

FABRIKASI DAN PENGUJIAN PELAT ELEMEN BAKAR U-Zr-Nb/Al

Masrukan, Suyoto, Yatno D.A
Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir

ABSTRAK

Telah dilakukan fabrikasi dan pengujian pelat elemen bakar U-Zr-Nb/Al. Pada percobaan ini dibuat bahan bakar paduan U-10Zr-4Nb/Al yang dilanjutkan dengan pembuatan pelat elemen bakar (PEB) U-10Zr-4Nb/Al. Mula-mula dibuat serbuk U-10Zr-4Nb/Al yang dibuat dari ingot U-10Zr-4Nb dengan cara hidriding-dehidriding. Serbuk U-10Zr-4Nb/Al selanjutnya dicampur dengan serbuk Al dan dipress hingga menjadi inti elemen bakar (IEB) dan dilanjutkan dibuat PEB melalui pengerolan setelah ditutup dengan kelongsong AlMg2. Hasil pengukuran IEB mempunyai ketebalan yang hampir sama dengan standar yakni sebesar 3,17 mm. Dari pengujian merusak (DT) yakni kondisi meat pada sisi jauh (SJ) dan tengah (TG) tidak ditemukan *dogbone* maupun *whisker* sedangkan pada sisi dekat (SD) masih ditemukan *dogbone*. Pada pengukuran ketebalan kelongsong diperoleh ketebalan kelongsong sebesar 0,19 mm pada sisi jauh dimana ketebalan kelongsong tersebut dibawah yang disyaratkan ($> 0,250$ mm). Sementara itu, hasil pengujian tidak merusak (NDT) yakni pemeriksaan *white point* dan *blister* secara visual tidak terlihat terbentuknya *white point* maupun *blister*. Dari pengujian PEB U-10Zr-4Nb dapat disimpulkan bahwa PEB U-10Zr-4Nb /Al yang dibuat masih belum memenuhi semua persyaratan yang diminta.

Kata kunci : Fabrikasi, bahan bakar, U-Zr-Nb/Al, reaktor riset.

PENDAHULUAN

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir (PTBBN) merupakan pusat yang mempunyai tugas mengembangkan bahan bakar reaktor daya maupun riset. Pengembangan bahan bakar reaktor daya maupun riset ditujukan untuk mendapatkan bahan bakar berdensitas tinggi. Sesuai dengan tugas dari Kepala Pusat PTBBN dalam penelitian ini dilakukan pengembangan bahan bakar reaktor riset berbasis U-Zr, dimana pengembangan bahan bakar reaktor riset berbasis U-Zr mulai dilakukan sejak tahun 2007^[1]. Pada saat ini reaktor riset RSG Siwabessy menggunakan bahan bakar paduan uranium silisida (U_3Si_2/Al), tetapi paduan uranium silisida tersebut mempunyai kelemahan dalam mendaur ulang logam Si^[2]. Oleh karena itu perlu dicari bahan bakar alternatif sebagai pengganti bahan bakar uranium silisida tersebut. Salah satu paduan uranium yang dikembangkan di PTBBN selain paduan berbasis U-Mo yaitu paduan U-Zr. Pengembangan bahan bakar berbasis U-Zr ini didasarkan pertimbangan antara lain : densitas tinggi, serapan neutron rendah, mudah difabrikasi, mudah dilakukan olah ulang. Tujuan penelitian ini untuk mendapatkan PEB U-10Zr-4Nb.

Penelitian pengembangan pembuatan bahan bakar berbasis U-Zr telah banyak dilakukan diantaranya oleh Balart dkk yang telah membuat bahan bakar paduan U-4Zr-2Nb dengan densitas $3,17 \text{ gU/cm}^3$. Berdasarkan hasil uji irradiasi, sifat neutronik, dan fabrikasi diperoleh bahwa bahan bakar paduan U-4Zr-2Nb cukup baik sebagai bahan bakar bila densitas paduan mencapai $8,0 \text{ g U/cm}^3$ ^[3]. Percobaan pembuatan PEB di

