

Urania

Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir

Beranda jurnal: <http://jurnal.batan.go.id/index.php/urania/>



STUDI PENGARUH PENAMBAHAN YTTRIUM DAN PERLAKUAN PANAS BETA TERHADAP KETAHANAN HIDROGEN PADUAN ZIRCALOY-4-0,1%Mo PADA TEMPERATUR 600°C DAN 800°C

Ajra Alfatar¹, Eddy Agus Basuki¹, Djoko Hadi Prajitno²

¹Program Studi Teknik Metalurgi, Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan – ITB
Jl. Ganesa No. 10, Bandung, Jawa Barat, 40132

²Pusat Riset dan Teknologi Nuklir Terapan – BRIN
Jl. Tamansari No.71, Bandung, Jawa Barat, 40132
e-mail: ajraalfatar219@gmail.com

(Naskah diterima: 05-04-2022, Naskah direvisi: 17-05-2022, Naskah disetujui: 11-06-2022)

ABSTRAK

STUDI PENGARUH PENAMBAHAN YTTRIUM DAN PERLAKUAN PANAS BETA TERHADAP KETAHANAN HIDROGEN PADUAN ZIRCALOY-4-0,1%Mo PADA TEMPERATUR 600°C DAN 800°C. Energi listrik merupakan sumber energi yang banyak digunakan dan dibutuhkan oleh manusia. Sehingga kebutuhan energi listrik ini akan meningkat seiring bertambahnya jumlah populasi manusia. Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) merupakan salah satu solusi dari persoalan tersebut. Salah satu komponen penting reaktor nuklir yaitu kelongsong bakar nuklir biasanya menggunakan material berupa paduan zirkonium, namun penggunaan paduan ini dalam waktu yang lama akan rentan terhadap penggetasan akibat penetrasi hidrogen. Serangkaian percobaan dilakukan untuk mengetahui pengaruh penambahan yttrium dan perlakuan panas beta terhadap ketahanan hidrogen dan sifat mekanis paduan Zircaloy-4-0,1%Mo-xY ($x=0$ wt%; 0,5 wt%; 1 wt%). Penambahan yttrium menyebabkan peningkatan jumlah presipitat yang diduga adalah α -Y sekaligus meningkatkan kekerasan paduan baik pada paduan *as cast* maupun perlakuan panas beta. Perlakuan panas beta menurunkan kekerasan paduan akibat peningkatan jumlah fasa β -Zr. Peningkatan ketahanan hidrogen dapat dilakukan dengan penambahan yttrium karena bertindak sebagai penstabil fasa β -Zr. Sama halnya dengan perlakuan panas beta yang dapat meningkatkan ketahanan hidrogen dengan metode yang sama yaitu meningkatkan jumlah fasa β -Zr sehingga jumlah hidrogen yang dapat larut meningkat. Penambahan 1 wt% Y pada paduan zircaloy-4-0,1%Mo dengan perlakuan panas beta menunjukkan ketahanan hidrogen yang paling baik dengan ketebalan 6,24 μm pada temperatur 600°C dan 545,5 μm pada temperatur 800°C.

Kata kunci: Zircaloy-4, ketahanan hidrogen, variasi yttrium.

ABSTRACT

EFFECT OF YTTRIUM ADDITION AND BETA HEAT TREATMENT ON HYDROGEN RESISTANCE OF ZIRCALOY-4-0.1%Mo AT 600°C AND 800°C TEMPERATURES. *Electrical energy is a source of energy that is widely used and needed by humans. So that the need for electrical energy will increase along with the increase in the human population. Nuclear Power Plant is one solution to this problem. One of the important components of nuclear reactors, namely nuclear fuel cladding, usually uses a material in the form of a zirconium alloy, but the use of this alloy for a long time will be susceptible to embrittlement due to hydrogen penetration. A series of experiments were conducted to determine the effect of adding yttrium and beta heat treatment on hydrogen resistance and mechanical properties of Zircaloy-4-0.1%Mo-xY alloy (x=0 wt%; 0.5 wt%; 1 wt%). The addition of yttrium causes an increase in the amount of precipitate which is thought to be α -Y while increasing the alloy hardness in both as cast alloys and beta heat treatment. Beta heat treatment decreased the alloy hardness due to an increase in the number of β -Zr phases. Hydrogen resistance can be increased by adding yttrium because it acts as a β -Zr phase stabilizer. Similarly, beta heat treatment can increase hydrogen resistance with the same method, namely increasing the number of β -Zr phases so that the amount of soluble hydrogen increases. The addition of 1 wt% Y to zircaloy-4-0.1%Mo alloy with beta heat treatment showed the best hydrogen resistance with a thickness of 6.24 μm at 600°C and 545.5 μm at 800°C.*

Keywords: Zircaloy-4, hydrogen resistance, yttrium variation.

PENDAHULUAN

Energi listrik merupakan sumber energi yang banyak digunakan dan dibutuhkan oleh manusia. Sehingga kebutuhan energi listrik tersebut akan meningkat seiring bertambahnya jumlah populasi manusia [1]. Skenario energi global saat ini memprediksi peningkatan pesat dalam pangsa pembangkit listrik ramah lingkungan, didasarkan pada pemahaman tentang emisi karbon dan pertumbuhan ekonomi yang cepat dari beberapa negara berkembang yang pembangkit listriknya masih banyak menggunakan bahan bakar fosil [2].

Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) merupakan salah satu solusi dari persoalan tersebut. Dengan karakteristiknya yang ramah lingkungan, ekonomis, aman, tidak fluktuatif, dan *non-intermittent* menjadikannya salah satu pembangkit listrik yang paling menjanjikan [3].

Salah satu komponen penting pada reaktor nuklir adalah kelongsong elemen bakar nuklir yang memegang peranan penting dalam menentukan umur pakai reaktor [4]. Terjadinya pelelehan bahan kelongsong elemen akan menghentikan pengoperasian reaktor nuklir. Material kelongsong bahan bakar nuklir yang biasa digunakan yaitu zircaloy. Paduan ini memiliki penampang penangkapan neutron termal yang rendah, ketahanan korosi yang sangat baik, dan sifat mekanik yang memadai pada temperatur tinggi [5].

