dan daerah logam dasar. Ini dilakukan untuk mengetahui bagaimana oksidasi termal mempengaruhi kedua area tersebut. Untuk memastikan keterulangan data, setiap sampel diuji pada titik yang konsisten.

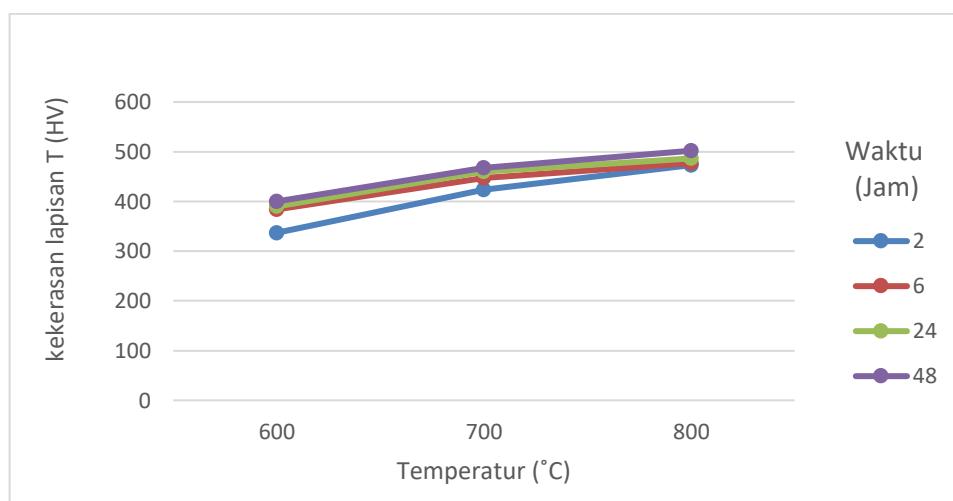
Pengukuran ketebalan lapisan permukaan dilakukan dengan menggunakan *Thickness Gauge* GM 280. Perlu diingat bahwa alat ini tidak mengukur ketebalan lapisan TiO₂ kompak secara langsung; sebaliknya, itu mengukur ketebalan skala oksida secara keseluruhan, yang mencakup lapisan oksida, porositas, perubahan topografi, dan skala oksida yang terbentuk karena oksidasi pada suhu tinggi. Oleh karena itu, bukan nilai absolut ketebalan lapisan TiO₂ yang digunakan untuk mengamati tren pertumbuhan oksida, tetapi nilai yang diperoleh digunakan untuk mengamati tren pertumbuhan oksida. Untuk menghitung ketebalan skala oksida masing-masing spesimen, pengukuran dilakukan pada dua titik—tepi dan tengah

permukaan—dan kemudian dirata-ratakan.

Proses pengamatan morfologi permukaan dilakukan dalam dua langkah. Pertama, pengamatan visual digunakan untuk mengidentifikasi kondisi makrografi dan perubahan warna sebelum dan sesudah oksidasi termal. Kedua, menggunakan *scanning electron microscope* (SEM), karakteristik struktur oksida, ketebalan aktual lapisan, evolusi pori, dan perubahan permukaan yang disebabkan oleh variasi temperatur dan waktu tahan oksidasi dipelajari.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

