

PENGARUH PENAMBAHAN ZIRKONIUM PADA PADUAN Fe-17Ni-17Cr-7,7Al-4Cu TERHADAP OKSIDASI ISOTERMAL

Dachi Diputro Niko¹⁾, Eddy Agus Basuki²⁾

Teknik Metalurgi, Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan Institut Teknologi Bandung

Email: dachidn@students.itb.ac.id¹⁾, basuki@mining.itb.ac.id²⁾

Abstrak

Energi listrik merupakan salah satu yang tidak terpisahkan dengan manusia. Sebanyak 53% PLTU sebagai penopang utama pembangkit listrik di Indonesia saat ini, cadangan listrik Indonesia belum aman dan memungkinkan menghambat pertumbuhan industri dan ekonomi. Dalam keberlangsungan PLTU, efisiensi panas merupakan faktor penting dalam menentukan jumlah listrik yang dihasilkan. Semakin tinggi efisiensi panas untuk suatu jumlah batubara tertentu, jumlah listrik yang dihasilkan pun semakin besar. Oleh karena itu, cara yang paling praktis untuk meningkatkan efisiensi PLTU adalah dengan menaikkan temperatur uap. Tuntutan untuk merealisasikan efisiensi energi ini bertujuan menekan emisi CO₂ sebagai bentuk kepedulian negara terhadap efek rumah kaca, sehingga pemilihan material sangat diperhatikan. Material yang digunakan harus memiliki kekuatan yang tinggi, ekspansi termal yang rendah, dan konduktivitas termal yang baik pada temperatur tinggi. Selain itu, memiliki ketahanan oksidasi dan korosi temperatur tinggi merupakan salah satu kriteria yang dibutuhkan. Material yang umumnya digunakan sebagai komponen turbin uap adalah Ni-based superalloy, Fe ferritic, dan Fe austenitic. Akan tetapi, dengan harga nikel yang cukup mahal menjadi salah satu kendala dalam penggunaan paduan logam atau baja yang mengandung nikel. Namun, dibutuhkan material yang memiliki kualitas bersaing dan produksi yang lebih murah, salah satunya dengan menggunakan material paduan berbasis Fe. Sehingga dalam penelitian ini menganalisis pengaruh penambahan zirkonium (Zr) pada paduan Fe-17Ni-17Cr-7,7Al-4Cu terhadap oksidasi isothermal. Penelitian ini membandingkan penambahan Zr dengan berbagai kandungan, yaitu 0,0; 0,1; 0,4; 1,0. Kemudian dilakukan pengujian oksidasi isothermal yang bervariasi pada temperatur 700, 800, dan 900°C dan waktu 2, 10, dan 40 jam. Hasil penelitian menunjukkan paduan dengan kandungan Zr sebesar 1wt.%, memiliki selisih penambahan/pengurangan massa/berat per luas penampang awal yang cenderung sedikit dibandingkan lainnya. Pembentukan lapisan kerak oksida Al₂O₃ (alumina) dan Cr₂O₃ (kromina) sebagai oksida protektif terjadi pada bagian terluar/antarmuka dan ditemukan bahwa penambahan Zr membantu pembentukan lapisan kerak oksida Al₂O₃ serta bergabung dengan. Al₂O₃ membentuk presipitat ZrO₂. Kekerasan paduan Fe-17Ni-17Cr-7,7Al-4Cu seiring penambahan Zr mengalami peningkatan, dengan kekerasan tertinggi adalah 225,7 HVN pada penambahan 1%Zr.

Kata Kunci: pembangkit listrik, oksidasi isothermal, zirkonium, Al₂O₃

Abstract

Electrical energy is one that cannot be separated from humans. As much as 53% of PLTU as the main support for power plants in Indonesia at this time, Indonesia's electricity reserves are not yet safe and it is possible to hinder industrial and economic growth. In the sustainability of PLTU, heat efficiency is an important factor in determining the amount of electricity generated. The higher the heat efficiency for a given amount of coal, the greater the amount of electricity generated. Therefore, the most practical way to increase the efficiency of PLTU is to increase the steam temperature. This demand to realize energy efficiency aims to reduce CO₂ emissions as a form of state concern for the greenhouse effect, so that material selection is very important. The material used must have high strength, low thermal expansion, and good thermal conductivity at high temperatures. In addition, having high temperature oxidation and corrosion resistance is one of the required criteria. Materials that are generally used as components of steam turbines are Ni-based superalloy, Fe ferritic, and Fe austenitic. However, the price of nickel which is quite expensive is one of the obstacles in the use of metal alloys or steels containing nickel. However, it takes materials that have competitive quality and cheaper production, one of which is by using Fe-based alloy materials. So, in this study, we analyzed the effect of adding zirconium (Zr) to Fe-17Ni-17Cr-7,7Al-4Cu alloy on isothermal oxidation. This study compared the addition of Zr with various contents, namely 0.0; 0.1; 0.4; 1.0. Then, various isothermal oxidation tests were carried out at temperatures of 700, 800, and 900°C and time of 2, 10, and 40 hours. The results showed that alloys with a Zr content of 1wt.%, had a slight difference in addition/subtraction of mass/weight per initial cross-sectional area compared to others. The formation of the Al₂O₃ and Cr₂O₃ oxide scales as protective oxides occurred at the outer surface/interface and the addition of Zr helped the formation of the Al₂O₃ oxide scale layer as well as joining. Al₂O₃ forms ZrO₂ precipitates. The hardness of the Fe-17Ni-17Cr-7,7Al-4Cu alloy increased with the addition of Zr, with the highest hardness being 225.7 HVN at the addition of 1% Zr.

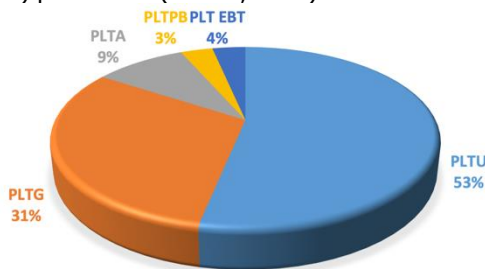
Keywords: power plants, oxidation isothermal, zirconium, Al₂O₃

I. PENDAHULUAN

Salah satu energi yang tidak dapat terpisahkan dalam kehidupan manusia adalah energi listrik untuk beraktifitas dan bertahan hidup. Pada saat ini

cadangan listrik Indonesia di beberapa tempat dikatakan belum aman yang memungkinkan menghambat pertumbuhan industri dan ekonomi nasional. Direktur Jenderal Ketenagalistrikan Kementerian ESDM memaparkan, konsumsi listrik per kapita nasional berada di level 1.089 kWh/kapita pada tahun 2020, meleset 5% dari target yang ditetapkan oleh pemerintah, yaitu 1.142 kWh/kapita (Purnama dan Yuniarto, 2021).

Sejak tahun 2018 pengembangan pembangkit di Indonesia mulai difokuskan pada pengembangan pembangkit-pembangkit berbasis energi baru terbarukan (EBT) serta melakukan peningkatan teknologi batubara bersih/*Clean Coal Technology* (CCT) pada PLTU (Pribadi, 2020).



Gambar 1. Persentase kapasitas pembangkit listrik sampai pada Juni 2020

Sebanyak 53% PLTU (**Gambar 1**) sebagai sumber listrik yang terbesar dan penopang utama yang digunakan di Indonesia. Pembangkit listrik ini memanfaatkan energi fosil untuk memanaskan air dalam *boiler* sehingga menghasilkan uap untuk memutar turbin yang dapat menghasilkan listrik. Selain itu, Indonesia pun sedang berencana melakukan proyek pembangunan pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) di Jepara, Bangka, dan Kalimantan Barat pada daerah yang tidak rawan gempa (Umah, 2021). Mekanisme PLTN ini pun tidak berbeda jauh dengan PLTU, yaitu memanfaatkan energi nuklir untuk memanaskan air di dalam *boiler* sehingga menghasilkan uap yang menggerakkan turbin untuk menghasilkan listrik.