Pada penelitian sebelumnya, yttrium telah terbukti dapat meningkatkan ketahanan paduan zircaloy terhadap oksidasi [6]. Penggunaan zircaloy dalam waktu yang lama akan rentan terhadap penggetasan oleh hidrogen [7]. Sehingga menjadi penting pengaruh konsentrasi yttrium terhadap ketahanan hidrogen pada paduan zircaloy-4.

a. Zirkonium

Zirkonium (Zr) merupakan logam putih keabuan dengan nomor atom 40 dan massa atom relatif 91,224 g/mol [8]. Zirkonium murni memiliki kelemahan dalam sifat mekanik maupun kimianya, sehingga kurang menguntungkan jika digunakan [4]. Untuk memperbaiki kekurangan tersebut, Zr biasanya dipadu dengan unsur lainnya sehingga membentuk larutan padat atau dengan perlakuan panas [9].

Terdapat dua aplikasi utama untuk Zr dan paduannya, yaitu nuklir dan nonnuklir.

Perbedaan utama antara paduan Zr untuk industri nuklir dan nonnuklir adalah kandungan hafnium (Hf) yang mempengaruhi daya serap neutron. Karena paduan Zr memiliki ketahanan korosi dan biokompatibel, paduan Zr juga dapat digunakan untuk implan tubuh [10].

Zirkonium dan paduannya banyak digunakan dalam reaktor nuklir untuk kelongsong bahan bakar dan struktur reaktor karena kombinasi sifatnya yang unik. Sifat tersebut diantaranya kekuatan yang baik pada temperatur tinggi, tahan korosi, dan penampang serapan neutron yang rendah yaitu hanya 0,185 Barns [2],[11]. Paduan yang biasa digunakan dalam aplikasi nuklir adalah zircaloy-2, zircaloy-4, dan paduan Zr-Nb.

b. Aplikasi Paduan Zirkonium pada Industri Nuklir

PLTN menggunakan reaksi pembelahan (fisi) inti Uranium untuk menghasilkan energi panas yang sangat besar [12]. Pemilihan bahan dijadikan prioritas utama untuk memastikan kelangsungan operasi reaktor yang aman dan ekonomis. Dalam pengembangan teknologi nuklir dibutuhkan material dan sistem reaktor yang lebih handal. Arah pengembangan menuju reaktor nuklir dengan suhu operasi yang lebih tinggi dan sistem keselamatan yang lebih kuat dan sederhana [13].

Paduan zircaloy-4 biasa digunakan untuk kelongsong bahan bakar pada reaktor nuklir [14]. Kelongsong bahan bakar merupakan selubung logam silinder yang memuat tumpukan pelet bahan bakar nuklir [15]. Bagian kelongsong reaktor nuklir akan mengalami korosi selama digunakan. Hal ini disebabkan oleh adanya aliran air yang berfungsi sebagai pendingin. Oleh karena itu, material harus memiliki ketahanan korosi yang sangat baik di dalam air pendingin yang panas. Diharapkan juga hanya terdapat korosi dan deformasi yang minimal setelah pengoperasiannya [9].

c. Sifat dan Ciri Paduan Zircaloy-4

Paduan Zircaloy-4 memiliki penampang lintang serapan neutron yang mirip dengan zirkonium, yaitu sebesar 0,22 barns [16]. Zircaloy-4 memiliki kecenderungan menyerap hidrogen yang lebih rendah, sehingga kemungkinan terjadinya hidridasi juga lebih rendah. Oleh karena itu, Zircaloy-4 banyak diaplikasikan

sebagai material kelongsong bahan bakar pada reaktor nuklir komersial [17].

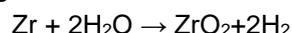
Paduan Zircaloy-4 banyak digunakan sebagai komponen pada reaktor yang dimoderasi oleh air karena penampang serapan lintang neutron yang rendah, ketahanan yang tinggi terhadap korosi uap dan air, dan sifat mekanik yang baik. Komposisi khas Zircaloy-4 adalah 1,2-1,7 wt% Sn, 0,18-0,24 wt% Fe, 0,1 wt% O, dan 0,07-0,13 wt% Cr. Oksigen pada paduan ini berfungsi untuk meningkatkan kekuatan luluh [13]. Penambahan Sn dan Fe berfungsi untuk meningkatkan sifat mekanik logam zirkonium. Sedangkan Cr dan Nb ditambahkan guna meningkatkan ketahanan korosi paduan ini pada temperatur tinggi [4]. Karakteristik paduan Zircaloy-4 dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Karakteristik Zircaloy-4 20°C[18]

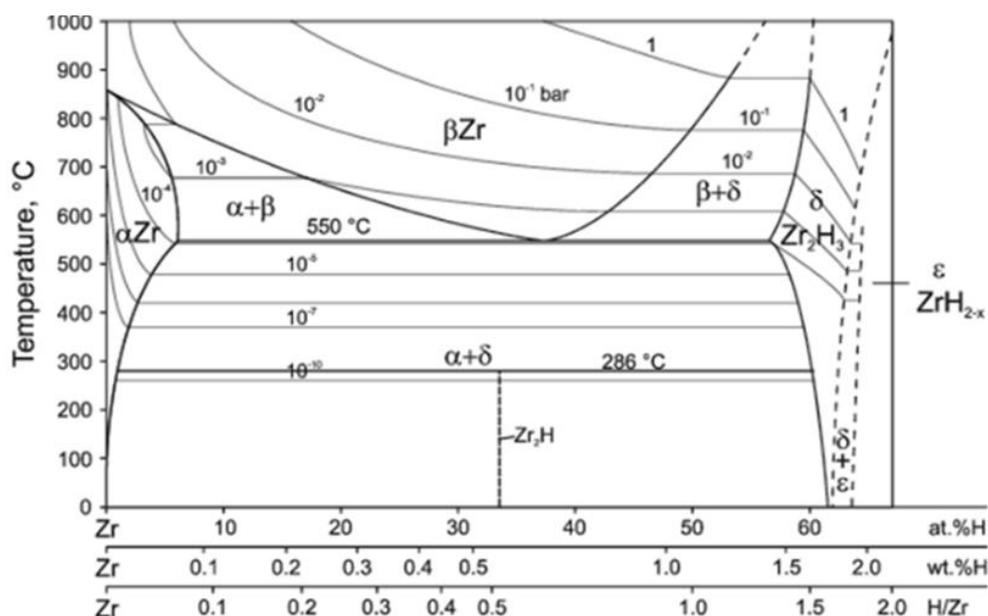
Sifat	Metric
Densitas	6,56 g/cm ³
Titik lebur	1850 °C
Kekuatan tarik	514 Mpa
Kekuatan luluh	381 Mpa
Modulus elastisitas	99,3 Gpa
Rasio Poisson	0,37
Kekerasan, Rockwell B	89
Koefisien ekspansi termal	6 µm/m°C
Konduktivitas termal	21,5 W/mK

