



Perapuhan Uranium dengan Metode *Hydride-Dehydride*: Meningkatkan Bahan Bakar Nuklir dalam Mendukung Transisi Energi



Zafira Naja Sakina^{*}, Fakhriyan Ardyanto, Imam Supriyadi, Budi Santoso

Program Studi Ketahanan Energi, Fakultas Manajemen Pertahanan, Universitas Pertahanan RI

^{*}Email: zafira.sakina@mp.idu.ac.id

DOI: <https://doi.org/10.33369/pendipa.9.3.836-843>

ABSTRACT

The Hydride–Dehydride (HDH) method is a critical technology in uranium processing, capable of improving the efficiency and quality of nuclear fuel through a more precise embrittlement process compared to conventional techniques. This technology ensures uniform particle size and minimizes material loss during fabrication. This study was conducted using a literature review approach, supported by experimental data obtained during a 2022 internship at the Research Center for Nuclear Fuel Cycle and Radioactive Waste Technology (PRTDBBLNR). The focus of the investigation was the characterization of uranium–molybdenum (U–Mo) alloy before and after the HDH treatment process. The results indicate that heat treatment at 500 Å°C for 5 hours followed by annealing significantly increases the hardness of the U–Mo alloy. A phase transformation was also observed, indicated by the presence of α -U in all post-treatment samples. Nevertheless, the density of the alloy showed no substantial change. The HDH process successfully produced high-purity U–Mo powder at various molybdenum concentration levels. However, increasing Mo content resulted in lower powder density. The morphology of U-7Mo powder exhibited flake-like shapes with a rough surface, which is favorable for further fabrication in advanced fuel element production. Overall, these findings reinforce the relevance and significant potential of HDH technology in supporting advanced nuclear reactor fuel production and strengthening national nuclear energy security in a sustainable manner. The Hydride–Dehydride (HDH) method represents an important innovation in uranium processing to improve the efficiency and quality of nuclear fuel. This technology enables a more precise embrittlement of uranium compared to conventional methods such as milling and crushing, resulting in more uniform particle size and reduced material loss throughout the process. This study adopts a literature-based approach supported by practical work conducted at the Center for Research on Nuclear Fuel Cycle Technology and Radioactive Waste Management (PRTDBBLNR) in 2022, in order to evaluate the effectiveness of HDH in strengthening nuclear energy security in Indonesia. The analysis shows that HDH improves the microstructural quality of uranium and enhances processing yield by minimizing waste generation. These advantages highlight the high relevance of HDH technology in supporting the development of Generation IV nuclear reactors, which emphasize efficiency and sustainability within the fuel cycle. However, its implementation in Indonesia still faces challenges, particularly in terms of industrial infrastructure readiness, safety regulations, and nuclear material protection. Therefore, strategic policies are required to promote further research and technological investment, as well as strong collaboration between academia, government, and industry. Integrating HDH into the national uranium processing roadmap has the potential to establish this technology as a key pillar in ensuring a sustainable nuclear fuel supply and enhancing Indonesia’s energy security in the future.

Keywords: Hydride-Dehydride; Uranium Processing; Nuclear Energy Security; Research Reactors.

ABSTRAK

Metode *Hydride–Dehydride* (HDH) merupakan teknologi penting dalam pemrosesan uranium yang mampu meningkatkan efisiensi dan kualitas bahan bakar nuklir melalui proses perapuhan yang lebih