Turbin pada pembangkit listrik tenaga uap menjadi komponen terpenting sehingga pemilihan material yang digunakan sangat diperhatikan. Material yang digunakan harus memiliki kekuatan yang tinggi, ekspansi termal yang rendah, dan konduktivitas termal yang baik pada temperatur tinggi. Selain itu, memiliki ketahanan oksidasi dan korosi temperatur tinggi merupakan salah satu kriteria yang dibutuhkan. Material yang umumnya digunakan sebagai komponen turbin uap adalah Ni-based *superalloy*, Fe *ferritic*, dan Fe *austenitic*. Akan tetapi, dengan harga nikel yang cukup mahal menjadi salah satu kendala dalam penggunaan paduan logam atau baja yang mengandung nikel. Fe *austenitic* umumnya ditujukan untuk pipa (*tube*) *superheater* dan *reheater* merupakan komponen paling kritis dalam pembangkit listrik (Basuki, 2016; Yin dkk., 2014). Namun, pengembangan terhadap Fe *austenitic* membuat penggunaan semakin meluas, khususnya pada penggunaan ekstrem terhadap korosi dan oksidasi. Ketika temperatur operasi

melebihi 630°C, Fe *austenitic* menjadi pilihan yang digunakan untuk komponen *boiler*, penutup (*headers*), pipa uap (*steam tubing/piping*), dan rotor pada turbin. Akibat permintaan terhadap penggunaan untuk temperatur tinggi pada pembangkit listrik, maka akan lebih banyak kebutuhan terhadap Fe *austenitic* kedepannya (Yin dkk., 2014).

Pengembangan material akan dilakukan secara berlanjut, agar mendapatkan biaya dan kualitas yang bersaing dengan menciptakan paduan yang memiliki sifat yang dibutuhkan. Utamanya memiliki ketahanan oksidasi yang lebih baik dikarenakan penggunaan pada temperatur tinggi. Penambahan zirkonium (Zr) dapat mengecilkan ukuran oksida terdispersi (*dispersoid*) pada paduan baja feritik ODS dibandingkan paduan yang tidak ditambahkan Zr, sehingga dapat meningkatkan kekuatan pada temperatur tinggi dan ketahanan *hot corrosion* (Gao dkk., 2014). Memanfaatkan unsur Zr yang memiliki ketahanan oksidasi temperatur tinggi yang baik guna menunjang peningkatan kehandalan dari material tersebut.

Pembentukan oksida Al_2O_3 dan Cr_2O_3 pada permukaan paduan dapat bertindak sebagai oksida protektif pada paduan AFA SS (*Alumina Forming Austenitic Stainless Steel*) atau baja tahan karat austenitik pembentuk alumina merupakan salah satu paduan yang dapat digunakan untuk *superheater tubes* pada pembangkit listrik berbahan bakar fosil pada temperatur tinggi. Penambahan unsur zirkonium dengan kadar tertentu dapat meningkatkan ketahanan *hot corrosion* dengan meningkatkan adhesi atau kelekatan oksida protektif (Cheng dkk., 2013). Maka dari itu, penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh penambahan zirkonium terhadap ketahanan oksidasi isothermal.

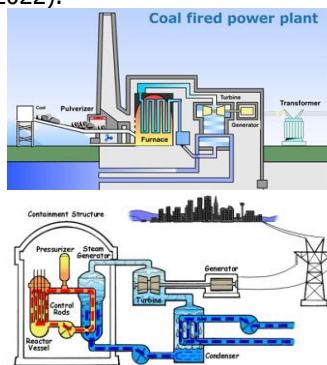
II. LANDASAN TEORI Pembangkit Listrik

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) menghasilkan energi listrik dengan membakar bahan bakar, memanaskan air dalam tungku pemanas menghasilkan uap bertekanan tinggi digunakan untuk menggerakkan turbin, seperti ditunjukkan secara skematik pada Gambar 2.1. Uap yang dihasilkan dapat mencapai tekanan 22 MPa dengan temperatur 540°C pada pembangkit listrik berbahan bakar batubara modern, dan baik temperatur dan tekanan uap ini terus ditingkatkan untuk menaikkan efisiensi proses.

Dalam keberlangsungan proses di PLTU, efisiensi panas merupakan faktor penting dalam menentukan jumlah listrik yang dihasilkan. Semakin tinggi efisiensi panas untuk suatu jumlah batubara tertentu, jumlah listrik yang dihasilkan pun semakin besar. Siklus Carnot merupakan suatu siklus mesin kalor yang digunakan dalam menentukan efisiensi energi proses PLTU berdasarkan perbedaan temperatur dua *reservoir* dalam sistem (Teir, 2002). Efisiensi siklus Carnot didefinisikan sebagai $(T_{max} - T_{min})/T_{max}$, dimana T_{max} dan T_{min} masing-masing merupakan

temperatur absolut maksimum dan minimum siklus termodinamika (Wright dan Woodford, 2004). Oleh karena itu, cara yang paling praktis untuk meningkatkan efisiensi PLTU adalah dengan menaikkan temperatur uap. Tuntutan untuk merealisasikan efisiensi energi ini bertujuan menekan emisi CO₂ sebagai bentuk kepedulian negara terhadap efek rumah kaca (Basuki, 2016).

Pembangkit listrik energi nuklir (PLTN) sistem operasinya sama seperti pembangkit listrik tenaga uap dengan batubara, pembangkit listrik energi nuklir menggunakan uap untuk memutar turbin yang terhubung ke generator untuk menghasilkan listrik. Setelah uap melewati turbin dan membuat baling-baling berputar akan mendorong generator untuk menghasilkan tenaga. Uap ini kembali ditarik ke kondensor seperti di pembangkit listrik tenaga uap dengan batubara. Setelah uap melewati poros turbin ditarik ke kondensor. Selama langkah ini, jutaan galon air dingin dari sumber terdekat (seperti waduk, sungai atau danau) dipompa melalui jaringan tabung yang mengalir melalui kondensor. Air yang lebih dingin ini mengubah uap kembali menjadi cairan dan dapat digunakan berulang kali di pabrik. Air pendingin dikembalikan ke sumbernya tanpa kontaminasi. Air terkondensasi dikembalikan ke boiler untuk mengulangi siklus kembali (Deep Trekker, 2022).



Gambar 2. Skema PLTU dan PLTN

Paduan Fe-Ni-Cr-Al

Berbagai industri dalam prosesnya sering melibatkan lingkungan agresif yang dicirikan oleh temperatur dan tekanan yang tinggi, gradien temperatur yang cenderung meningkat, bekerjanya tegangan luar yang besar, lingkungan yang oksidatif dan korosif. Maka dari itu diperlukan material yang mampu digunakan pada temperatur yang tinggi. Baja tahan panas austenitik diharapkan memiliki sifat mekanik yang sangat baik pada temperatur tinggi. Kebanyakan baja tahan panas austenitik konvensional membentuk lapisan kerak oksida (*scale*) Cr₂O₃, yang melindungi baja dalam berbagai lingkungan oksidasi/korosi suhu tinggi. Namun, stabilitas termal Cr₂O₃ lebih rendah dibandingkan Al₂O₃ di lingkungan mengandung senyawa agresif seperti C, S, dan Cl₂ pada temperatur yang lebih tinggi. Dengan demikian, menggunakan *scale* Al₂O₃ sebagai lapisan oksida pelindung, karena memberikan ketahanan oksidasi yang lebih baik di TEDC Vol. 16 No. 3, September 2022

lingkungan agresif tersebut. Namun, hanya baja feritik dan paduan berbasis Ni yang tersedia untuk membentuk *scale* Al₂O₃ dalam sistem paduan tahan panas saat ini. Secara umum sifat mekanik baja feritik pada temperatur tinggi tidak cukup untuk membuatnya menjadi komponen struktural. Dengan demikian, satu-satunya paduan yang tersedia yang membentuk *scale* Al₂O₃ yang dapat digunakan pada temperatur tinggi lebih dari 700°C adalah paduan berbasis Ni. Meskipun paduan berbasis Ni memiliki sifat mekanik dan kinerja oksidasi yang sangat baik, paduan ini jauh lebih mahal daripada baja lainnya. Oleh karena itu, perlu dikembangkan baja tahan panas austenitik pembentuk *scale* Al₂O₃ yang dapat diproduksi dengan proses konvensional berbiaya rendah seperti *hot rolling* (Hayashi dkk., 2019).

Baja austenitik pembentuk kerak Al₂O₃ membutuhkan kandungan Al yang lebih tinggi untuk pembentukan kerak Al₂O₃. Hal ini karena difusivitas yang lebih kecil dari unsur-unsur terlarut dalam matriks FCC. Penambahan lebih dari 20at%Al diperlukan untuk membentuk kerak Al₂O₃ pada paduan Fe-20%Ni, dan kandungan Al yang dibutuhkan dengan meningkatnya kandungan Ni (Tomaszewicz dan Wallwork, 1984). Namun, penambahan Al yang lebih tinggi pada baja austenitik menghasilkan pengendapan BCC α-Fe dan berbagai senyawa yang mengandung Al yang lebih tinggi seperti fase β-(Fe,Ni)Al dan γ'-(Ni,Fe)₃Al (Eleno dkk., 2006). Karena pembentukan presipitat β-Fe(Ni)Al, kandungan Al dalam matriks tidak meningkat secara efektif. Akibatnya, kinerja oksidasi paduan tidak akan meningkat seperti yang diharapkan dengan penambahan Al dengan konsentrasi yang lebih tinggi.