d. Penyerapan Hidrogen pada Paduan Zirkonium

Proses penyerapan hidrogen oleh matriks paduan zirkonium tidak terlepas dari proses korosi logam zirkonium. Korosi paduan zirkonium pada suhu tinggi pada dasarnya merupakan proses elektrokimia yang melibatkan sel galvanik. Pertumbuhan lapisan oksida oleh difusi oksigen adalah proses anodik dan reduksi ion hidrogen dari air oleh elektron yang berdifusi melalui lapisan oksida merupakan proses katodik [19]. Reaksi korosi logam zirkonium dalam air dapat ditulis sebagai:



Produk dari reaksi tersebut adalah lapisan oksida dan hidrogen. Oksidasi zirkonium didorong oleh energi bebas yang tinggi dari reaksi pembentukan oksida zirkonium (~965 kJ/mol pada temperatur 360°C). Sebagian atom hidrogen tidak bergabung kembali dengan elektron pada antarmuka oksida/air tetapi bergerak melalui lapisan oksida dan masuk ke logam. Kelarutan hidrogen di dalam logam zirkonium sangat kecil. Hal ini dapat dilihat diagram fasa Zr-H pada Gambar 1. Berdasarkan diagram fasa tersebut, hidrogen dapat ditemukan baik dalam larutan padat di dalam matriks zirkonium dan jika konsentrasi hidrogen cukup tinggi maka hidrogen akan ditemukan sebagai endapan hidrida (ZrH₂)[20].



Gambar 1. Diagram fasa Zr-H[21]

Studi Pengaruh Penambahan Yttrium dan Perlakuan Panas Beta Terhadap Ketahanan Hidrogen Paduan Zircaloy-4-0,1%Mo pada Temperatur 600°C dan 800°C (Ajra Alfatar, Eddy Agus Basuki, Djoko Hadi Prajitno)

METODOLOGI

Rangkaian percobaan dilakukan untuk mempelajari pengaruh konsentrasi yttrium dan perlakuan panas beta terhadap ketahanan hidrogen paduan Zircaloy-4 pada temperatur 600°C dan 800°C. Percobaan diawali dengan pembuatan *button* paduan melalui proses peleburan. Material berupa batang zircaloy-4, kawat molybdenum, dan yttrium digunakan untuk membuat paduan Zircaloy-4-0,1Mo-xY dengan variasi komposisi Y sebesar 0%, 0,5%, dan 1%. *Button* kemudian dibagi menjadi dua bagian dan dilakukan perlakuan panas beta pada salah satu bagian. Perlakuan panas dilakukan menggunakan *horizontal tube furnace* pada temperatur 1000°C selama dua jam. Pada proses ini, lingkungan dibuat inert dengan cara mengalirkan gas *Ultra High Purity Argon* agar tidak terjadi oksidasi pada paduan.

Sebelum dilakukan *hydrogen charging*, *button* dipotong dan dihaluskan permukaannya. Selanjutnya, dilakukan proses *hydrogen charging* pada temperatur 600°C dan 800°C selama 5 jam. Setelah dilakukan percobaan, didapatkan data berupa hubungan antara ketebalan lapisan hidrida dan oksida terhadap konsentrasi yttrium dan perlakuan panas beta. Karakterisasi paduan dilakukan untuk menentukan hidrida yang terbentuk, dilakukan analisis terhadap hasil percobaan .

HASIL DAN PEMBAHASAN

a. Karakteristik Struktur Mikro Paduan Zircaloy-4-0,1Mo-xY

Paduan Zircaloy-4 yang digunakan pada percobaan ini memiliki komposisi 1,5 wt%Sn, 0,22 wt%Fe, 0,1wt%Cr, dan sisanya adalah Zr yang juga berperan sebagai matriks. Paduan zircaloy-4-0,1Mo-xY dibuat melalui proses peleburan. Ketika temperatur lelehan logam tersebut turun, maka lelehan paduan zirkonium akan bertransformasi menjadi fasa β -Zr sesuai dengan diagram fasa pada Zr-Y[25]. Seiring dengan turunnya temperatur, fasa α -Zr juga akan mulai terbentuk pada temperatur 863°C. seperti diperlihatkan pada diagram fasa gambar 1.

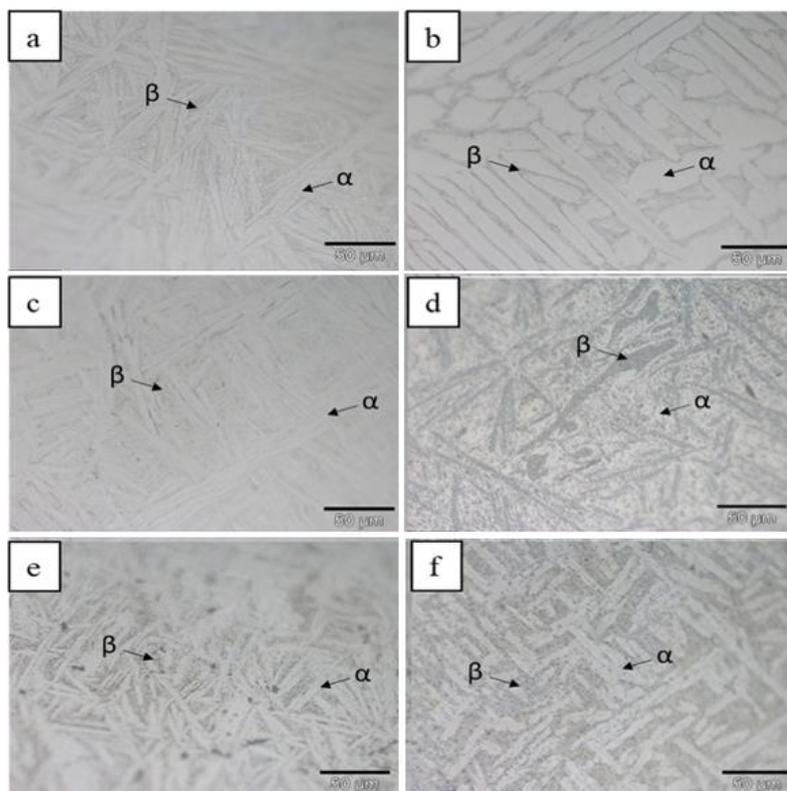
Struktur mikro paduan Zircaloy-4-0,1Mo-xY *as cast* ditunjukkan pada Gambar 2 (a), (c), dan (e) yang memiliki struktur *basket weave*. Morfologi tersebut dihasilkan dari pengendapan acak α -Zr pada sejumlah bidang dalam satu butir beta [23].