presisi dibandingkan metode konvensional. Teknologi ini menghasilkan ukuran partikel seragam dan meminimalkan kehilangan material selama proses fabrikasi. Studi ini dilakukan melalui pendekatan studi literatur yang diperkuat data hasil kerja praktik pada tahun 2022 di Pusat Riset Teknologi Daur Bahan Bakar Nuklir dan Limbah Radioaktif (PRTDBBLNR), dengan fokus pada analisis karakteristik paduan uranium-molibdenum (U-Mo) sebelum dan sesudah perlakuan *Hydride-Dehydride*. Hasil analisis menunjukkan bahwa perlakuan panas pada temperatur 500 Â°C selama 5 jam dengan pendinginan secara annealing meningkatkan kekerasan paduan U-Mo secara signifikan. Perubahan fase juga terdeteksi, ditandai dengan munculnya fase α -U pada seluruh sampel setelah perlakuan panas. Meskipun demikian, densitas paduan cenderung tidak mengalami perubahan berarti. Proses HDH berhasil menghasilkan serbuk U-Mo dengan tingkat kemurnian tinggi pada berbagai variasi kandungan Mo. Namun, peningkatan kadar Mo diketahui menurunkan densitas serbuk yang dihasilkan. Morfologi serbuk U-7Mo menunjukkan bentuk serpihan dengan permukaan kasar yang ideal untuk proses fabrikasi lanjutan dalam pembuatan elemen bakar. Secara keseluruhan, temuan ini menegaskan relevansi dan potensi besar teknologi HDH dalam mendukung produksi bahan bakar reaktor generasi lanjut serta ketahanan energi nuklir nasional secara berkelanjutan.

Kata kunci: Hydride-Dehydride; Pemrosesan Uranium; Ketahanan Energi Nuklir; Reaktor Riset.

PENDAHULUAN

Transisi energi menuju sistem yang lebih bersih dan berkelanjutan telah menjadi agenda strategis dalam upaya memenuhi meningkatnya kebutuhan energi nasional serta mendukung pencapaian target net zero emission. Ketergantungan Indonesia pada energi fosil menimbulkan risiko terhadap tingginya emisi karbon serta ketidakstabilan pasokan akibat dinamika pasar global. Dalam konteks tersebut, energi nuklir dipandang sebagai salah satu solusi yang mampu menyediakan daya baseload secara andal, berkelanjutan, rendah emisi, serta memiliki densitas energi yang tinggi. Selain mendukung dekarbonisasi, penguasaan teknologi nuklir juga berpotensi memperkuat ketahanan energi melalui peningkatan kemandirian pasokan dan kapabilitas teknologi nasional.

Siklus bahan bakar nuklir menjadi aspek kritis dalam menjamin efisiensi operasional dan keselamatan reaktor. Pemrosesan uranium, khususnya proses perapuhan untuk menghasilkan bentuk dan kualitas serbuk yang sesuai kebutuhan fabrikasi, merupakan tahapan fundamental dalam produksi bahan bakar. Metode *Hydride-Dehydride* (HDH) muncul sebagai inovasi yang mampu menghasilkan ukuran partikel seragam, meningkatkan homogenitas mikrostruktur material, serta meminimalkan kehilangan material dan limbah produksi dibandingkan metode konvensional seperti milling dan crushing. Keunggulan ini menjadi sangat penting untuk mendukung

pengembangan reaktor Generasi IV yang mengedepankan efisiensi pembakaran dan keberlanjutan siklus bahan bakar.

Berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 2 Tahun 2014, reaktor nuklir diklasifikasikan menjadi reaktor daya dan reaktor riset. Reaktor daya memanfaatkan panas hasil fisi sebagai pembangkit listrik, sementara reaktor riset memanfaatkan neutron dan radiasi untuk berbagai kepentingan seperti produksi radioisotop, pengujian material, dan penelitian ilmiah. Indonesia saat ini mengoperasikan tiga reaktor riset, yaitu Reaktor Triga 2000 di Bandung, Reaktor Kartini di Yogyakarta, dan Reaktor Serbaguna G.A. Siwabessy (RSG-GAS) di Serpong. Dari ketiganya, RSG-GAS dengan kapasitas 30 MWt merupakan reaktor riset terbesar di Indonesia dan telah beroperasi sejak tahun 1987 sebagai reaktor bertipe *Multipurpose Testing Reactor* (MTR).