Brady dkk, mengusulkan baja austenitik pembentuk *scale* Al₂O₃ yang memiliki ketahanan mulur yang baik karena pengendapan senyawa yang berbeda: β-(Fe,Ni)Al, Laves-Fe₂(Mo,Nb), dan karbida (Brady dkk., 2008; Yamamoto dkk., 2009). Brady dkk. juga menemukan baja ini memiliki ketahanan oksidasi yang baik karena penambahan Nb, yang secara signifikan menurunkan kandungan Al sebesar 2,5% berat untuk membentuk *scale* Al₂O₃ eksternal pada baja austenitik (Brady dkk., 2007). Pengendapan β-NiAl meningkatkan ketahanan mulur dari baja feritik (Sun dkk., 2013) dan austenitik (Satyanarayana dkk., 2002).

Namun, seperti disebutkan di atas, pembentukan endapan β-NiAl dapat menurunkan kinerja oksidasi. Selain itu, pembuatan baja yang mengandung endapan β-Fe(Ni)Al dengan metode konvensional seperti penggulangan akan sulit. Oleh karena itu, penurunan kandungan Al kritis yang diperlukan untuk pembentukan kerak Al₂O₃ eksternal pada baja austenitik diperlukan jika baja austenitik pembentuk Al₂O₃ baru akan dikembangkan.

Cu pada baja austenitik bermanfaat untuk pembentukan kerak oksida Al₂O₃. Selain itu, pengendapan Cu dalam baja tahan karat austenitik diketahui dapat meningkatkan sifat mekanik temperatur tinggi (Chi dkk., 2012; Laha dkk., 2007).

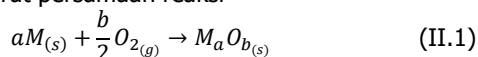
Kinetika oksidasi paduan Fe-Ni-Cr-Al dan Ni-Cr-Al menurun dengan meningkatnya kandungan paduan Cu. *Scale* Al₂O₃ eksternal dikembangkan dengan penambahan 4at%Cu dan 10at%Cu masing-masing pada paduan Fe-17Ni-17Cr-7,7Al dan Ni-17Cr-10Al. Pengaruh menguntungkan dari Cu dikaitkan dengan penurunan fraksi mol oksigen di permukaan paduan dan peningkatan difusi keluar Al. Pengaruh *cross-term* Ni terhadap difusi keluar Al pada paduan Fe-Ni-Cr-Al-Cu selanjutnya dapat menurunkan kandungan Al dan Cu hingga terbentuknya kerak Al₂O₃ eksternal (Hayashi dkk., 2019).

Zirkonium (Zr) digunakan dalam aplikasi nuklir karena memiliki karakteristik ketahanan oksidasi dan rasio kekuatan terhadap densitasnya dibandingkan dengan logam lain (Immanuel dkk., 2019). Logam zirkonium adalah logam yang sangat reaktif dan akan membentuk lapisan oksida secara spontan pada lingkungan yang mengandung oksigen (Nastiti dkk., 2014). Oleh karena itu, penambahan Cu dan Zr pada substrat austenitik diharapkan dapat bermanfaat baik untuk sifat mekanik maupun kinerja oksidasi pada temperatur yang lebih tinggi.

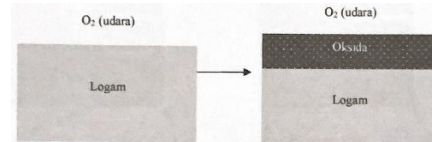
Oksidasi Paduan Logam

Oksidasi temperatur tinggi merupakan salah satu jenis serangan temperatur tinggi yang paling sering ditemukan. Logam akan cenderung untuk bereaksi dengan oksigen di udara dan membentuk kerak oksida yang lebih stabil. Oksidasi akan terjadi apabila pada aktivitas oksigen relatif tinggi pada suatu lingkungan seperti pada pembakaran dengan udara berlebih. Reaksi oksidasi secara sederhana merupakan proses reaksi antara logam dan oksigen, namun pada kenyataannya terdapat berbagai faktor yang mempengaruhi sifat oksidasi logam dan menyebabkan mekanisme reaksi yang terjadi terkadang cukup kompleks (Utami, 2017).

Mekanisme oksidasi temperatur tinggi melibatkan reaksi oksidasi secara sederhana dapat ditulis menurut persamaan reaksi

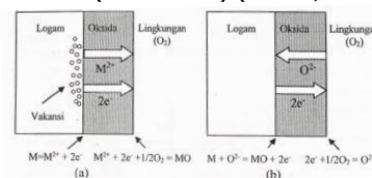


Pada dasarnya, logam yang digunakan manusia sehari hari berada pada kondisi tidak stabil secara termodinamika karena logam tersebut merupakan hasil ekstraksi. Bijih dalam kondisi reduktif sehingga akan cenderung mengalami oksidasi yakni bereaksi dengan udara atau oksigen dan membentuk kerak oksida yang mendekati bentuk asalnya di alam. Oksidasi dimulai dengan larutnya oksigen ke dalam lapisan permukaan logam. Jika konsentrasi oksigen di lapisan permukaan mencapai konsentrasi kesetimbangan maka lapisan oksida mulai terbentuk. M merupakan *metal* atau logam sedangkan MO adalah oksida logam sebagai produk korosinya. Secara skematik, oksidasi logam ditunjukkan pada **Gambar 3**.



Gambar 3. Skematik sederhana oksidasi (Basuki, 2016: 234)

Bagian awal proses oksidasi dimulai dengan reaksi di antarmuka logam-gas dan produk reaksi awal tersebut membentuk lapisan diantara logam dan gas atau biasa disebut lapisan kerak oksida. Oksida yang terbentuk tumbuh secara lateral untuk membentuk lapisan tipis oksida yang kontinu, kemudian dilanjutkan dengan pembentukan kerak oksida yang lebih tebal pada permukaan logamnya (Birks, Meier, dkk., 2006). Lapisan kerak oksida tersebut dapat bertindak sebagai barrier bag reaksi oksidasi lebih lanjut. Untuk reaksi dapat berlangsung lebih lanjut, satu atau lebih reaktan harus berpenetrasi melewati kerak tersebut; baik logam harus bergerak melalui kerak oksida ke lapisan antarmuka oksida-gas dan bereaksi di daerah tersebut, atau juga oksigen harus bergerak menuju lapisan antarmuka oksida-metal dan bereaksi di daerah tersebut. Oksidasi berlangsung pada antarmuka oksida-udara apabila difusi spesi yang mengandung ion logam (kation) ke arah luar lebih dominan daripada difusi spesi yang mengandung ion oksigen (anion) ke arah dalam. Pada kondisi seperti ini, pembentukan oksida berlangsung di bagian luar sehingga akan terbentuk vakansi pada bagian logam di bawah lapisan oksida yang terbentuk (**Gambar 4**) (Basuki, 2016).



Gambar 4. Mekanisme oksidasi logam, difusi spesi, dan reaksi antarmuka, (a) reaksi antarmuka oksida/udara; (b) antarmuka logam/oksida (Basuki, 2016)

Reaksi oksidasi pada awalnya dimulai dengan teradsorbsinya gas oksigen pada permukaan logam, pembentukan inti oksida yang akan tumbuh secara searah untuk membentuk lapisan tipis oksida yang kontinu, dan kemudian dilanjutkan pembentukan kerak oksida yang lebih pada permukaan logam (Birks, Meier, dkk., 2006). Selama proses pembentukan oksida, pembentukan nodul dan pengelupasan kerak oksida dapat terjadi dan bergantung pada sifat material dan kondisi operasinya (Kofstad, 1988). Kerak oksida ini dapat bertindak sebagai penghalang yang menahan reaksi oksidasi lebih lanjut karena lapisan oksida in akan memisahkan logam dari lingkungannya (Birks, Meier, dkk., 2006).

Kerak oksida yang kompak mampu melindungi substrat logam atau paduan dari oksidasi lebih lanjut. Indikator umum yang menentukan kemampuan kerak oksida dalam melindungi substrat paduan

dinyatakan dengan Pilling-Bedworth Ratio (PBR). PBR secara sederhana merupakan rasio antara volume oksida yang terbentuk terhadap volum logam yang terkonsumsi. PBR secara kompleks dapat ditulis dengan persamaan berikut.

$$PBR = \frac{1}{n[(m/r')/(M/R')]} \quad (II.2)$$

di mana m adalah berat molekul oksida; M adalah berat atom logam; r' adalah densitas atom logam; R' adalah densitas oksida; n adalah jumlah atom logam di dalam molekul oksida.