Berdasarkan penelitian sebelumnya, fasa α memiliki warna lebih terang sedangkan fasa β berwarna lebih gelap [24].

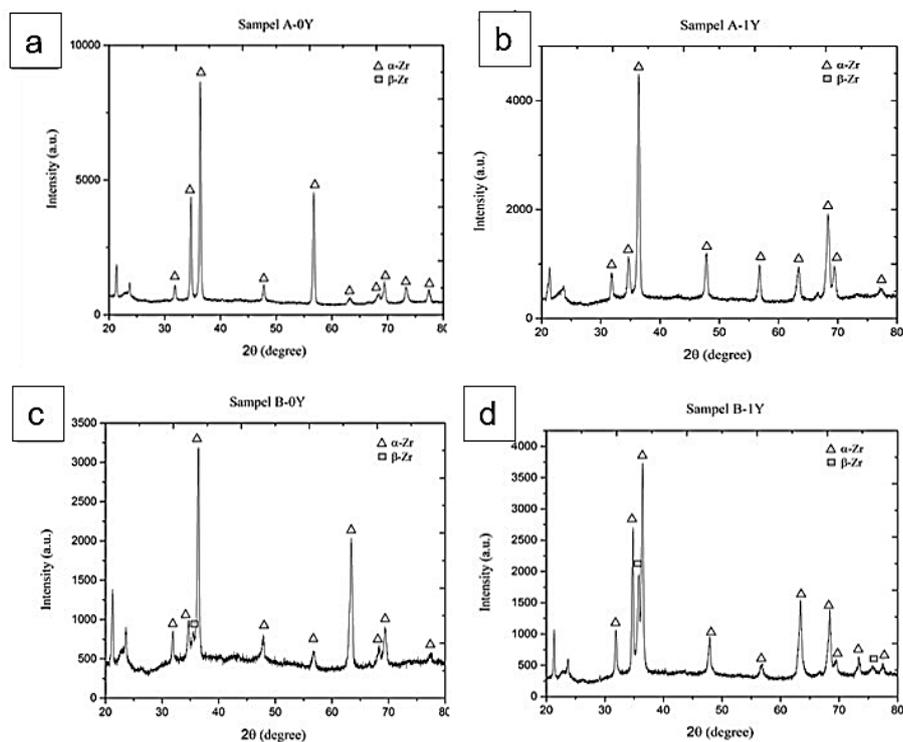
Pada sebagian sampel, diterapkan perlakuan panas beta yang dilakukan pada temperatur 1000°C (di atas temperatur transisi α -Zr + β -Zr \rightarrow β -Zr yaitu 873°C), lalu dilakukan pendinginan cepat dengan air. Struktur mikro paduan dengan perlakuan panas beta ditunjukkan pada Gambar 2 (b), (d), dan (f) dimana ketika perlakuan panas dilakukan, presipitat Zr(Fe, Cr)₂ larut dalam fasa β -Zr kemudian mengendap kembali. Selama pendinginan cepat dengan air, temperatur *undercooling* yang besar dan laju pengintian yang tinggi menghasilkan ukuran fasa β -Zr yang lebih lebar sesuai dengan penelitian Ni Jia dkk [22].

Jika dilihat dari struktur mikro pada Gambar 2, penambahan Y baik pada sampel *as cast* ataupun perlakuan panas beta membuat morfologi fasa β -Zr membesar. Hal ini disebabkan oleh Y yang diduga sebagai penstabil fasa β -Zr dan termasuk unsur transisi [26]. Pada penelitian lainnya, diketahui juga bahwa kelarutan Y lebih besar pada fasa α -Zr dibandingkan fasa β -Zr [27]. Selain itu, presipitat semakin terlihat jelas seiring meningkatnya unsur Y. Presipitat tersebut diduga merupakan α -Y karena Y memiliki kelarutan yang sangat rendah di dalam Zr pada temperatur ruang. Hal ini didukung oleh, peningkatan jumlah β -Zr akan menyebabkan turunya jumlah presipitat Zr(Fe,Cr)₂ akibat kelarutan Fe dan Cr yang lebih tinggi pada fasa β -Zr.

Hasil karakterisasi XRD pada sampel *as cast* dengan variasi unsur Y ditunjukkan pada Gambar 3 (a) dan (b). Fasa utama pada sampel A-1Y adalah fasa α berdasarkan puncak bidang kristal pada hasil XRD. Penambahan Y sebesar 1 wt% membuat puncak fasa α menurun akibat menurunnya komposisi Zr serta sebagian Y juga mengendap menjadi presipitat α -Y yang terdistribusi merata sesuai dengan penelitian Jia-Qing Peng dkk [27]. Karakterisasi XRD juga dilakukan pada sampel B-0Y dan B-1Y yang ditunjukkan pada Gambar 3 (c) dan (d). Penambahan unsur Y juga membuat puncak bidang kristal fasa β -Zr terlihat jelas, hasil ini sesuai menguatkan dugaan sebelumnya bahwa Y merupakan penstabil fasa β -Zr.



Gambar 2. Struktur mikro paduan zircaloy-4-0,1Mo-xY dengan penambahan 0% Y (a); 0% Y β -heat treatment (b); 0,5% Y (c); 0,5% Y β -heat treatment (d); 1% Y (e); dan 1% Y β -heat treatment (f).



Gambar 3 Hasil karakterisasi XRD paduan zircaloy-4-0,1Mo-xY dengan penambahan 0% Y (a); 1% Y (b); 1% Y β -heat treatment (c); dan 1% Y β -heat treatment (d).