PTBBN dengan kandungan Zr sebesar 6% (U-6Zr) dan tingkat muat uranium/densitas sebesar $5,2 \text{ g/cm}^3$ telah dilakukan dan dikenai pengujian meliputi pengujian tidak merusak maupun merusak^[4]. Pada percobaan ini pembuatan PEB dilakukan dengan menambahkan logam padu Nb sebesar 4% ke dalam bahan bakar paduan U-Zr. Penambahan logam Nb dimaksudkan untuk memperbaiki karakteristik bahan bakar tersebut diantaranya sifat-mekanik, korosi, termal dan mikrostruktur. Selain logam Nb beberapa unsur logam dapat ditambahkan untuk memperbaiki karakteristik paduan U-Zr tersebut diantaranya Ti, Si, Mo^[5]. Penambahan unsur-unsur tersebut dimaksudkan untuk memperluas daerah fasa γ , karena paduan U-Zr ini akan lebih stabil apabila berada pada daerah fasa γ . Oleh karena itu, pada percobaan ini dibuat bahan bakar paduan U-Zr dengan menambahkan logam Nb menjadi U-10Zr-4 Nb agar bahan bakar yang dibuat nanti menjadi lebih stabil apabila digunakan di dalam reaktor.

Pada pembuatan bahan bakar U-10Zr-4Nb ini serbuk U-10Zr-4Nb dicampur dengan serbuk Al kemudian dipress sehingga menjadi Inti Elemen Bakar (IEB), dimasukkan ke dalam *frame* dan ditutup dengan pelat AlMg2 untuk selanjutnya dirol panas dan dingin sehingga menjadi PEB. PEB U-10Zr-4Nb yang diperoleh selanjutnya diuji merusak (DT) maupun tidak merusak (NDT), meliputi : mikrostruktur, ketebalan kelongsong, *blister*, dan *white point*. Dari pengujian DT maupun NDT maka dapat dilihat apakah suatu PEB dapat digunakan atau tidak untuk bahan bakar reaktor. Pada Tabel 1 ditampilkan standar/inspeksi uji Pelat Elemen Bakar (PEB).

Tabel 1. Inspeksi uji Pelat Elemen Bakar (PEB)^[6]

| No | Item | Persyaratan |
|----|---|---|
| 1 | Noda putih/ <i>white point</i> pada bahan bakar | - berjarak 0,4 mm dari ujung dan sisi Pelat, - berdiameter < 0,5 mm, - bila terdapat sekelompok noda putih, jarak minimum tiap noda harus 0,5 mm, - pada daerah nomor Pelat tidak boleh ada noda putih |
| 2 | Ketebalan kelongsong | > 0,250 mm |
| 3 | Kondisi <i>meat</i> - Pada Sisi Dekat (SD), dan Sisi Jauh (SJ) - Sisi Tengah (TG) | - Diperbolehkan terdapat <i>dogbone</i> maupun <i>Whisker</i> - Tidak diperbolehkan terdapat <i>dogbone</i> maupun <i>whisker</i> |
| 4 | <i>Blister</i> pada pelat | Tidak diijinkan |
| 5 | Ketebalan pelat | $1,3 \pm 0,07 \text{ mm}$ |
| 6 | Ukuran serbuk pada bahan bakar | 90 - 125 μm |

METODOLOGI

a. Pembuatan ingot dan serbuk U-10Zr-Nb

Mula-mula dibuat ingot paduan U-10Zr-4Nb yang dibuat dengan cara melebur logam U, Zr dan Nb di dalam tungku peleburan busur listrik berpendingin air dan dalam media gas Ar. Ingot U-10Zr-4Nb yang diperoleh berbentuk lingkaran dengan diameter 15 mm dan ketebalan 5 mm selanjutnya dipotong-potong untuk dibuat serbuk. Untuk sekali operasi pada proses hidriding dapat diproses sebanyak 10 sampai 15g. Peralatan hidriding-dehidriding yang telah dimuati dengan sampel U-10Zr-4Nb selanjutnya dipanaskan pada temperatur 450 °C sambil divakum hingga kevakuman mencapai 14,46054 psi torr (proses hidriding)^[7] dan dialiri gas nitrogen (H₂) dan setelah kevakuman tercapai kemudian temperatur peralatan hidriding-dehidriding diturunkan hingga temperatur kamar. Proses selanjutnya memanaskan lagi sampel hingga temperatur 450 °C selama 3-4 jam (proses dehidriding) dan diturunkan temperaturnya hingga mencapai temperatur kamar. Sampel ingot U-10Zr-Nb yang telah dihidriding-dehidriding menjadi rapuh kemudian ditumbuk sehingga hancur menjadi serbuk dan diayak dengan ayakan berukuran 90-125 µm.