Jika $PBR < 1$, oksida yang terbentuk harus berpori agar volume oksida yang terbentuk sama jumlahnya dengan volum logam yang dikonsumsi. Hal ini tidak diinginkan karena oksida tidak akan menghambat oksidasi logam. Jika $PBR = 1$, kerak oksida protektif. Jika $PBR > 1$, oksida dapat mengalami tekanan karena volum oksida yang terbentuk sangat padat di antarmuka logam-oksida. Oksida dapat melengkung (*buckling*) dan dapat mengelupas (*spalling*) dari permukaan logam. Tegangan jenis ini merupakan jenis tegangan pertumbuhan (*growth stress*). Apabila terkelupasnya lapisan kerak oksida, maka logam akan terekspos kembali terhadap lingkungan yang oksidatif sehingga terjadi oksidasi lebih lanjut dengan kecepatan awal yang sangat cepat seperti yang terjadi pada awal proses oksidasi. Oleh karena itu, agar kerak oksida menjadi protektif maka harga PBR harus mendekati 1 atau antara 1 dan 2 (Basuki, 2016). **Tabel 1** menunjukkan harga PBR dari beberapa oksida logam.

Tabel 1. Harga PBR beberapa oksida logam (Birks, Heier, dkk., 2006)

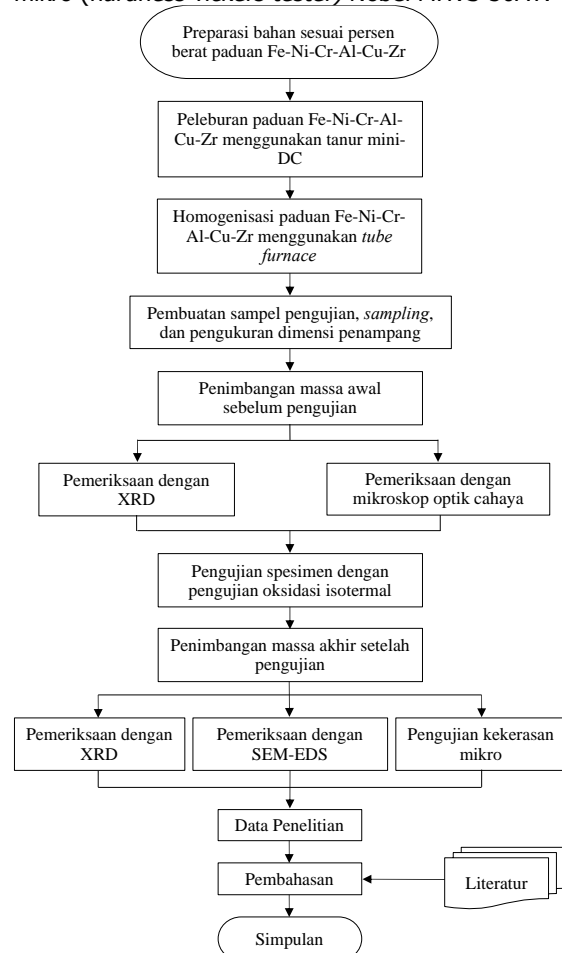
Oksida	PBR
K ₂ O	0,45
MgO	0,81
Na ₂ O	0,97
Al ₂ O ₃	1,28
ThO ₂	1,30
ZrO ₂	1,56
Cu ₂ O	1,64
NiO	1,65
FeO (pada α-Fe)	1,68
TiO ₂	1,70-1,78
CoO	1,86
Cr ₂ O ₃	2,07
Fe ₃ O ₄ (pada α-Fe)	2,10
Fe ₂ O ₃ (pada α-Fe)	2,14
Ta ₂ O ₅	2,50
Nb ₂ O ₅	2,68
V ₂ O ₅	3,19
WO ₃	3,30

III. METODE PENELITIAN

Alat dan Bahan

Dalam penelitian mengenai pengaruh penambahan zirkonium pada paduan Fe-17Ni-17Cr-7,7Al-4Cu terhadap oksidasi isothermal, bahan-bahan yang digunakan, yaitu: 1. Bahan logam (Fe, Ni, Cr, Al, Cu, dan Zr); 2. Gas argon *high purity* (HP); 3. Batang tungsten (*wolfram*) Ø 2,5 mm; 4. Cairan TEDC Vol. 16 No. 3, September 2022

pendingin (*coolant*); 5. Resin dan *hardener*; 6. Amplas dengan mesh 150, 400, 800, 1000, 1500, dan 2000; 7. Pasta *metal micropolish*; 8. Larutan etsa *aqua regia*. Peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah: 1. Alat pelindung diri (APD); 2. Mesin gergaji; 3. Penjepit (ragum); 4. Alat ukur jangka sorong/sigmat (*vernier caliper*); 5. Neraca digital; 6. *Combustion boat*; 7. Tanur mini-DC 230 volt; 8. Tanur tabung (*tube furnace*); 9. Mesin *grinding-polishing*; 10. *X-ray Diffraction* Rigaku SmartLab; 11. Mikroskop optik cahaya/*Light Optical Microscope* (LOM) Olympus GX51; 12. *Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive Spectroscopy* (SEM-EDS) Jeol JSM-6510A; 13. Mesin kekerasan mikro (*hardness vickers tester*) Nobel MHVS-50AT.



Gambar 5. Diagram alir prosedur penelitian

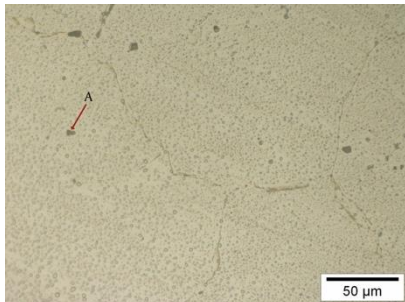
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Paduan Berbasis

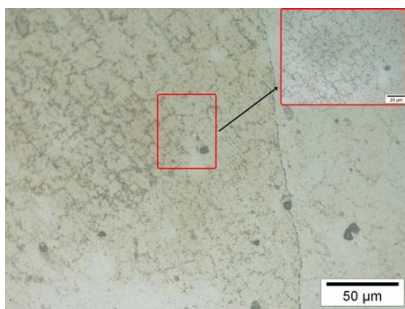
Hasil foto mikro ini merujuk pada penelitian Wang, dkk, baja austenitik yang ditambahkan Zr ditemukan beberapa presipitat yang teridentifikasi dari karakterisasi mikroskop optik, yaitu presipitat *base metal* dengan unsur O, presipitat dari oksida Zr, dan presipitat basis dari paduan (Wang dkk., 2019). Pada **Gambar 6** merupakan hasil karakterisasi menggunakan *light optical microscope* pada spesimen paduan Fe-17Ni-17Cr-7,7Al-4Cu dengan/tanpa kandungan Zr. Titik A merupakan

presipitasi yang terdispersi di dalam paduan Fe-17Ni-17Cr-7,7Al-4Cu yang pada umumnya mengandung Fe, Cr, dan Ni dengan sedikit unsur dari O. Pada paduan logam mengandung Zr (0,1, 0,4, dan 1,0), presipitat ditemukan 2 jenis, yaitu B dan C. Presipitat B umumnya mengandung oksida Zr, dan presipitat C umumnya mengandung Fe, Cr, dan Ni.

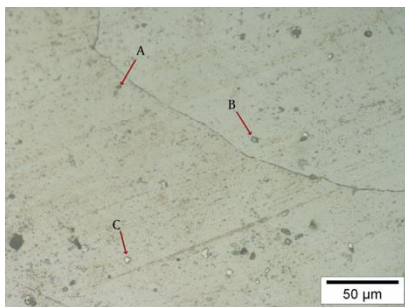
(a)



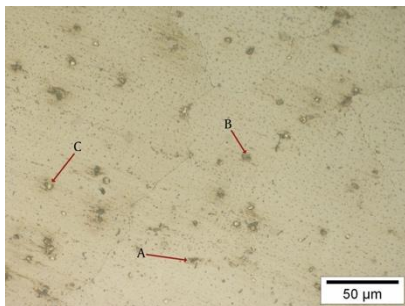
(b)



(c)



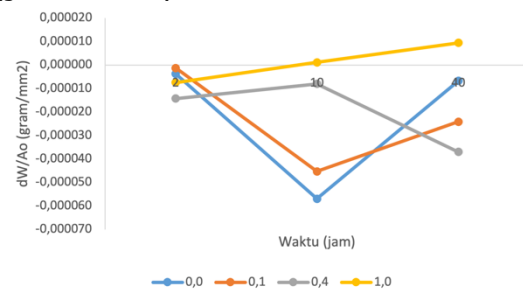
(d)



Gambar 6. Foto mikro dengan LOM (a) 0,0Zr; (b) 0,1Zr; (c) 0,4Zr; (d) 1,0Zr

Sebelum dan setelah melakukan pengujian oksidasi isothermal, paduan dilakukan penimbangan massa/berat awal dan akhir, untuk mengetahui perbandingan massa yang terjadi. Perubahan berat

positif menunjukkan terjadinya penambahan berat dari berat semula akibat terbentuknya kerak oksida, sementara perubahan berat negatif menunjukkan terjadinya pengelupasan atau penguapan kerak oksida yang terbentuk (Basuki, 2016). Sehingga dapat disimpulkan bahwa paduan Fe-17Ni-17Cr-7,7Al-4Cu dengan penambahan Zr sebesar 1% menghasilkan selisih pengurangan/penambahan massa yang cenderung lebih sedikit dibandingkan dengan 3 lainnya (0,0Zr, 0,1Zr, dan 0,4Zr), atau dapat dilihat pada **Gambar 7** bahwa garis yang berwarna kuning paduan dengan kandungan 1,0Zr cenderung dekat dengan nilai 0 atau pada sumbu x (garis horizontal).