a. Kekerasan Lapisan Oksida dan Logam Dasar



Gambar 3. Grafik Uji Kekerasan pada Lapisan Material TNTZ

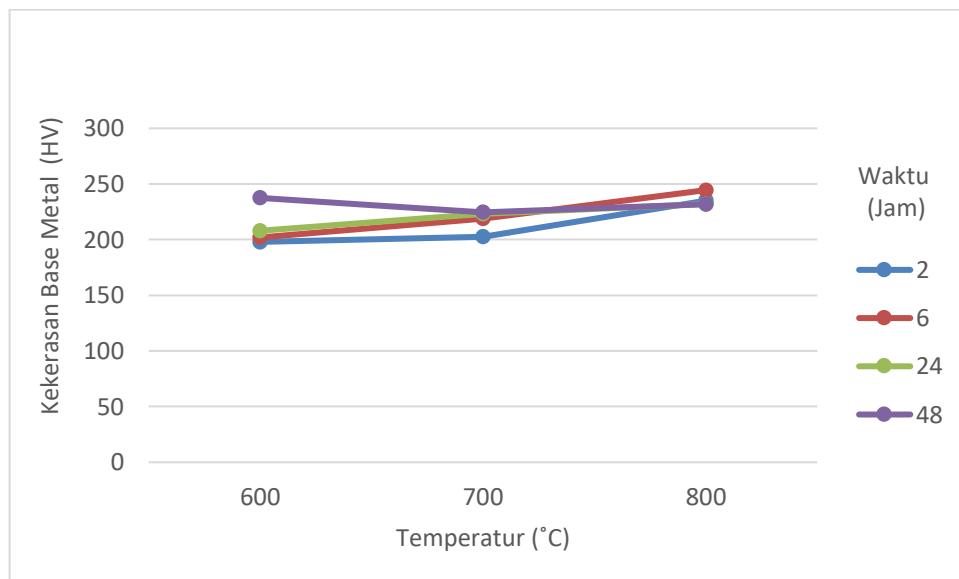
Kekerasan permukaan bahan Ti-29Nb-13Ta-4.6Zr (TNTZ) meningkat secara signifikan melalui proses oksidasi termal. Gambar kekerasan pada lapisan oksida menunjukkan tren yang konsisten yang meningkat seiring dengan peningkatan suhu dan waktu tahan. Kekerasan meningkat dari 377 HV (2 jam) menjadi 400 HV (48 jam) pada 600°C dan 424 HV menjadi 467 HV pada 700°C. Pada 800°C, kekerasan mencapai titik tertingginya, 473 HV (2 jam) hingga 502 HV (48 jam). Disebabkan oleh difusi oksigen yang lebih intens pada temperatur tinggi, lapisan oksida TiO₂ yang lebih tebal dan padat muncul bersamaan dengan peningkatan ini.

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa tren ini sejalan dengan teori pertumbuhan oksida difusional, yang mengatakan bahwa pembentukan lapisan oksida keras yang berfungsi sebagai lapisan pengerasan permukaan dipercepat oleh

peningkatan energi termal[8]. Penelitian terdahulu juga menunjukkan bahwa waktu oksidasi yang lebih lama menyebabkan lapisan oksida berkembang lebih keras, yang menghasilkan peningkatan besar dalam kekerasan permukaan [9][10].

Kekerasan logam dasar meningkat pada 600°C dan 700°C. Kekerasan meningkat dari 198 HV menjadi 237,5 HV pada 600°C dan dari 202,5 HV menjadi 224,5 HV pada 700°C. Namun, peningkatan tidak linier pada 800°C; setelah meningkat dari 235 HV menjadi 244,5 HV selama 6 jam, kekerasan justru turun menjadi 232 HV pada 24–48 jam. Penurunan ini menunjukkan saturasi difusi oksigen serta kemungkinan perubahan struktur mikro yang dapat menyebabkan tegangan residu di daerah logam dasar. Fenomena ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa oksidasi ekstrem dapat menyebabkan difusi oksigen berlebih, yang mengurangi stabilitas mekanik daerah logam dasar [11][12].

b. Ketebalan Lapisan Oksida (*Oxide Scale Thickness*)