Studi Pengaruh Penambahan Yttrium dan Perlakuan Panas Beta Terhadap Ketahanan Hidrogen Paduan Zircaloy-4-0,1%Mo pada Temperatur 600°C dan 800°C (Ajra Alfatar, Eddy Agus Basuki, Djoko Hadi Prajitno)

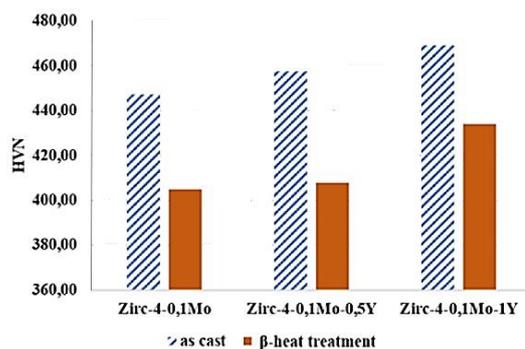
b. Pengaruh Penambahan Y dan Perlakuan Panas Beta pada Kekerasan Paduan Zircaloy-4-0,1Mo-xY

Pada penelitian ini ditinjau kekerasan paduan zircaloy-4-0,1Mo-xY yang hasilnya ditunjukkan pada Gambar 4. Pada diagram tersebut, terlihat bahwa nilai kekerasan meningkat seiring dengan penambahan unsur Y. Hal ini disebabkan oleh peningkatan presipitat sebagaimana telah dibahas pada sub bab sebelumnya. Yttrium yang memiliki kelarutan yang rendah pada temperatur ruangan akan membentuk fasa α -Y yang mengendap dan akan bertindak sebagai presipita yang dapat menghambat pergerakan dislokasi.

Selain itu, dikarenakan unsur Y meningkatkan jumlah fasa β -Zr, maka jumlah Fe dan Cr yang terlarut juga lebih banyak [22]. Kedua unsur ini akan menyebabkan distorsi kisi atom yang dapat menghambat pergerakan dislokasi. Peningkatan kekerasan paduan Zircaloy-4-0,1Mo yang ditambahkan dengan Y disebabkan oleh dua mekanisme penguatan yaitu *precipitation strengthening* dan *solid solution strengthening*.

Berdasarkan diagram pada Gambar 4, terlihat juga bahwa perlakuan panas beta mengakibatkan penurunan nilai kekerasan pada semua variasi Y. Hal ini disebabkan oleh fasa β -Zr berjumlah lebih banyak setelah dilakukan perlakuan panas tersebut, sebagaimana telah dijelaskan pada sub bab sebelumnya. Fasa β -Zr yang berstruktur kristal *Body Centered Cubic* (BCC) memiliki

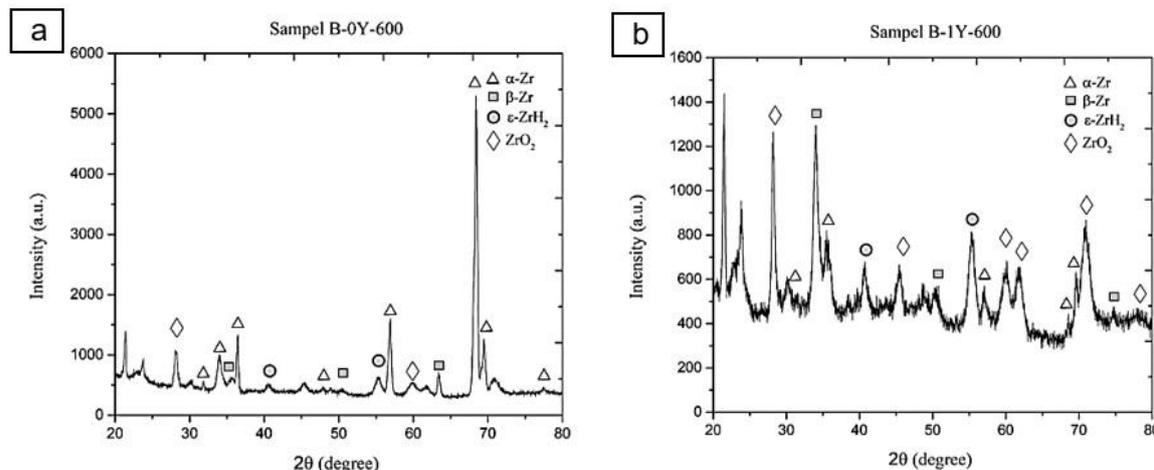
lebih banyak slip system dibandingkan α -Zr yang berstruktur *Hexagonal Close Packed* (HCP). Hal ini menyebabkan paduan zirkonium memiliki kekerasan yang lebih rendah setelah dilakukannya perlakuan panas beta



Gambar 4. Hasil uji kekerasan Zircaloy-4-0,1Mo-xY dengan variasi perlakuan panas

c. Pengaruh Penambahan Yttrium terhadap Ketahanan Hidrogen Paduan Zircaloy-4-0,1Mo-xY