Pengembangan reaktor riset berbahan bakar uranium pengkayaan rendah (LEU) menghadapi tantangan terkait kebutuhan material dengan densitas uranium tinggi, stabilitas iradiasi baik, mudah difabrikasi, dan ekonomis. Paduan uranium-molibdenum (U-Mo) menjadi kandidat yang banyak diteliti karena memenuhi karakteristik tersebut. Untuk bahan bakar tipe dispersi, teknologi pembuatan serbuk menjadi krusial. Berbagai metode dapat digunakan, seperti *milling*, *crushing*, *machining*, *atomization*, dan HDH. Di antara metode tersebut, HDH dinilai sangat menjanjikan untuk

aplikasi bahan bakar yang membutuhkan stabilitas tinggi pada temperatur operasi rendah.

Indonesia terus melakukan pengembangan bahan bakar reaktor riset, termasuk penguasaan teknologi fabrikasi dan *post-irradiation examination* (PIE), sebagai langkah menuju kemandirian pasokan bahan bakar. Oleh karena itu, penelitian terkait penerapan metode HDH dalam pembuatan serbuk U-Mo menjadi sangat penting sebagai bagian dari upaya memperkuat infrastruktur kapasitas industri nuklir nasional dan memastikan ketahanan energi di masa depan.

METODE PENELITIAN

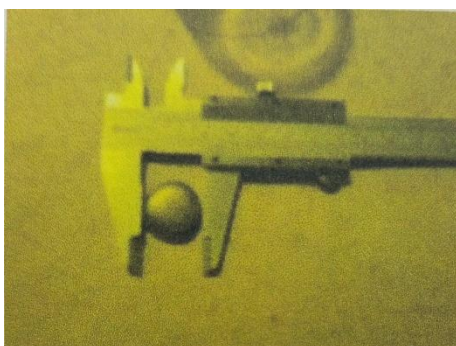
Penelitian ini dilaksanakan pada tahun 2022 di Laboratorium Instalasi Elemen Bakar Eksperimental (IEBE), Gedung 65, Direktorat Pengelolaan Fasilitas Ketenaganukliran (DPFK), Pusat Riset Teknologi Daur Bahan Bakar Nuklir dan Limbah Radioaktif (PRTDBBLNR) – BRIN, Kawasan Nuklir Serpong. Fokus penelitian adalah penerapan metode *Hydride-Dehydride* (HDH) untuk menghasilkan serbuk uranium-molibdenum (U-Mo) sebagai material potensial bahan bakar reaktor riset.

A. Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan beserta kegunaannya sebagai berikut:

Tabel 1. Bahan yang digunakan beserta kegunaannya

Nama Bahan	Kegunaan
Paduan U-Mo	Sampel Penelitian
Alkohol	Untuk mensterilkan alat-alat
Gas Argon	Untuk proses <i>flushing</i>
Gas Hidrogen	Untuk proses <i>hydride</i>



Gambar 1. Ingot U-Mo



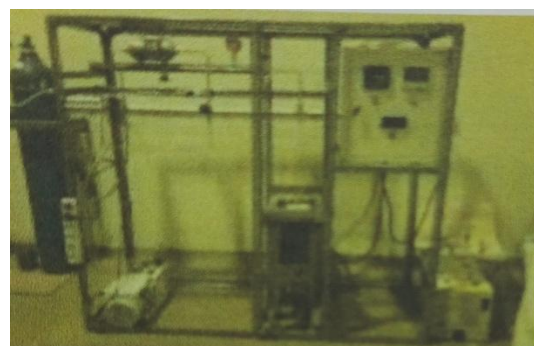
Gambar 2. Gas Hidrogen dan Gas Argon

B. Peralatan Penelitian

Alat yang digunakan beserta kegunaannya sebagai berikut:

Tabel 2. Alat yang digunakan

Nama Alat	Kegunaan
Alat Hydride-Dehydride	Alat utama dalam proses hydride-dehydride
Mesin Potong	Digunakan untuk memotong paduan U-Mo
Mortar dan Alu	Digunakan untuk menggerus bongkahan paduan U-Mo



Gambar 3. Alat Hydride-Dehydride (Author's)



Gambar 4. Mesin Potong (*Author's*)

C. Prosedur Penelitian

1. Uji Kekerasan paduan U-Mo sebelum proses perlakuan panas.

Pengujian paduan U-Mo sebelum proses perlakuan panas dilakukan untuk mengetahui sifat paduan U-Mo sebelum dilakukan proses *isothermal decomposition*. Pengujian yang dilakukan adalah uji kekerasan paduan.