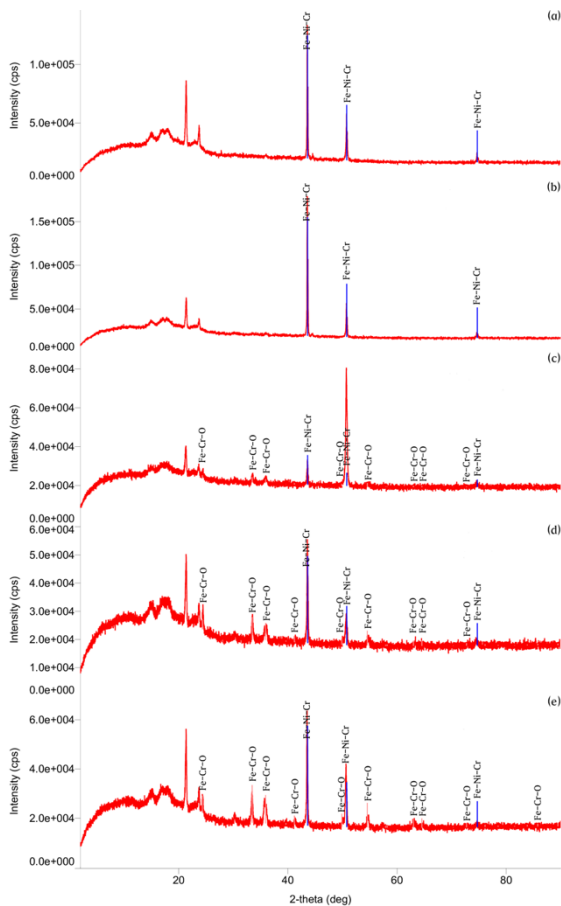


Gambar 7. Grafik perubahan massa awal dan akhir pada pengujian oksidasi isothermal dengan temperatur 900°C

Berdasarkan data-data tersebut sehingga pengambilan spesimen penelitian ini dilanjutkan dengan paduan Fe-17Ni-17Cr-7,7Al-4Cu-1Zr untuk mendapatkan data yang lebih akurat dari pengaruh penambahan 1Zr pada paduan basis Fe-17Ni-17Cr-7,7Al-4Cu terhadap oksidasi isothermal.

Pengaruh 1Zr pada Pembentukan Oksida Paduan Fe-17Ni-17Cr-7,7Al-4Cu

Berdasarkan hasil karakterisasi dan analisis data XRD seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 8**, diindikasikan bahwa oksida-oksida yang memungkinkan terbentuk adalah Fe₃O₄, Fe₂O₃, dan Cr₂O₃. Namun oksida-oksida ini sukar dikonfirmasi pembentukannya karena tersamarkan oleh puncak bidang kristal yang lain. Sampel mengandung Fe yang mengakibatkan fluoresensi pada difaktogram, dampak secara umum adalah puncak (*peak*) pada difaktogram cenderung pendek dan banyak *noise* sehingga menjadi sukar untuk di analisis (Mos dkk., 2018). Hal ini dapat mengindikasikan bahwa oksida yang terbentuk sangat tipis. Oleh karena itu, alih-alih menampilkan oksida yang terbentuk pada substrat, data XRD menunjukkan data lain seperti puncak bidang kristal substrat atau cukup dominan untuk dibedakan dari gangguan data (*noise*) (Tala, 2018).



Gambar 8. Hasil pengujian XRD Fe-17Ni-17Cr-7,7Al-4Cu-1,0Zr dengan oksidasi (a) 700°C pada 40 jam; (b) 800°C pada 40 jam; (c) 900°C pada 2 jam; (d) 900°C pada 10 jam; (e) 900°C pada 40 jam

Kemunculan oksida yang amorf ini dapat terjadi pada sistem paduan Fe-Al pada temperatur 700-900°C (Basuki, 2016). Pada spesimen yang dioksidasi pada temperatur 700°C dan 800°C selama 40 jam, **Gambar 8** (a) dan (b) memperlihatkan hasil XRD tetapi belum menunjukkan pembentukan oksida yang signifikan sehingga belum dapat divalidasi oksida yang terbentuk pada kondisi ini. Dalam hal ini memungkinkan adanya oksida terbentuk berbentuk amorf atau sangat tipis sehingga puncak bidang oksida yang terbentuk masih tersamarkan dengan puncak bidang kristal lain yang dihasilkan.

Pada spesimen yang dioksidasi pada temperatur 900°C selama 2 jam pembentukan oksida cenderung terlihat seperti pada **Gambar 8** (c). Namun demikian, puncak bidang kristal masih tidak dapat terbaca dengan jelas. Hal ini disebabkan gelombang sinar X telah mengenai substrat Fe dan menghasilkan data bidang kristal Fe sehingga analisis pembentukan oksida sukar ditentukan. Pada spesimen yang dioksidasi pada temperatur 900°C selama 10 jam dan 40 jam, hasil XRD pada **Gambar 8** (d) dan (e) cenderung menunjukkan difaktogram yang tidak terlalu berbeda. Namun, dapat diindikasikan bahwa pembentukan oksida ini terjadi, yaitu, Fe_3O_4 , Fe_2O_3 , dan Cr_2O_3 .

Secara teori termodinamika yang didasarkan dari diagram *Ellingham* menunjukkan bahwa Al adalah unsur yang seharusnya akan membentuk oksida pertama, kemudian diikuti oleh Cr, Fe, Ni dan terakhir Cu. Namun, Nababan menganalisis bahwa oksida Fe muncul pertama dengan dibuktikan hasil pemetaan EDS (Nababan, 2017). Fe adalah unsur yang paling melimpah untuk membentuk oksida paling awal. Oleh karena itu, meskipun Al lebih mudah membentuk oksida tetapi Fe lebih besar memiliki peluang untuk membentuk oksida. oksida Fe secara teoritis yang terbentuk pertama adalah Fe_2O_3 , selanjutnya Fe_3O_4 dan terakhir ialah FeO (Pinder dkk., 2010). Pembentukan ini pun bergantung pada tekanan parsial oksigen pada antarmuka substrat dan oksida. Berdasarkan hasil XRD pada Gambar III.3 menunjukkan komposisi paduan yang memungkinkan terdapat pada permukaan, yaitu Fe-Cr-O. Sehingga, pembentukan oksida pertama adalah Fe-O ditunjukkan dengan dominasi puncak yang terdeteksi pada difaktogram. Pembentukan oksida Fe yang terdeteksi akibat melimpahnya unsur Fe pada substrat sehingga pembentukan oksida Fe terlihat jelas daripada Al_2O_3 pada puncak bidang kristal hasil XRD.

Oksida Fe diketahui memiliki sifat porositas yang relatif tinggi sehingga memungkinkan O_2 untuk berdifusi masuk ke dalam formasi kerak oksida dan proses oksidasi tetap berlangsung (Pinder dkk., 2010). Selain itu, oksida Fe tumbuh pada antarmuka substrat-oksida sehingga anion oksigen harus berdifusi masuk ke dalam melintasi oksida yang terbentuk. Hal inilah yang mendorong pertumbuhan oksida Al terbentuk tepat di bawah lapisan oksida Fe, meskipun Al secara termodinamika paling mudah membentuk oksida. Namun demikian, pada penelitian ini oksida Fe yang tumbuh tidak cukup tebal karena berkaitan dengan penambahan Cu dan Zr dalam paduan.