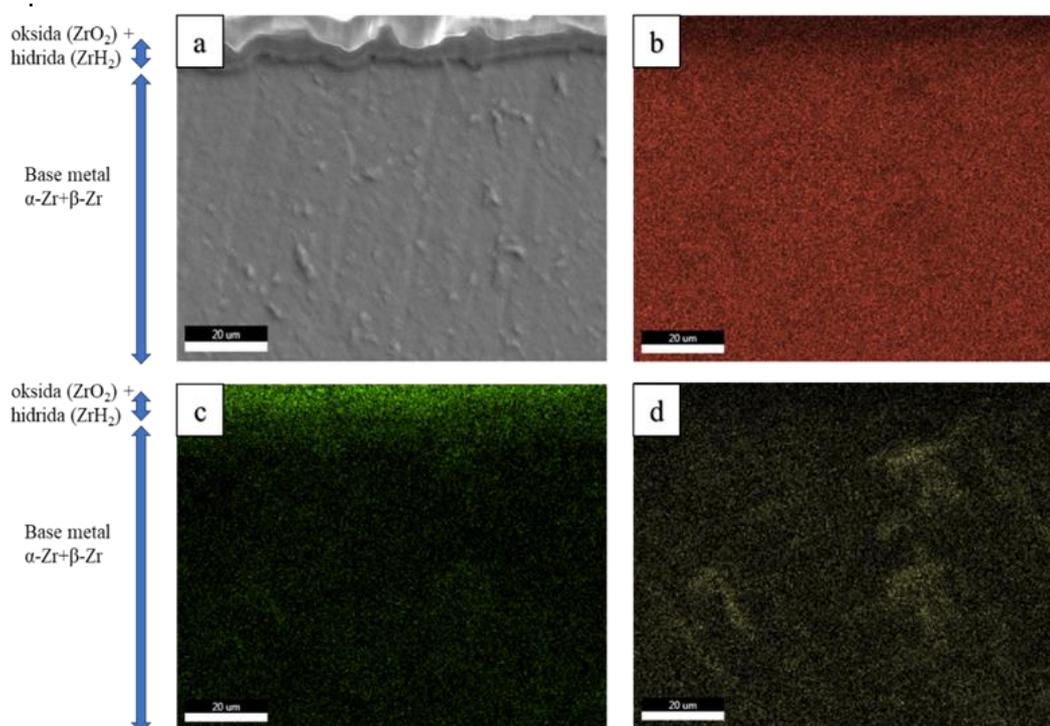
Pada proses *hydrogen charging*, terbentuk lapisan oksida dan hidrida di permukaan sampel paduan. Hal ini terbukti dari hasil karakterisasi menggunakan XRD yang dapat dilihat pada Gambar 5. Terdapat oksida berupa ZrO_2 dan hidrida berupa $Zr-H_2$. Terbentuknya ZrO_2 disebabkan oleh terdapatnya oksigen pada gas yang digunakan pada saat proses *hydrogen charging*.



Gambar 5. Difraktogram paduan zircaloy-4-0,1Mo pada temperatur 600°C dengan penambahan 0 wt% Y (a); dan 1 wt% Y (b).

Untuk mengetahui persebaran unsur yang telah terbaca oleh difraksi X-Ray, dilakukan karakterisasi pada penampang lintang sampel paduan Zircaloy-4-0,1Mo-1Y yang telah diterapkan perlakuan panas beta. Hasil karakterisasi pada Gambar 6 menunjukkan bahwa lapisan ZrO_2 terbentuk di permukaan sampel. Terbacanya ZrH_2 pada

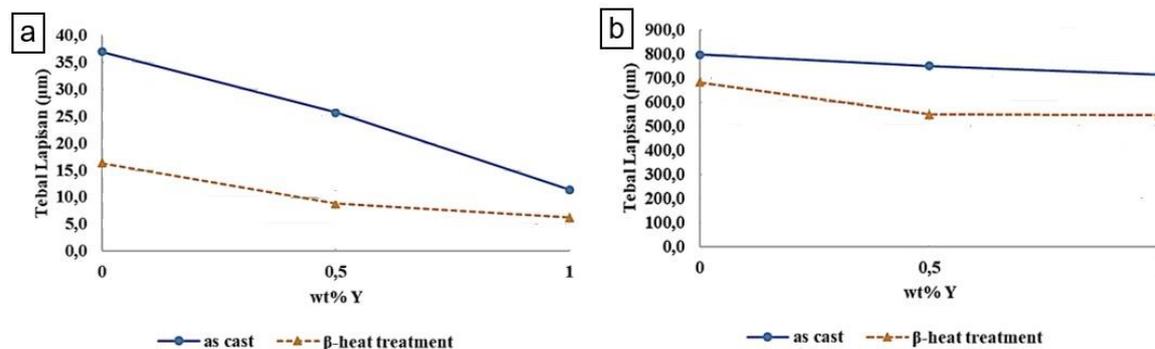
difraktogram menunjukkan bahwa, hidrida tersebut terbentuk di permukaan sampel bersama dengan ZrO_2 hal ini sesuai dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa lapisan hidrida terbentuk di permukaan sampel[4]. Pada Gambar 6 (d) juga terlihat bahwa unsur Y yang tersebar pada sampel.



Gambar 6. Hasil SEM-EDS penampang lintang sampel 3B-6 (a); X-ray mapping persebaran unsur Zr (b); persebaran unsur O (c), dan persebaran unsur Y (d).

Pada percobaan ini, dilakukan juga pengukuran terhadap ketebalan lapisan oksida dan hidrida untuk mengetahui pengaruh penambahan unsur Y terhadap ketahanan hidrogen paduan Zircaloy-4-

0,1Mo-xY. Hasil pengukuran yang ditampilkan pada Gambar 7 menunjukkan bahwa pengujian hidrogen pada temperatur 600°C dan 800°C menunjukkan hasil yang sama.



Gambar 7. Hasil pengukuran tebal lapisan oksida dan hidrida pada temperatur 600°C (a); dan 800° C (b)

Studi Pengaruh Penambahan Yttrium dan Perlakuan Panas Beta Terhadap Ketahanan Hidrogen Paduan Zircaloy-4-0,1%Mo pada Temperatur 600°C dan 800°C (Ajra Alfatar, Eddy Agus Basuki, Djoko Hadi Prajitno)

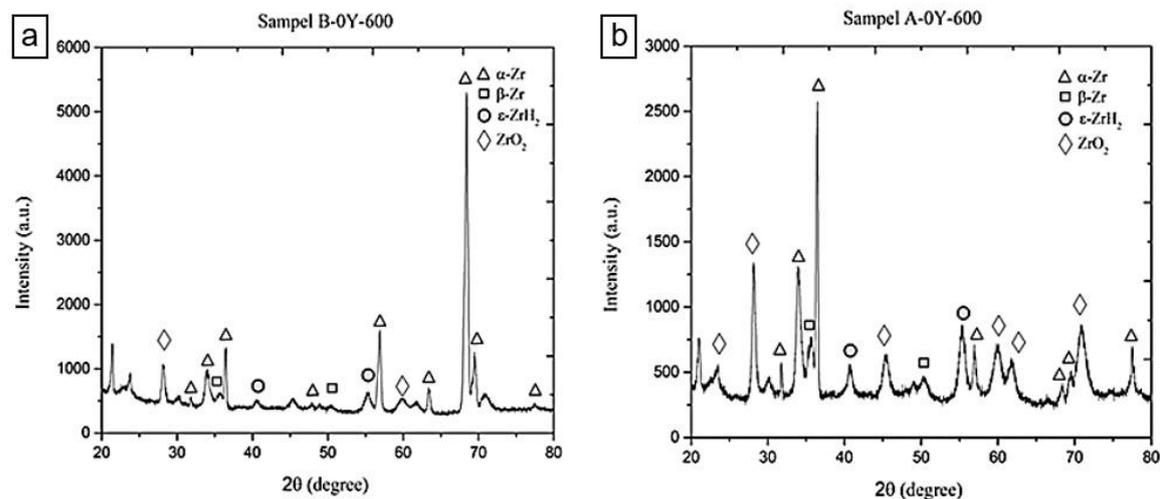
Penambahan Y dapat menurunkan ketebalan lapisan oksida dan hidrida yang terbentuk. Hal ini dikarenakan penambahan unsur Y akan meningkatkan jumlah fasa β -Zr. Sebagaimana yang dapat dilihat pada Gambar 1 Diagram fasa Zr-H, bahwa kelarutan H lebih tinggi di dalam fasa β -Zr, sehingga dapat disimpulkan bahwa jumlah hidrida yang terbentuk akan menurun seiring dengan penambahan Y. Dapat dikatakan juga bahwa Y dapat meningkatkan ketahanan hidrogen pada paduan Zircaloy-4-0,1Mo