2. Karakteristik Struktur Ingot Paduan U-Mo

Pada sampel dilakukan preparasi terlebih dahulu sebelum diamati strukturnya. Paduan yang telah dipotong kemudian dilakukan proses mounting yang bertujuan agar sampel mudah dipegang. Tahap selanjutnya adalah grinding. Proses grinding dilakukan secara bertahap dengan menggunakan kertas abrasif. Proses selanjutnya adalah polishing dengan menggunakan pasta alumina dan setelah permukaan halus dan rata dilakukan etching. Etchant yang digunakan adalah asam nitrat, gliserol, dan asam florida.

3. Proses perlakuan panas (*isothermal decomposition heat treatment*)

Proses perlakuan panas dilakukan dengan menggunakan alat *hydride-dehydride* pada temperatur 500 Â°C selama 5 jam kemudian dilanjutkan dengan pendinginan secara annealing. Kecepatan pemanas 5 °C per menit dan dilakukan dalam suasana gas argon. Tujuan dari proses *isothermal decomposition heat treatment* adalah untuk mengubah fasa γ -U menjadi fasa α -U. Dekomposisi yang terjadi diharapkan hanya Sebagian saja dan tidak

keseluruhan data dalam sampel. Dengan munculnya fasa α -U diharapkan proses *hydride-dehydride* bagi ingot paduan U-Mo untuk menjadi serbuk akan lebih mudah.

4. Pengujian paduan U-Mo setelah proses perlakuan panas

Pengujian paduan U-Mo yang dilaksanakan setelah proses perlakuan panas sama seperti pengujian yang dilakukan pada paduan U-Mo sebelum proses perlakuan panas. Hal ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh proses *isothermal decomposition heat treatment* terhadap sifat paduan U-Mo.

5. Pembuatan serbuk U-Mo

Proses pembuatan serbuk dengan metode *hydride-dehydride* dilakukan dengan tahapan sebagai berikut:

- 1) Paduan U-Mo dipotong-potong menggunakan mesin potong.
- 2) Paduan U-Mo kemudian dimasukkan ke dalam reaktor gelas untuk direaksikan dengan gas hidrogen.
- 3) Proses vakum dilakukan terhadap reaktor kemudian dilakukan flushing dengan menggunakan gas argon. Proses *flushing* dilakukan sebanyak 2-3 kali. Setelah proses *flushing* selesai, proses vakum Kembali dilakukan agar semua udara keluar dari reaktor. Hal ini bertujuan untuk meminimalisir interaksi antara sampel dengan oksigen.
- 4) Temperatur proses *hydride* diatur pada temperature 350 Â°C. setelah temperatur proses tercapai, sistem ditahan 1 jam untuk kemudian dimasukkan gas hidrogen sampai dengan tekanan mencapai 1,1 bar.
- 5) Tekanan kemudian dipantau selama 60 menit. Terjadinya penyerapan hidrogen oleh sampel ditandai dengan terjadinya penurunan tekanan dalam reaktor. Ketika terjadi penurunan tekanan, maka gas H₂ ditambahkan ke dalam reactor hingga tekanan kemali seperti semula 1,1 bar. Ketika tidak terjadi penurunan tekanan, maka dilakukan penurunan suhu sampai dengan temperature ruang. Proses *hydride* selesai dilakukan.
- 6) Proses dilanjutkan dengan proses *dehydride* yang bertujuan untuk mengeluarkan gas

hidrogen dari dalam sampel. Proses ini dilakukan pada temperature 550 Â°C selama 10 jam.