Gambar 4. Grafik Uji Kekerasan pada Base Metal (BM) TNTZ

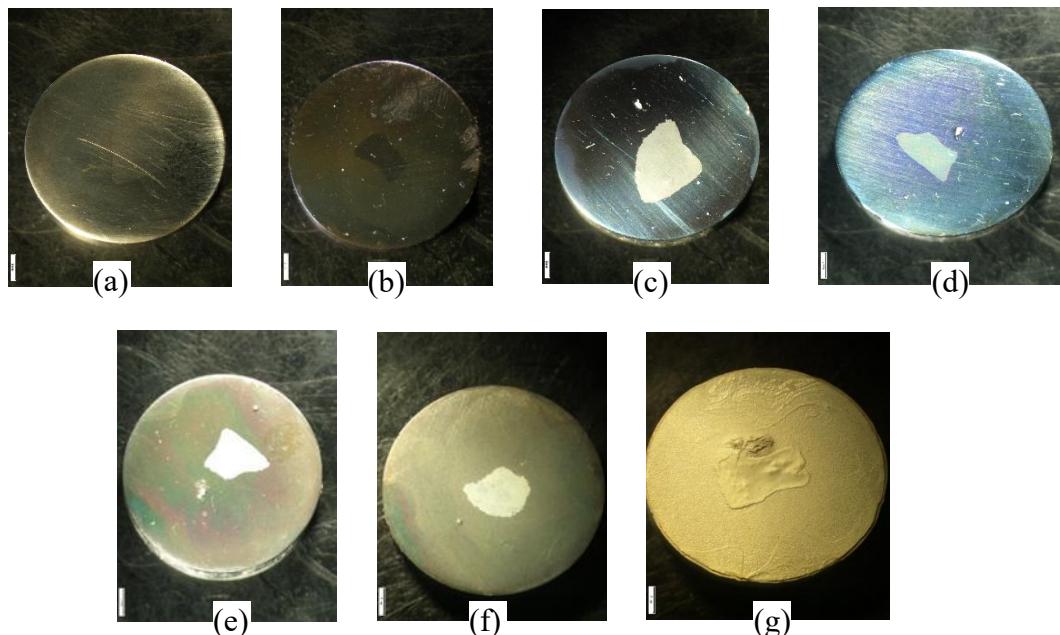
Setelah oksidasi termal, ketebalan lapisan permukaan meningkat pada seluruh variasi temperatur dan waktu tahan. Namun, nilai ketebalan diukur—khususnya selama 24–48 jam pada 800°C. Pada 600°C, ketebalan lapisan meningkat perlahan dari 131,8 µm menjadi 135,9 µm; pada 700°C, meningkat dari 139,3 µm menjadi 154,7 µm, dengan sedikit perubahan selama 6 jam penyimpanan; dan pada 800°C, nilai ketebalan meningkat secara signifikan dari 144,8 µm menjadi 358 µm (24 jam)

Pengaruh Termal Oksidasi Terhadap Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro Ti-29Nb-13Ta-4,6Zr Sebagai Material *Implant* (Muh Azizul, Zuldesmi Mansjur, Yohanis Rampo)

dan 630,5 μm (48 jam).

Lapisan oksida titanium (TiO_2) yang terbentuk melalui proses oksidasi panas biasanya berada pada rentang mikrometer tipis ($\leq 5\text{--}50 \mu\text{m}$) [13]. Oleh karena itu, nilai ketebalan ratusan mikrometer tidak menunjukkan ketebalan TiO_2 kompak; sebaliknya, itu menunjukkan ketebalan total oksida skala, yang mencakup: lapisan oksida, pori dan rongga oksida, lapisan yang rapuh karena panas berlebihan, kemungkinan pengelupasan. Selain itu, pengukur ketebalan GM 280 memberikan nilai yang jauh lebih besar dari ketebalan oksida sebenarnya karena alat ini memiliki keterbatasan dalam mengukur lapisan oksida keramik tipis dan cenderung membaca seluruh perubahan permukaan. Oleh karena itu, nilai ketebalan yang diperoleh pada suhu ekstrim (terutama pada 800°C selama 24–48 jam) harus dipahami sebagai ketebalan skala permukaan (*oxide scale*) daripada ketebalan lapisan TiO_2 yang konsisten. Tetapi tren untuk meningkatkan ketebalan skala oksida masih berlaku, menunjukkan bahwa durasi dan temperatur oksidasi memainkan peran penting dalam intensitas pertumbuhan oksida.

c. Morfologi Permukaan Material



Gambar 6. Hasil foto perlakuan material (a) Tampa perlakuan (Sebelum termal Oksidasi) (b) Sampel A1 temperatur 600°C selama 2 jam), (c) Sampel A3 temperatur 600°C selama 24 jam), (d) Sampel B1 temperatur 700°C selama 2 jam), (e) Sampel B3 temperatur 700°C selama 24 jam), (f) Sampel C1 temperatur 800°C selama 2 jam), (g) Sampel C4 temperatur 800°C selama 48 jam) (Setelah termal oksidasi)

Sampel tanpa perlakuan dan sampel setelah oksidasi termal memiliki perubahan warna permukaan yang jelas. Warna logam menjadi keperakan pada permukaan material sebelum dipanaskan. Pada 600°C dan 700°C, warna permukaan berubah dari keabu-abuan terang menjadi putih, dan pada 800°C, permukaan tampak sangat cerah dengan warna putih keperakan yang kuat, yang menunjukkan bahwa skala oksida yang lebih tebal telah meningkat [14].