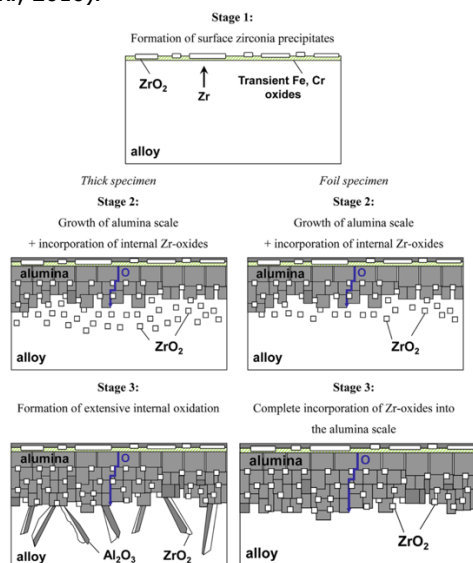
Oksida Fe terbentuk pertama kali secara menyeluruh. Namun, Al_2O_3 dapat terbentuk tepat di bawah oksida Fe pada awal pembentukan oksida dengan kinetika yang lebih cepat. Hal ini mengakibatkan terjadi pertumbuhan berlebih (*overgrowth*) Al_2O_3 pada paduan yang dioksidasi pada waktu yang lama. Oksida selanjutnya yang terbentuk adalah Cr_2O_3 dan NiO secara bersamaan (Nababan, 2017; Tala, 2018). Hal ini diperkuat dengan hasil pemetaan EDS yang menyatakan bahwa oksida Cr dan Ni tersebar merata di seluruh permukaan spesimen. Selain itu, persebaran Ni lebih rendah daripada Cr karena energi pembentukan oksida Ni jauh lebih besar daripada Cr. Pembentukan Cr_2O_3 , terjadi secara simultan ke arah dalam dan arah luar kerak oksida (Mohamed, 2012; Tsai dkk., 1996).

Dalam pengujian oksidasi, logam paduan tidak akan terpisahkan oleh pengaruh oksidasi oleh gas oksigen (O_2), sehingga diharapkan terjadinya pembentukan lapisan oksida akan membantu melindungi paduan dari kerusakan oleh proses alamiah yaitu oksidasi. Lapisan oksida pada paduan

Fe-17Ni-17Cr-7,7Al-4Cu-1Zr yang terletak pada lapisan terluar atau antarmuka berkontak secara langsung dengan oksigen diharapkan adalah Al_2O_3 dan Cr_2O_3 .

Al merupakan unsur yang paling utama dalam memberikan kontribusi terhadap ketahanan oksidasi temperatur tinggi pada paduan berbasis Ni, Fe, dan Co. Ketahanan oksidasinya meningkat terhadap konsentrasi Al di dalam paduan. Unsur Cr berperan dalam memperbaiki ketahanan temperatur tinggi serta meningkatkan aktivitas aluminium sehingga meningkatkan stabilitas Al_2O_3 . Selain itu, Cr menurunkan difusi oksigen ke dalam logam dengan cara menurunkan aktivitas oksigen pada permukaan oksida-logam. Cr_2O_3 memiliki ketahanan temperatur tinggi lebih baik dibandingkan Al_2O_3 , tetapi untuk ketahanan oksidasi Al_2O_3 memberikan proteksi yang lebih baik (Basuki, 2016).

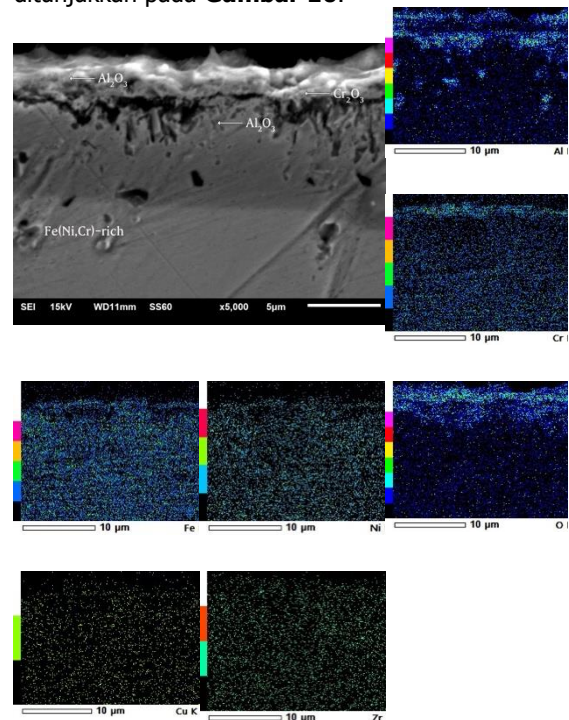
Penambahan Zr pada penelitian ini diharapkan membantu pembentukkan lapisan kerak oksida yang protektif, seperti Al_2O_3 dan Cr_2O_3 . Ketika terjadi proses oksidasi tentu Zr pun akan bereaksi dengan oksigen dan membentuk oksida Zr. Oksida Zr bertahap menjadi mendukung pembentukan alumina. Penggabungan oksida ini dalam kerak oksida alumina secara ekstensif untuk dispersi oksida dasar yang diperkuat untuk paduan Fe-17Ni-17Cr-4Cu-1Zr. Selama waktu pemaparan yang lebih lama, pertumbuhan alumina lebih lanjut terutama terjadi pada antarmuka kerak oksida pada paduan. Dalam spesimen tebal pertumbuhan kerak oksida yang sedang berlangsung disertai dengan pembentukan substansial presipitasi ZrO_2 internal. Pada lapisan antarmuka, presipitasi ini dan paduan tampaknya bertindak sebagai jalur difusi cepat untuk oksigen yang menghasilkan oksidasi internal Al (Huczkowski dkk., 2016).



Gambar 9. Ilustrasi skema pembentukan kerak oksida pada spesimen tebal dan foil dari paduan dengan penambahan Zr (Huczkowski dkk., 2016)

Setelah karakterisasi dengan memanfaatkan sinar X yaitu XRD, pengambilan gambar dengan TEDC Vol. 16 No. 3, September 2022

menggunakan SEM dan EDS, untuk mendapatkan *mapping* yang melengkapi/memverifikasi data hasil XRD. Pada paduan Fe-17Ni-17Cr-7,7Al-4Cu-1Zr yang telah diuji oksidasi isothermal pada temperatur 700°C dan 800°C dengan waktu 40 jam serta temperatur 900°C dengan waktu 2, 10, dan 40 jam. Pada hasil pemeriksaan dengan SEM-EDS yang ditunjukkan (Gambar III.5-Gambar III.9) penampang hasil pengujian oksidasi isothermal temperatur 700°C dan 800°C dengan waktu 40 jam serta 900°C dengan waktu 2, 10, dan 40 jam, lapisan oksida yang terbentuk pada bagian antarmuka adalah lapisan terluar Al_2O_3 dan diikuti oleh lapisan Cr_2O_3 . Lapisan ini dapat dilihat dengan memanfaatkan *mapping* dengan EDS, dapat dilihat pada hasil pengujian oksidasi dengan temperatur tertinggi dan waktu terlama terhadap paduan Fe-17Ni-17Cr-7,7Al-4Cu-1Zr pada temperatur 900°C dan waktu 40 jam ditunjukkan pada **Gambar 10**.



Gambar 10. Hasil SEM-EDS pada penampang paduan Fe-17Ni-17Cr-7,7Al-4Cu-1Zr teroksidasi isothermal pada temperatur 900°C dan waktu 40 jam

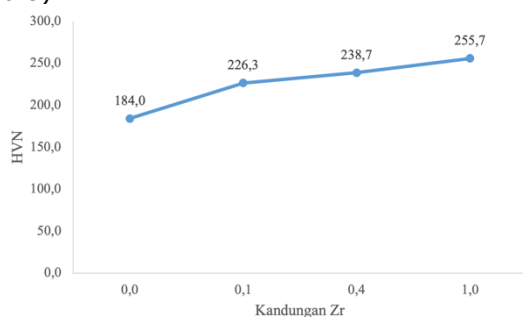
Pada Gambar 10 menunjukkan bahwa lapisan kerak oksida terluar/antarmuka adalah Al_2O_3 selanjutnya diikuti oleh lapisan kerak oksida Cr_2O_3 dan Al_2O_3 . Pada umumnya, dibutuhkan sebanyak 4% Al pada paduan logam agar dapat terbentuk lapisan kerak Al_2O_3 yang kontinu. Lapisan Al_2O_3 tersebut memberikan proteksi terhadap serangan oksidasi lebih lanjut. Pertumbuhan Al_2O_3 menunjukkan laju kinetika parabolik. Pada temperatur yang sangat tinggi, kerak oksida ini memberikan proteksi yang sangat baik terhadap oksidasi, tetapi pada temperatur yang relatif rendah atau antara, lapisan tersebut tidak terlalu baik dalam proteksi terhadap

oksidasi (Lai, 2007). Berbeda dengan oksida Al_2O_3 , kerak oksida Cr_2O_3 , memberikan proteksi terhadap serangan oksidasi pada temperatur yang relatif rendah (Kofstad, 1988).