- 7) Serbuk yang dihasilkan kemudian ditimbang Kembali setelah proses *hydride-dehydride* selesai dilakukan.
- 8) Paduan hasil *dehydride* yang masih berupa bongkahan kemudian digerus secara manual menggunakan mortar dan alu di dalam *glove box* dengan suasana gas argon.
- 9) Tahapan-tahapan pembuatan serbuk nomor 1-8 diulangi untuk masing-masing komposisi paduan U-Mo. Proses homogenisasi dilakukan sebelum proses HDH untuk memastikan bahwa fasa γ -U.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pengujian Paduan U-Mo

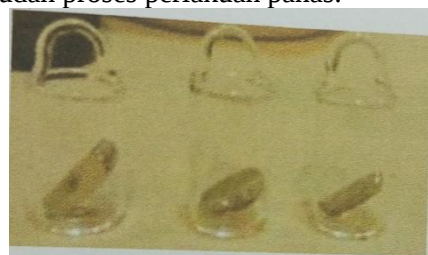
Seluruh paduan U-Mo melewati proses karakteristik awal terlebih dahulu sebelum dilakukan proses perlakuan panas. Hal ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik awal paduan hasil proses peleburan sebelum mengalami proses perlakuan panas. Paduan U-Mo yang akan dikarakterisasi di dalam *glove box*. Pemotongan dilakukan di dalam *glove* untuk menghindari kontaminasi logam uranium terhadap pekerja maupun peralatan laboratorium lainnya. Pemotongan dilakukan agar paduan uranium dapat masuk ke dalam wadah yang diletakkan di dalam alat *hydride-dehydride* untuk proses perlakuan panas. Logam uranium molibdenum yang telah dipotong terjadi pada gambar 5.



Gambar 5. Paduan U-Mo yang sudah dipotong (*Author's*)

Sebelum proses perlakuan panas, dilakukan *flushing* kedalam *hydride-dehydride* terlebih dahulu menggunakan gas argon untuk menghilangkan udara yang berada di dalam alat. Proses *flushing* selalu

dilakukan sebelum melakukan proses perlakuan panas maupun sebelum proses HDH. *Flushing* dilakukan sebanyak 3x untuk memastikan tidak ada udara yang terjebak di dalam tungku. Setelah proses *flushing*, kemudian dilakukan proses vakum dan perlakuan panas dimulai. Proses perlakuan panas dilakukan selama 5 jam untuk masing-masing paduan logam dalam suasana vakum. Perlakuan panas bertujuan untuk merubah Sebagian fasa γ -U menjadi fasa α -U agar proses HDH menjadi lebih mudah dilakukan. Gambar 6 dan 7 menunjukkan paduan U-Mo sebelum dan sesudah proses perlakuan panas.



Gambar 6. Paduan U-Mo sebelum proses perlakuan panas (*Author's*)



Gambar 7. Paduan U-Mo sesudah proses perlakuan panas (*Author's*)

B. Densitas dan Uji Kekerasan Paduan U-Mo

Perhitungan teoritis densitas paduan U-Mo dengan fasa γ -U dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan 3 dimana X_{Mo} adalah fraksi berat Mo dalam persen berat dan ρ adalah densitas.

$$\rho_{U-Mo} = X_{Mo}\rho_{Mo} + (1 - X_{Mo})\rho_U$$

Dalam pengembangan bahan bakar nuklir yang baru, diperlukan data-data untuk proses kualifikasi bahan bakar nuklir baru. Kualifikasi bahan bakar nuklir bertujuan

untuk memberikan informasi kepada pihak yang membuat regulasi terkait penggunaan dan pemanfaatan nuklir dan pihak yang mengoperasikan reaktor riset digunakan secara aman dan selamat di dalam reaktor nuklir. Salah satu data yang pengujian mekanik yang diperlukan adalah uji kekerasan karena mempengaruhi proses fabrikasi dari material bahan bakar nuklir (IAEA, 2009).