Menurut literatur, perubahan warna titanium oksida sangat terkait dengan peningkatan ketebalan oksida, karena lapisan titanium oksida memiliki reflektansi optik yang lebih tinggi (60–80 persen) dibandingkan dengan permukaan logam (sekitar 20%). Warna putih terang menunjukkan terbentuknya lapisan oksida berpori dan tebal, yang biasanya terjadi pada suhu tinggi [15], [16].

d. Pengamatan SEM

Hasil SEM memperlihatkan adanya lapisan oksida pada seluruh spesimen yang mengalami oksidasi. Pada 600°C, lapisan oksida cenderung tipis dan homogen. Pada 700°C, lapisan semakin tebal dengan struktur yang lebih jelas dan pori-pori yang mulai berkembang. Pada 800°C, lapisan oksida tampak sangat tebal, tidak homogen, dan menunjukkan tekstur kasar yang merupakan karakteristik *oxide scale* akibat oksidasi intens pada temperatur tinggi.

Pengamatan SEM ini mendukung interpretasi bahwa nilai ketebalan yang sangat besar merupakan hasil dari pertumbuhan *oxide scale*, bukan lapisan TiO₂ kompak. Struktur berpori dan tebal yang terlihat pada 800°C menjadi indikasi bahwa oksidasi telah mencapai tahap lanjutan, di mana laju pertumbuhan oksida meningkat secara eksponensial dan menyebabkan ketebalan berlebih.

e. Hubungan Kekerasan, Ketebalan Oxide Scale, dan Morfologi

Peningkatan kekerasan permukaan berbanding lurus dengan pertumbuhan lapisan oksida. Semakin tebal *oxide scale*, semakin tinggi kekerasan permukaan akibat dominasi fase TiO₂ yang memiliki kekerasan tinggi. Namun, pada Base Metal (BM), peningkatan kekerasan tidak selalu berlanjut, terutama pada temperatur ekstrem seperti 800°C. Kondisi ini menunjukkan bahwa difusi oksigen yang terlalu masif ke lapisan bawah dapat menimbulkan tegangan residu atau perubahan mikrostruktur yang mengakibatkan penurunan kekerasan.

Pengaruh Termal Oksidasi Terhadap Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro Ti-29Nb-13Ta-4,6Zr Sebagai Material *Implant* (Muh Azizul, Zuldesmi Mansjur, Yohanis Rampo)

Hubungan antara hasil pengujian menunjukkan bahwa:

- 1) Temperatur tinggi meningkatkan pertumbuhan lapisan oksida dan kekerasan permukaan
- 2) Waktu tahan lama memperkuat efek oksidasi
- 3) Ketebalan *oxide scale* yang sangat besar bukan lapisan oksida kompak, tetapi fenomena pertumbuhan skala akibat oksidasi berlebih
- 4) Pengaruh pada BM menjadi tidak stabil pada kondisi ekstrem

Hal ini penting untuk aplikasi biomedis, karena lapisan yang terlalu tebal dan berpori dapat menurunkan integritas adhesi dan durabilitas jangka panjang, meskipun meningkatkan kekerasan permukaan

4. KESIMPULAN DAN SARAN

a. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa proses oksidasi termal berpengaruh signifikan terhadap sifat mekanik dan karakteristik permukaan paduan Ti-29Nb-13Ta-4.6Zr (TNTZ). Peningkatan temperatur dan durasi oksidasi menghasilkan pembentukan *oxide scale* yang semakin tebal serta meningkatkan kekerasan permukaan material. Kekerasan lapisan oksida meningkat secara konsisten pada semua variasi temperatur dan waktu tahan, dengan nilai tertinggi diperoleh pada 800°C selama 48 jam. Di sisi lain, peningkatan kekerasan pada daerah Base Metal (BM) hanya terjadi pada 600°C dan 700°C, sementara pada 800°C cenderung menurun pada waktu tahan yang lebih lama akibat saturasi difusi oksigen dan perubahan mikrostruktur internal.