d. Pengaruh Perlakuan Panas Beta terhadap Ketahanan Hidrogen Paduan Zircaloy-4-0,1Mo-xY

Berdasarkan Gambar 7, ketebalan lapisan hidrida pada perlakuan panas beta selalu lebih rendah dibandingkan paduan as cast pada temperatur pengujian 600°C dan 800°C. Gambar 8 menunjukkan hasil karakterisasi XRD setelah pengujian hidrogen pada temperatur 600°C pada sampel as cast dan perlakuan panas beta. Fasa yang dominan berdasarkan hasil XRD tersebut yaitu α -Zr, β -Zr, ZrH₂, dan ZrO₂. Namun berdasarkan hasil XRD tersebut dan hasil mikroskop optik pada Gambar 2(f) yaitu

sebagian besar fasa β -Zr terbentuk lebih banyak pada paduan yang telah dilakukan perlakuan panas beta. Ketahanan hidrogen pada fasa β -Zr lebih tinggi akibat kelarutan hidrogen pada fasa tersebut lebih tinggi yang ditunjukkan pada Gambar 2.2. Berdasarkan diagram fasa tersebut, kelarutan hidrogen lebih tinggi pada fasa β -Zr ketika temperatur tinggi (di atas 500°C). Sehingga ketika paduan zircaloy-4-0,1Mo-xY dilakukan pengujian maka hidrogen akan larut pada fasa β -Zr dan hanya terbentuk sedikit hidrida ZrH₂. Adapun kelarutan hidrogen pada fasa α -Zr lebih rendah sehingga ketika dilakukan pengujian maka akan terbentuk ZrH₂ yang lebih tebal. Sehingga, paduan yang mengandung lebih banyak fasa β -Zr akan lebih tahan terhadap kegagalan yang disebabkan penggetasan oleh hidrogen.

Hasil XRD pada juga menunjukkan bahwa intensitas ZrH₂ lebih rendah setelah dilakukan perlakuan panas beta dan masih terdapat beberapa fasa α -Zr yang diduga belum bereaksi dengan hidrogen. Sedangkan pada paduan as cast puncak intensitas ZrH₂ semakin terlihat serta intensitas fasa α -Zr dan β -Zr semakin rendah yang diduga sudah bereaksi dengan hidrogen dan oksida.



Gambar 8. Hasil karakterisasi XRD paduan zircaloy-4-0,1Mo setelah pengujian hidrogen pada temperatur 600°C dengan perlakuan panas beta (a); dan as cast (b).

KESIMPULAN

Penambahan yttrium meningkatkan terbentuknya fasa β -Zr yang memiliki struktur kristal BCC dengan ukuran presipitat yang semakin besar. Pembentukan fasa β -Zr setelah perlakuan panas beta menurunkan nilai kekerasan paduan. Penurunan

kekerasan paduan as cast dan perlakuan panas beta pada penambahan 0%Y; 0,5%Y; dan 1%Y berturut-turut adalah 9,5%; 10,8%; dan 7,5%.

Penambahan Yttrium meningkatkan kekerasan paduan zircaloy-4-0,1Mo melalui mekanisme *solid solution strengthening* dan

precipitation hardening. Nilai kekerasan tertinggi yaitu pada paduan zircaloy-4-0,1Mo-1Y dengan nilai 469,04 HV untuk paduan as cast dan 433,91 HV untuk paduan dengan perlakuan panas beta. Sementara itu, perlakuan panas beta menurunkan kekerasan paduan as cast akibat meningkatnya jumlah fasa β -Zr yang memiliki struktur kristal BCC.