Kekerasan paduan U-Mo meningkat seiring dengan meningkat kadar Mo. Hal ini sesuai dengan teori *solid solution strengthening* pada logam. Logam molibdenum akan larut padat pada logam uranium. Logam molybdenum (bertindak sebagai logam pengotor) yang larut dalam logam uranium. Interaksi antara regangan kisi, *impurity atom*, dan dislokasi menyebabkan pergerakan dislokasi menjadi terhambat. Semakin banyak pengotor dalam paduan, maka semakin banyak regangan kisi yang terjadi dan pergerakan dislokasi menjadi semakin terhambat. Terhambatnya pergerakan dislokasi menyebabkan kekerasan material mejadi semakin meningkat.



Gambar 8. Grafik antara kekerasan vs kandungan Mo sebelum dan sesudah perlakuan panas (Ganisa, 2019)

Hasil pengujian kekerasan sesudah perlakuan panas menunjukkan bahwa kekerasan U-Mo terlihat pada Gambar 8.

Peningkatan nilai kekerasan setelah proses perlakuan panas terhadap paduan U-Mo dilaporkan Zhang dkk (2017). Dalam tulisannya Zhang dkk (2017) melaporkan terjadi peningkatan kekerasan untuk paduan

U-6Mo dan U-8Mo setelah proses perlakuan panas namun pada paduan U-10Mo tidak terjadi peningkatan kekerasan yang signifikan Zhang dkk (2017) menyatakan bahwa peningkatan kekerasan setelah proses perlakuan proses isothermal lebih dipengaruhi oleh fasa yang terdapat pada paduan dibandingkan dengan kandungan Mo. Pada penelitian yang dilakukan Zhang dkk (2017), paduan U-Mo mengalami proses homogenisasi pada temperature 1000°C sebelum dilakukan *isothermal decomposition heat treatment*.

C. Karakteristik Serbuk Paduan U-Mo

Proses *hydride* untuk masing-masing paduan dilakukan dengan menambahkan gas hydrogen kedalam alat *hydride-dehydride* hingga indikator tekanan pada alat menunjukkan tekanan 1,1 bar pada temperatur 350°C. Ketika indikator tekanan menunjukkan penurunan, maka gas hydrogen dimasukkan Kembali kedalam alat *hydride-dehydride* hingga tekanan mencapai 1,1 bar. Gambar 9 menunjukkan serbuk hasil proses *hydride-dehydride* setelah dua kali pengisian gas hydrogen sampai tekanan proses mencapai 1,1 bar.



Gambar 9. Serbuk hasil proses *hydride-dehydride* (Author's)

Dari hasil pengamatan terlihat banyak dihasilkan dari paduan U-7Mo. Ini membuktikan bahwa semakin tinggi kandungan Mo di dalam paduan, semakin

sedikit serbuk yang dihasilkan pada kondisi proses yang sama.

Proses *hydride-dehydride* pada paduan U-5Mo, U-7Mo dilakukan oleh Oliveira dkk (2006). Fenomena yang terjadi pada penelitian Oliveira dkk (2006) sama dengan fenomena yang terjadi pada penelitian ini. Semakin tinggi kandungan Mo dalam paduan U-Mo, maka akan semakin sulit logam paduan U-Mo tersebut untuk dirapuhkan. Hal ini kemungkinan berkaitan dengan keberadaan fasa α -U di dalam paduan U-Mo.