Ketebalan *oxide scale* yang terbentuk menunjukkan peningkatan signifikan seiring bertambahnya temperatur dan waktu tahan, meskipun nilai yang sangat tinggi pada temperatur ekstrem lebih merepresentasikan ketebalan total skala oksida, bukan lapisan TiO₂ kompak. Pengamatan visual dan SEM mengonfirmasi terbentuknya lapisan oksida pada seluruh perlakuan, dengan struktur yang semakin kasar dan porositas meningkat pada temperatur tinggi dan durasi panjang.

Secara keseluruhan, oksidasi termal memberikan peningkatan kekerasan permukaan yang bermanfaat untuk aplikasi implan, namun pertumbuhan *oxide scale* berlebih dan penurunan kekerasan BM pada kondisi ekstrem perlu menjadi pertimbangan untuk menghindari penurunan stabilitas mekanik jangka panjang.

Temperatur optimum dapat dipertimbangkan pada kisaran 600–700°C dengan durasi moderat, di mana peningkatan kekerasan permukaan diperoleh tanpa mengorbankan integritas substrat.

b. Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan, beberapa saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

- 1) **Perlu dilakukan pengukuran ketebalan lapisan oksida menggunakan metode karakterisasi yang lebih akurat**, seperti *cross-section SEM*, *Focused Ion Beam (FIB)*, atau *ellipsometry*, untuk mendapatkan ketebalan lapisan TiO₂ kompak secara presisi.
- 2) **Perlu dilakukan analisis fasa menggunakan X-ray Diffraction (XRD)** untuk memastikan jenis fasa oksida serta hubungannya dengan peningkatan kekerasan dan perubahan morfologi permukaan.
- 3) **Penelitian lanjutan dapat menguji ketahanan aus (*wear resistance*)** dari lapisan oksida yang terbentuk, mengingat peningkatan kekerasan permukaan umumnya berkorelasi dengan peningkatan ketahanan terhadap gesekan dan aus, yang penting untuk aplikasi biomedis.
- 4) **Uji korosi dalam media simulasi cairan tubuh (SBF/Ringer's solution)** sangat direkomendasikan untuk mengevaluasi stabilitas dan ketahanan lapisan oksida dalam kondisi yang mendekati lingkungan implan sebenarnya.
- 5) **Perlu dievaluasi efek oksidasi termal terhadap sifat biokompatibilitas**, misalnya melalui uji sitotoksitas atau *cell adhesion test*, mengingat tujuan utama material TNTZ adalah untuk aplikasi implan.
- 6) **Penelitian dapat diperluas pada variasi temperatur yang lebih rendah (400–550°C)** untuk mengidentifikasi rentang optimum pembentukan lapisan oksida tipis yang stabil tanpa menghasilkan *oxide scale* berlebih yang dapat menurunkan integritas substrat.
- 7) **Simulasi numerik atau pemodelan kinetika oksidasi** dapat digunakan untuk memprediksi pertumbuhan lapisan oksida dan menentukan parameter proses yang paling efisien.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Y. Li, C. Yang, H. Zhao, S. Qu, X. Li, and Y. Li, "New Developments of Ti-Based Alloys for Biomedical Applications," *mater.*, vol. 7, pp. 1709–1800, 2014, doi: 10.3390/ma7031709.
- [2] H. Yilmazer, "Physical Vapor Deposited TiN and TiAlN on Biomedical β - Type Ti-29Nb-13Ta-4 . 6Zr: Microstructural Characteristics , Surface Hardness Enhancement , and Antibacterial Activity," *coatings*, vol. 15, pp. 1–22, 2025.