Ada beberapa penjelasan dari pembentukan Al_2O_3 yang tidak dapat membentuk lapisan yang protektif dan menutupi permukaan substrat secara menyeluruh. Alasan pertama adalah komposisi Al dalam paduan ini dirancang untuk menjadi pembentuk presipitat penguat B2-(FeNi)Al (Yanas, 2016). Oleh sebab itu, komposisi Al tidak cukup melimpah untuk membentuk lapisan yang kontinu yang protektif. Sementara itu, Cr adalah pembentuk oksida utama yang diharapkan membentuk lapisan oksida yang protektif. Namun demikian, hanya ditemukan sedikit oksida Cr yang terbentuk pada butir Al_2O_3 . Keberadaan Cr pada butir oksida Al_2O_3 ini menjelaskan fungsi Cr sebagai elemen oksigen aktif dalam paduan yang dapat membantu pembentukan oksida Al_2O_3 secara lebih cepat (Pomeroy, 2005). Hal ini menguatkan dugaan bahwa dampak penambahan Cu (Hayashi dkk., 2019) dan Zr pada penelitian ini pembentukan lapisan oksida Al dan Cr terletak pada bagian terluar paduan. Sehingga melindungi bagian dalam yang mengandung FeNi pada paduan ini, hal ini menunjukkan bahwa penambahan 4Cu dan 1Zr lebih protektif.

Pengaruh 1Zr pada Kekerasan Paduan Fe-17Ni-17Cr-7,7Al-4Cu

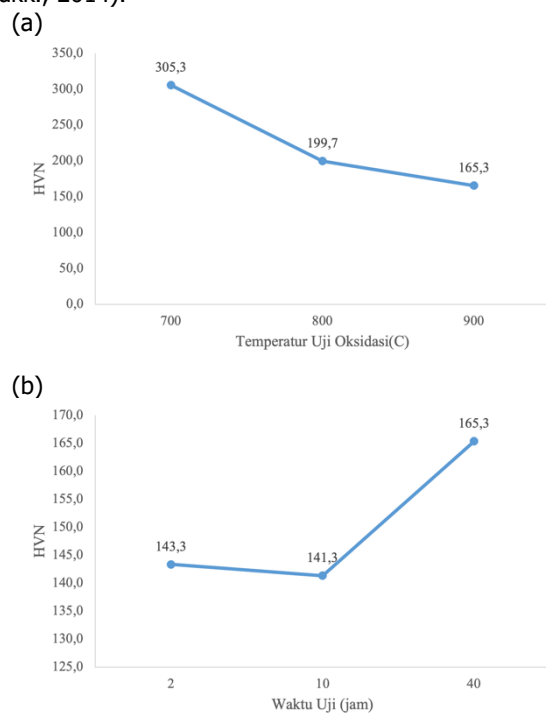
Pengaruh penambahan Zr pada baja austenitik dapat menghambat pertumbuhan butiran austenit sehingga butiran austenit lebih halus. Zr juga dapat membentuk presipitat karena mudah bereaksi dengan C, N, dan O membentuk senyawa diantaranya presipitat halus *Zr-rich oxides* di sepanjang batas butir yang terdistribusi merata sehingga dapat meningkatkan kekerasan dengan mekanisme pengerasan pengendapan (Wang dkk., 2019).



Gambar 11. Grafik hasil pengujian kekerasan pada paduan Fe-17Ni-17Cr-7,7Al-4Cu dengan perbedaan kandungan Zr

Kekerasan pada penambahan Zr meningkatkan kekerasan paduan akibat ukuran butiran yang halus serta distribusi presipitat *Zr-rich oxides* yang terdistribusi merata dan homogen pada batas butir dan di dalam butiran (Wang dkk., 2019). Butiran austenit yang halus akibat penambahan Zr meningkatkan kekerasan seiring penambahan Zr

(Morrall dkk., 2018). Nilai kekerasan pada penelitian ini diuji menggunakan *Vickers Hardness Tester* paduan Fe-17Ni-17Cr-7,7Al-4Cu (**Gambar 11**) meningkat seiring dengan penambahan Zr. Paduan Fe-17Ni-17Cr-7,7Al-4Cu-1Zr (**Gambar 12 (a)**) setelah pengujian oksidasi isothermal pada temperatur 700, 800, dan 900°C bahwa meningkatnya temperatur pengujian, menurunkan nilai kekerasan. Kekerasan paduan menurun seiring meningkatnya temperatur akibat terjadinya pengerasan (Basuki, 2016; Wang dkk., 2019). Pada pengujian oksidasi isothermal temperatur 900°C dengan variasi waktu 2, 10, dan 40 jam 1Zr (**Gambar 12 (b)**), seiring bertambahnya waktu oksidasi meningkatkan nilai kekerasan, Pada proses ini memungkinkan adanya pengaruh oksida Zr yang terdispersi secara merata, mengakibatkan meningkatnya kekerasan di seluruh permukaan (Gao dkk., 2014).



Gambar 12. Grafik hasil uji kekerasan paduan Fe-17Ni-17Cr-7,7Al-4Cu-1Zr setelah pengujian oksidasi isothermal (a) HVN terhadap temperatur (b) HVN terhadap waktu

V. KESIMPULAN DAN SARAN KESIMPULAN

Berdasarkan percobaan dan analisis pengaruh zirkonium terhadap paduan Fe-17Ni-17Cr-7,7Al-4Cu diperoleh beberapa kesimpulan, yaitu:

1. Penambahan zirkonium sebesar 1% mempunyai kecenderungan penambahan/pengurangan massa/berat paduan lebih sedikit dibandingkan tanpa penambahan zirkonium atau penambahan 0,1% dan 0,4%.
2. Pembentukan lapisan kerak oksida Al_2O_3 dan Cr_2O_3 terjadi pada bagian

terluar/antarmuka pada paduan Fe-17Ni-17Cr-7,7Al-4Cu-1Zr, ditemukan bahwa penambahan zirkonium membantu pembentukan Al_2O_3 dan bergabung dengan Al_2O_3 membentuk presipitat ZrO_2 .

3. Kekerasan paduan Fe-17Ni-17Cr-7,7Al-4Cu dengan penambahan zirkonium mengalami peningkatan seiring meningkatnya kandungan zirkonium. Titik tertinggi nilai kekerasan yaitu 225,7 HVN pada penambahan zirkonium sebesar 1%.

SARAN

Penelitian yang dilakukan memungkinkan paduan ini dapat diaplikasikan, namun beberapa pengembangan lebih lanjut masih perlu dilakukan, seperti:

1. Perlu dilakukan pengujian oksidasi siklik untuk mempelajari ketahanan oksidasi pada temperatur berubah-ubah secara drastis selama waktu operasi.
2. Perlu dilakukan pengujian mekanik lainnya, seperti: pengujian tarik (*tensile*) dan pengujian mulur (*creep*) pada temperatur tinggi.