Fasa α -U memegang peranan penting dalam pembuatan serbuk pada proses *hydride-dehydride*. Keberadaan fasa α -U di dalam paduan U-Mo berasal dari hasil peleburan dan dekomposisi fasa γ -U setelah proses perlakuan panas (Oliveira dkk, 2006). Keberadaan unsur Mo yang terbatas di dalam fasa γ -U menyebabkan stabilitas fasa γ -U menjadi rendah. Fasa γ -U dengan stabilitas yang rendah ini cenderung mengalami dekomposisi fasa. Ketika dilakukan proses perlakuan panas pada temperatur dibawah 560°C. Semakin banyak fasa α -U yang terbentuk, paduan U-Mo semakin reaktif terhadap hydrogen dan hidrida yang terbentuk menjadi semakin banyak. Hidrida yang banyak akan menyebabkan serbuk yang dihasilkan menjadi banyak (Oliveira dkk, 2006). Bahwa semakin tinggi kandungan unsur molibdenum di dalam paduan, kemampuan untuk mempertahankan fasa γ -U setelah proses perlakuan panas menjadi semakin tinggi. Neto dkk menjelaskan bahwa serbuk halus hasil proses HDH sangat dipengaruhi oleh adanya fasa α -U memiliki struktur kristal ortorombik dan sangat relative terhadap hydrogen. Proses *hydride* menyebabkan kisi kristal dari fasa α -U mengalami internal strain yang sangat hebat dan perubahan struktur kristal. Fenomena ini menyebabkan terbentuknya serbuk uranium dengan ukuran yang halus setelah proses *dehydride* (Neto dkk, 2013). Fasa α -U juga membentuk hibrida dengan gas hydrogen. Ketika proses *hydride*. Terbentuknya hidrida menyebabkan adanya perbedaan densitas antar paduan logam

uranium dengan hidrida. Perbedaan densitas ini menyebabkan kerusakan struktur awal dari paduan logam dan permukaan logam terkelupas menjadi serbuk hidrida (Garnetti, 2009). Fasa γ -U memiliki tegangan tarik internal sebagai akibat dari molibdenum yang melarutkan dalam uranium (*substitutional solid solution*). Proses *hydride* menyebabkan atom hydrogen menempati posisi interstisi diantara atom U dan Mo sehingga timbul tegangan tekan. Sebagian tegangan tarik yang timbul akibat dari fenomena *solid solution*. Hal ini menunjukkan bahwa kisi dari fasa γ -U memiliki ketahanan terhadap proses *hydride* yang lebih tinggi dibandingkan dengan kisi fasa α -U.

KESIMPULAN

Metode *Hydride-Dehydride* (HDH) terbukti menjadi teknologi pemrosesan uranium yang unggul dalam menghasilkan serbuk dengan ukuran partikel seragam, mikrostruktur stabil, serta kemurnian tinggi yang sesuai untuk kebutuhan bahan bakar nuklir berperforma lanjut. HDH mampu meningkatkan efisiensi proses fabrikasi melalui optimasi yield, minimisasi limbah, serta pengendalian karakteristik fasa yang berdampak langsung pada peningkatan kinerja bahan bakar, terutama untuk aplikasi pada reaktor Generasi IV. Keberhasilan HDH dalam mempertahankan fasa metastabil seperti γ -U dan mendukung peningkatan densitas energi menjadikannya solusi strategis dalam penguatan keberlanjutan siklus bahan bakar nuklir.

Dalam konteks ketahanan energi Indonesia, adopsi HDH memberikan peluang besar bagi peningkatan kemandirian pasokan bahan bakar nuklir, pengurangan ketergantungan impor, serta pemanfaatan optimal cadangan uranium domestik. Implementasi teknologi ini sekaligus mendukung target nasional transisi energi dan pencapaian emisi karbon net-zero pada tahun 2060.

Namun demikian, keberhasilan implementasi HDH memerlukan kesiapan menyeluruh, meliputi: ketersediaan infrastruktur pemrosesan yang aman dan sesuai standar, kapabilitas sumber daya manusia yang

kompeten, penguatan kerangka regulasi dan keselamatan nuklir, serta upaya sosialisasi publik yang berkelanjutan. Oleh karena itu, dukungan riset lanjutan dan investasi teknologi menjadi faktor krusial agar HDH dapat diintegrasikan secara optimal dalam roadmap industri nuklir nasional.