- [3] S. Anderson, J. Affi, Y. Yetri, M. Niinomi, T. Akahori, and Gunawarman, "Improving the Corrosion Resistance of TNTZ in Hanks ' Solution after Thermomechanical Treatment," *J. Hunan Univ.*, vol. 49, no. 11, 2022.
- [4] Y. Tsutsumi *et al.*, "Electrochemical Surface Treatment of a β -titanium Alloy to Realize an Antibacterial Property and Bioactivity," *Metals (Basel)*., vol. 6, 2016, doi: 10.3390/met6040076.
- [5] Zuldesmi *et al.*, "The Influence of Thermal Oxidation on Hardness and Microstructure of Beta-Type Titanium Alloy Ti-29Nb-13Ta-4 . 6Zr (TNTZ)," *J. Adv. Res. Fluid Mech. Therm. Sci.*, vol. 96, no. 1, pp. 127–136, 2022.
- [6] F. S. Ahmed, M. A. El Zomor, M. S. A. Ghazala, and R. N. Elshaer, "Effect of oxide layers formed by thermal oxidation on mechanical properties and NaCl - induced hot corrosion behavior of TC21 Ti - alloy," *Sci. Rep.*, vol. 12, pp. 1–17, 2022, doi: 10.1038/s41598-022-23724-6.
- [7] E. Takematsu, K. Noguchi, K. Kuroda, T. Ikoma, M. Niinomi, and N. Matsushita, "In vivo osteoconductivity of surface modified Ti-29Nb-13Ta-4 . 6Zr alloy with low dissolution of toxic trace elements," *PLoS One*, vol. 13, no. 1, pp. 1–12, 2018.
- [8] S. P. Metallurgy, "The Cyclic Oxidation and Hardness Characteristics of Thermally Exposed Titanium Prepared by Inductive Sintering-Assisted Powder Metallurgy," *Crystals*, vol. 10, 2020.
- [9] T. N. Rohmannudin, L. Noerochim, C. R. Luthfiansyah, and R. A. Tanjung, "ANALISIS PENGARUH VARIASI HOLDING TIME ANNEALING TERHADAP LAJU KOROSI TITANIUM PADA LARUTAN CAIRAN," *J. Rekayasa Mesin*, vol. 14, no. 3, pp. 1067–1080, 2023, doi: 10.21776/jrm.v14i3.1654.
- [10] F. S. Ahmed, M. A. El Zomor, M. S. A. Ghazala, and R. N. Elshaer, "Impact of thermal oxidation parameters on micro - hardness and hot corrosion of Ti-6Al-3Mo-2Nb-2Sn-2Zr-1.5Cr alloy," *Sci. Rep.*, vol. 13, pp. 1–19, 2023, doi: 10.1038/s41598-023-38216-4.
- [11] K. Aniołek, "The influence of thermal oxidation parameters on the growth of oxide layers on titanium," *Vacuum*, vol. 144, pp. 94–100, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2017.07.023>.
- [12] Y. Ren, J. Xu, Y. Wei, Y. Liu, J. Zhu, and S. Liu, "Effect of Interstitial Oxygen on the Microstructure and Mechanical Properties of Titanium Alloys : A Review," *Crystals*, vol. 15, 2025.

- [13] S. A. Heredia, B. A. Wols, D. R. Yntema, and R. G. H. Lammertink, “Advanced ceramics in radical filtration : TiO₂ layer thickness effect on the photocatalytic membrane performance,” *J. Memb. Sci.*, vol. 672, no. January, p. 121423, 2023, doi: 10.1016/j.memsci.2023.121423.
- [14] Y. Watanabe, N. Mitsuishi, M. Yamada, H. Sato, S. Takashima, and E. Miura-Fujiwara, “Formation of Graded TiO₂ Layer on Ti Wire by Direct Alternating Current Discharge Plasma at Atmospheric Pressure,” *Metals (Basel)*., vol. 14, pp. 1–15, 2024.
- [15] F. Aslan, H. Esen, and F. Yakuphanoglu, “Investigation of Optical Properties of TiO₂ Nano Powder,” *Nat. Eng. Sci.*, vol. 5, no. 2, pp. 68–72, 2020.
- [16] R. Zhou, T. Huang, Y. Lu, and M. Hong, “applied sciences Tunable Coloring via Post-Thermal Annealing of Laser-Processed Metal Surface,” *Appl. Sci.*, vol. 8, 2018, doi: 10.3390/app8101716.