VI. DAFTAR PUSTAKA

- Basuki, E. A. (2016): *Paduan Logam untuk Aplikasi Temperatur Tinggi dan Penghematan Energi* (T. Sarah, Ed.), Penerbit ITB, Bandung.
- Birks, N., Heier, G. H., dan Pettit, F. S. (2006): *Introduction to The High Temperature Oxidation of Metals*, Cambridge University Press, Cambridge University Press, New York, United States of America, diperoleh melalui situs internet: <http://www.cambridge.org/9780521480420>, 352.
- Birks, N., Meier, G. H., dan Pettit, F. S. (2006): *Introduction to The High-Temperature Oxidation of Metals* (2nd ed.), Cambridge University Press, New York, United States of America, diperoleh melalui situs internet: www.cambridge.org/9780521480420, 352.
- Brady, M. P., Yamamoto, M. I., Santella, M. L., Maziasz, P. J., Pint, B. A., Liu, C. T., Lu, Z. P., dan Bei, H. (2008): *The Development of Alumina-Forming Austenitic Stainless Steels for High-Temperature Structural Use*, 7.
- Brady, M. P., Yamamoto, Y., Santella, M. L., dan Pint, B. A. (2007): Effects of minor alloy additions and oxidation temperature on protective alumina scale formation in creep-resistant austenitic stainless steels, *Scripta Materialia*, **57**(12), 1117–1120. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2007.08.032>
- Cheng, W. J., Sellers, R. S., Anderson, M. H., Sridharan, K., Wang, C. J., dan Allen, T. R. (2013): Zirconium effect on the corrosion behavior of 316l stainless steel alloy and hastelloy-n superalloy in molten fluoride salt, *Nuclear Technology*, **183**(2), 248–259. <https://doi.org/10.13182/NT12-125>
- Chi, C., Yu, H., Dong, J., Liu, W. qing, Cheng, S. chang, Liu, Z. dong, dan Xie, X. (2012): The precipitation strengthening behavior of Cu-rich phase in Nb contained advanced Fe–Cr–Ni type austenitic heat resistant steel for USC power plant application, *Progress in Natural Science: Materials International*, **22**(3), 175–185. <https://doi.org/10.1016/j.pns.2012.05.002>
- Eleno, L., Frisk, K., dan Schneider, A. (2006): Assessment of the Fe–Ni–Al system, *Intermetallics*, **14**(10–11), 1276–1290. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2005.11.021>
- Gao, R., Zhang, T., Wang, X. P., Fang, Q. F., dan Liu, C. S. (2014): Effect of zirconium addition on the microstructure and mechanical properties of ODS ferritic steels containing aluminum, *Journal of Nuclear Materials*, **444**(1–3), 462–468. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2013.10.038>
- Hayashi, S., Kudo, D., Nagashima, R., dan Utsumi, H. (2019): Effect of Cu on oxidation behaviour of FCC Fe–Ni–Cr–Al and Ni–Cr–Al based alloys, *Corrosion Science*, **163**(October 2019), 108273. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.108273>
- Huczowski, P., Gopalakrishnan, S. G., Nowak, W., Hattendorf, H., Iskandar, R., Mayer, J., dan Quadackers, W. J. (2016): Effect of Zr content on the morphology and emissivity of surface oxide scales on FeCrAlY alloys, *Advanced Engineering Materials*, **18**(5), 711–720. <https://doi.org/10.1002/ADEM.201500439>
- Immanuel, P., Ambardi, P., dan Prajitno, D. H. (2019): Ketahanan Oksidasi Zircaloy–4 yang Dipadu dengan Yttrium pada Temperatur Tinggi, 8.
- Kofstad, P. (1988): *High Temperature Corrosion*, Elsevier Applied Science Ltd, New York, United States of America, 558 (288).
- Laha, K., Kyono, J., dan Shinya, N. (2007): An advanced creep cavitation resistance Cu-containing 18Cr–12Ni–Nb austenitic stainless steel, *Scripta Materialia*, **56**(10), 915–918. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2006.12.030>
- Lai, G. Y. (2007): *High-Temperature Corrosion and Materials Applications* (1 ed.), ASM International, 445. <https://doi.org/10.1361/hcma2007p001>
- Mini-ROVs: The Coal-Fired and Nuclear Power Plant Inspection Solution. (2022): , diperoleh 25 Mei 2022, melalui situs internet: <https://www.deeptrekker.com/resources/coal-fired-and-nuclear-power-plant-inspection>.
- Mohamed, H. E. (2012): Oxidation Behavior of Some Cr Ferritic Steels for High Temperature Fuel Cells, 135.
- Morrall, D., Gao, J., Zhang, Z., Yabuuchi, K., Kimura, A., Ishizaki, T., dan Maruno, Y. (2018): Tensile properties of mechanically alloyed Zr added austenitic stainless steel, *Nuclear Materials and Energy*, **15**, 92–96. <https://doi.org/10.1016/j.nme.2018.03.002>
- Mos, Y. M., Vermeulen, A. C., Buisman, C. J. N., dan Weijma, J. (2018): X-Ray Diffraction of Iron Containing Samples: The Importance of a Suitable Configuration, <https://doi.org/10.1080/01490451.2017.1401183>, **35**(6), 511–517. <https://doi.org/10.1080/01490451.2017.1401183>
- Nababan, D. C. (2017): *Perilaku Oksidasi Isotermal Paduan 69,5Fe-14Ni-9Al-7,5Cr pada Temperatur 800, 900, Dan 1000°C*, Institut Teknologi Bandung, 7.
- Nastiti, G., Handani, S., dan Bandriyana, B. (2014): Pengaruh Proses Oksidasi pada Logam Paduan Zr-2,5Nb untuk Material Bioimplan, **3**, 9.
- Pinder, L. W., Dawson, K., dan Tatlock, G. J. (2010): High Temperature Corrosion of Low Alloy Steels, *Shreir's Corrosion*, 558–582. <https://doi.org/10.1016/B978-044452787-5.00075-5>
- Pomeroy, M. J. (2005): Coatings for gas turbine materials and long term stability issues, *Materials & Design*,

- 26(3), 223–231.
<https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2004.02.005>
- Pribadi, A. (2020): Hingga Juni 2020, Kapasitas Pembangkit di Indonesia 71 GW, , diperoleh 8 November 2021, melalui situs internet: <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/hingga-juni-2020-kapasitas-pembangkit-di-indonesia-71-gw>.
- Purnama, S., dan Yudianto, F. (2021): Konsumsi listrik per kapita capai 1.109 kWh sampai September 2021, , diperoleh 8 November 2021, melalui situs internet: <https://www.antaranews.com/berita/2473033/konsumsi-listrik-per-kapita-capai-1109-kwh-sampai-september-2021>.
- Satyanarayana, D. V. V., Malakondaiah, G., dan Sarma, D. S. (2002): Steady state creep behaviour of NiAl hardened austenitic steel, *Materials Science and Engineering: A*, **323**(1–2), 119–128. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(01\)01342-9](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(01)01342-9)
- Sun, Z., Liebscher, C. H., Huang, S., Teng, Z., Song, G., Wang, G., Asta, M., Rawlings, M., Fine, M. E., dan Liaw, P. K. (2013): New design aspects of creep-resistant NiAl-strengthened ferritic alloys, *Scripta Materialia*, **68**(6), 384–388. <https://doi.org/10.1016/J.SCRIPTAMAT.2012.10.040>
- Tala, S. X. (2018): *Studi Perilaku Oksidasi Isotermal Paduan Fe-14Ni-9Al-7,5Cr-5Mo Pada Temperatur 800, 900, Dan 1000C*, Institut Teknologi Bandung.
- Teir, S. (2002): Basics of Steam Generation, *Steam Boiler Technology eBook*, 15.
- Tomaszewicz, P., dan Wallwork, G. . (1984): The Oxidation of Fe-Al Alloys Containing Chromium, Nickel, or Manganese, **40**, 6.
- Tsai, S. C., Huntz, A. M., dan Dolin, C. (1996): Growth mechanism of Cr₂O₃ scales: oxygen and chromium diffusion, oxidation kinetics and effect of yttrium, *Materials Science and Engineering: A*, **212**(1), 6–13. [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(96\)10173-8](https://doi.org/10.1016/0921-5093(96)10173-8)
- Umah, A. (2021): RI Mau Bangun Pembangkit Listrik Nuklir, Kapan?, , diperoleh 8 November 2021, melalui situs internet: <https://www.cnbcindonesia.com/news/20210430084946-4-242060/ri-mau-bangun-pembangkit-listrik-nuklir-kapan>.
- Utami, L. (2017): *Perilaku Oksidasi Isotermal Paduan Fe-22Ni-20Al pada Temperatur 600, 700, dan 800°C*, Institut Teknologi Bandung, 8.
- Wang, S., Zheng, K., Zheng, Z., Wang, J., Long, J., dan Li, Y. (2019): Effect of Zr on microstructure and high-temperature mechanical properties of austenitic heat resistant steel, *Materials Research Express*, **6**(11), 12. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/AB47DA>
- Wright, I., dan Woodford, D. (2004): Materials issues for turbines for operations in ultra-supercritical steam Stress Relaxation Testing View project Creep Damage and Analysis View project, diperoleh melalui situs internet: <https://www.researchgate.net/publication/252853770>, (August 2019).
- Yamamoto, Y., Santella, M. L., dan Brady, M. P. (2009): Effect of Alloying Additions on Phase Equilibria and Creep Resistance of Alumina-Forming Austenitic Stainless Steels, (August 2009). <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11661-009-9886-1>
- Yanas, Y. G. (2016): *Pengendapan Nano-Presipitat B2-(Fe,Ni)Al pada Baja Feritik Maju*, Institut Teknologi Bandung.
- Yin, Y., Faulkner, R., dan Starr, F. (2014): Austenitic steels

and alloys for power plants, *Structural Alloys for Power Plants: Operational Challenges and High-Temperature Materials*, 105–152. <https://doi.org/10.1533/9780857097552.2.105>