Penambahan yttrium meningkatkan ketahanan hidrogen akibat yttrium sebagai penstabil fasa β -Zr yang memiliki kelarutan hidrogen lebih tinggi dibandingkan fasa α -Zr. Selain itu, perlakuan panas beta juga meningkatkan ketahanan hidrogen akibat lebih banyaknya fasa β -Zr pada matriks. Nilai ketebalan terkecil yaitu pada paduan zircaloy-4-0.1%Mo-1Y dengan perlakuan panas beta yaitu 6,24 μm pada temperatur pengujian 600°C dan 545,5 μm pada temperatur pengujian 800°C.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada PRTNT – BRIN yang telah menyediakan material dan sintesis serta pengujian hidrogen dalam percobaan ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. I. F. Timorria, "Populasi Penduduk Meningkat Tajam, Ketahanan Pangan Perlu Diperkuat," *Bisnis.com*, 2019. <https://ekonomi.bisnis.com/read/20191105/99/1167133/populasi-penduduk-meningkat-tajam-ketahanan-pangan-perlu-diperkuat>. diakses 22 Mei 2021
- [2]. C. R. F. Azevedo, "Selection of fuel cladding material for nuclear fission reactors," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 18, no. 8, pp. 1943–1962, Dec. 2011, doi: 10.1016/J.ENGFAILANAL.2011.06.010
- [3]. A. P. Prasetyono, "PLTN: Solusi Bauran Energi Bersih Non Intermittent," *Dewan Energi Nasional*, 2021. <https://www.den.go.id/index.php/dinamispage/index/1011-pltn-solusi-bauran-energi-bersih-non-intermittent.html>. diakses 23 Mei 2021
- [4]. D. H. Prajitno, "Kinetika Oksidasi Paduan Terner Zr-2.5%Nb-Y dan Ketahanan Lapisan Oksida terhadap Penetrasi Hidrogen pada Suhu Tinggi," Bandung, 2013.
- [5]. G. Jiang, D. Xu, P. Feng, S. Guo, J. Yang, and Y. Li, "Corrosion of FeCrAl alloys used as fuel cladding in nuclear reactors," *J. Alloys Compd.*, vol. 869, p. 159235, Jul. 2021, doi: 10.1016/J.JALLCOM.2021.159235.
- [6]. P. Immanuel, P. Ambardi, and D. H. Prajitno, "Ketahanan Oksidasi Zirkaloy-4 yang Dipadu dengan Yttrium Pada Suhu Tinggi," *Urania J. Ilm. Daur Bahan Bakar Nukl.*, vol. 25, no. 1, 2019.
- [7]. D. H. Prajitno, S. Soepriyanto, and E. A. Basuki, "Sintesis dan Karakterisasi Paduan Zr-Nb-Y," 2010.
- [8]. D. R. Lide, *CRC handbook of chemistry and physics*, vol. 85. CRC press, 2004.
- [9]. C. Lemaignan, "Zirconium alloys: properties and characteristics," *Compr. Nucl. Mater.*, pp. 217–232, 2012.
- [10]. G. S. Brady, H. H. Clauser, and J. A. Vaccari, *Materials handbook: an encyclopedia for managers, technical professionals, purchasing and production managers, technicians, and supervisors*. McGraw-Hill Education, 2002.
- [11]. G. Lotha, E. Rodriguez, Y. Chauhan, P. Jain, and E. Gregersen, "Zirconium," *Britannica*, 2019. <https://www.britannica.com/science/zirconium>.
- [12]. BATAN, "Pengenalan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir," 2015. <http://www.batan.go.id/index.php/id/infonuklir/pltn-infonuklir/generasi-pltn/924-pengenalan-pembangkit-listrik-tenaga-nuklir> (accessed Jun. 13, 2021).
- [13]. D. Féron, "Overview of nuclear materials and nuclear corrosion science and engineering," in *Nuclear Corrosion Science and Engineering*, Elsevier, 2012, pp. 31–56.
- [14]. S. J. Zinkle and J. T. Busby, "Structural materials for fission & fusion energy," *Mater. Today*, vol. 12, no. 11, pp. 12–19, 2009, doi: [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(09\)70294-9](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(09)70294-9).
- [15]. S. Suman, "Impact of hydrogen on rupture behaviour of Zircaloy-4 nuclear fuel cladding during loss-of-coolant accident: a novel observation of failure at multiple locations," *Nucl. Eng. Technol.*, vol. 53, no. 2, pp. 474–483, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.net.2020.07.017>.
- [16]. S.-S. Kim, J.-H. Koh, J.-W. Lee, and G.-I. Park, "Application of Welding Technology for a Zirconium Alloy of Nuclear Fuel Cladding," *J. Korean Weld.*

Studi Pengaruh Penambahan Yttrium dan Perlakuan Panas Beta Terhadap Ketahanan Hidrogen Paduan Zircaloy-4-0,1%Mo pada Temperatur 600°C dan 800°C (Ajra Alfatar, Eddy Agus Basuki, Djoko Hadi Prajitno)

- Join. Soc.*, vol. 29, Feb. 2011, doi: 10.5781/KWJS.2011.29.1.005.
- [17]. G. Jiang, D. Xu, P. Feng, S. Guo, J. Yang, and Y. Li, "Corrosion of FeCrAl alloys used as fuel cladding in nuclear reactors," *J. Alloys Compd.*, p. 159235, 2021.
- [18]. AZO, "Zircaloy-4(Alloy Zr4) (UNS R60804)," 2013. <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=7644>.
- [19]. R. Adamson, F. Garzarolli, B. Cox, A. Strasser, and P. Rudling, "Corrosion mechanisms in zirconium alloys," *ZIRAT12 Spec. Top. Rep.*, 2007.
- [20]. A. Motta and L.-Q. Chen, "Hydride formation in zirconium alloys," *JOM*, vol. 64, Dec. 2012, doi: 10.1007/s11837-012-0479-x.
- [21]. M. Große, M. Steinbrück, E. Lehmann, and P. Vontobel, "Kinetics of hydrogen absorption and release in zirconium alloys during steam oxidation," *Oxid. Met.*, vol. 70, pp. 149–162, Oct. 2008, doi: 10.1007/s11085-008-9113-2.
- [22]. J. Ni, Y. Zhao, L. Wang, Z. Zhang, and J. Xie, "Microstructure of Zircaloy-4 alloy during β phase quenching and determination of critical quenching diameter of its rods," *Nucl. Mater. Energy*, vol. 17, pp. 158–163, Dec. 2018, doi: 10.1016/J.NME.2018.10.014.
- [23]. R. A. Holt, "The beta to alpha phase transformation in Zircaloy-4," *J. Nucl. Mater.*, vol. 35, no. 3, pp. 322–334, 1970.
- [24]. E. Garlea *et al.*, "Intergranular Strain Evolution in a Zircaloy-4 Alloy with Basketweave Morphology," *Metall. Mater. Trans. A*, vol. 41, pp. 1255–1260, May 2010, doi: 10.1007/s11661-010-0182-x.
- [25]. HIMIKATUS, "Phase diagram of the Y-Zr system," *HIMIKATUS.RU*. <http://www.himikatus.ru/art/phase-diagr1/Y-Zr.php>.
- [26]. Y. Oshida, "2 - Materials Classification," Y. B. T.-B. and B. of T. M. (Second E. Oshida, Ed. Oxford: Elsevier, 2013, pp. 9–34.
- [27]. J.-Q. Peng, Y. Chen, G.-Q. Yan, M. Wu, L.-J. Wang, and J.-S. Li, "Solid solubility extension and microstructure evolution of cast zirconium yttrium alloy," *Rare Met.*, vol. 35, no. 4, pp. 325–330, 2016.

HALAMAN INI DIBIARKAN KOSONG