Dengan demikian, metode HDH berpotensi menjadi pilar utama dalam pengembangan bahan bakar nuklir modern di Indonesia—yang tidak hanya meningkatkan efisiensi operasional sistem tenaga nuklir, tetapi juga memperkuat ketahanan energi nasional secara jangka panjang dan berkelanjutan

DAFTAR PUSTAKA

- Berghe, S. V., & Lemoine, P. (2014). Review of 15 years of high-density low-enriched UMo dispersion fuel development for research reactors in Europe. *Nuclear Engineering and Technology*, 46(2), 125–146.
- Balart, S., Bruzzoni, P., Granovsky, M., Gribaudo, L., & Hermida, J. (2000). U-Mo alloy powder obtained by a hydride-dehydride process. *International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors (RERTR)*, Las Vegas, Nevada.
- Creasy, J. T. (2011). Thermal properties of uranium-molybdenum alloys: Phase decomposition effects of heat treatment [Master's thesis, Texas A&M University].
- Clark, C. R., Meyer, M. K., & Strauss, J. T. (1998). Fuel powder production from ductile uranium alloys. *International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors (RERTR)*, Sao Paulo, Brazil.
- Chen, M., Xiong, Y. F., Jing, W. Y., Jia, J. P., & Zhang, P. C. (2010). Characterization of γ -U-10 wt.% Mo alloy powders obtained by hydride-milling-dehydride process. *Journal of Nuclear Materials*, 400(1), 69–72.
- Garnetti, D. J. (2009). Uranium powder production via hydride formation and alpha phase sintering of uranium-zirconium alloys for advanced nuclear fuel applications [Master's thesis, Texas A&M University].
- Ganisa, et al. (2019). Karakterisasi serbuk paduan U-Mo hasil proses hydride-dehydride sebagai kandidat bahan bakar reaktor riset nuklir. *Universitas Gadjah Mada*.
- Havela, L., & Ngan, N. T. H. K. (2017). Hydrogen absorption in uranium-based alloys with cubic γ -U structure. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*.
- International Atomic Energy Agency. (2009). Good practices for qualification of high-density low enriched uranium research reactor fuels. IAEA.
- Kim, Y. S. (2012). Uranium intermetallic fuels (U-Al, U-Si, U-Mo). Elsevier Inc.
- Neto, R. M. L., Rocha, C. J., Carvalho, E. U., Riella, H. G., & Durazzo, M. (2014). Investigation of powdering ductile gamma U-10 wt.% Mo alloy for dispersion fuels. *Journal of Nuclear Materials*, 445, 218–223.
- Oliveira, F. B. V., Riella, H. G., & Durazzo, M. (2006). Gamma-molybdenum alloys behavior under hydrogen atmosphere. 7^o CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais.
- Oliveira, F. B. V., & Riella, H. G. (2008). Hydrogen absorption-desorption and gamma-UMo nuclear fuel powder production. *Materials Science Forum*, 591–593, 201–205.
- Supardjo. (2007). Studi proses pembuatan serbuk UMo sebagai bahan bakar dispersi UMo-Al untuk reaktor riset. *Prosiding PPI-PDIPTN*, 217–223.
- Supardjo. (2014). Pengenalan bahan bakar reaktor riset. *Diklat Teknologi Fabrikasi Bahan Bakar Reaktor Riset*.
- Supardjo, & Masrukan. (2008). Pembuatan dan karakterisasi paduan U-Mo sebagai kandidat bahan bakar nuklir tipe dispersi. *Jurnal Teknologi Bahan Nuklir*, 4(2), 48–57.
- Yemel'yanov, V. S., & Yevstyukhin, A. I. (1969). The metallurgy of nuclear fuel: Properties and principles of the technology of uranium, thorium and plutonium. Pergamon Press.
- Zhang, X., Yang, Z., Meng, Y., Kang, S., & He, J. (2017). Influence of Mo content on the γ -U phase stability and properties of U-Mo alloy. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 182, 01202.