b. Pembuatan Inti Elemen Bakar (IEB) U-10Zr-Nb *frame* dan *cover*

Serbuk U-10Zr-4Nb yang telah diayak selanjutnya ditimbang dengan berat tertentu dan dicampur dengan serbuk Al dan dihomogenisasi. Campuran serbuk U-10Zr-4Nb dan serbuk Al kemudian dimasukkan ke dalam cetakan (*dies*) mini berukuran 25 x 15 mm dan dipress menggunakan mesin *press*. Pada saat yang bersamaan dibuat *frame* dan *cover* dari paduan AlMg2 untuk dimasuki IEB yang telah dibuat.

c. Pembuatan Pelat Elemen Bakar (PEB) U-10Zr-Nb

IEB U-10Zr-Nb yang telah dimasukkan ke dalam *frame* dan ditutup dengan *cover* selanjutnya dilas pada keempat sisi-sisinya untuk dirol panas dan dingin. Pengerolan panas dilakukan pada temperatur 415 °C dalam 4 tahapan. PEB U-10Zr-Nb yang telah dirol panas kemudian dirol dingin dan selanjutnya diluruskan dengan rol pelurus.

d. Pengujian PEB U-10Zr-Nb

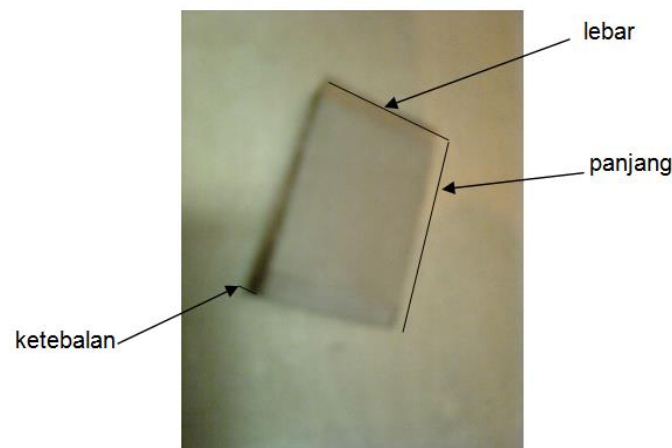
PEB U-10Zr-4Nb hasil pengerolan dingin diuji merusak (DT) dan tidak merusak (NDT). Pada pengujian merusak, PEB U-10Zr-Nb dipotong-potong dan dimounting serta dihaluskan dengan mesin gerida. Setelah digerinda selanjutnya dipoles dan dietsa menggunakan campuran larutan HF dan air untuk selanjutnya diperiksa menggunakan

mikroskop optik. Sementara itu, pada pengujian tidak merusak, PEB U-10Zr-4Nb yang masih utuh diperiksa ada tidaknya *white point* secara visual.

HASIL DAN PEMBAHASAN

a. Pembuatan IEB

Hasil pembuatan IEB U-10Zr-4Nb yang dibuat melalui pengepresan campuran serbuk U-10Zr-4Nb ditampilkan pada Gambar 1. IEB tersebut dibuat dari campuran serbuk U-10Zr-4Nb dengan berat = 6,415 g dan serbuk Al sebesar 1,982 g dan dihomogenisasi sehingga diperoleh densitas bahan bakar sebesar $5,2 \text{ g/cm}^3$. Campuran serbuk U-10Zr-4Nb dan Al dimasukkan ke dalam cetakan (dies) dan dipress sehingga membentuk IEB U-10Zr-4Nb. Dari pengukuran dimensi IEB U-10Zr-4Nb diperoleh ukuran ketebalan sebesar 3,17 mm dengan berat 8,07 g. Ketebalan IEB U-10Zr-4Nb tersebut hanya berbeda sedikit /hampir sama dibanding dengan ketebalan yang standar yaitu 3,16 mm^[8]. Ketebalan IEB U-10Zr-4Nb menjadi hal yang penting diperhatikan karena apabila terlalu tebal atau kurang tebal maka dapat mempengaruhi ketebalan kelongsong dari PEB U-10Zr-4Nb hasil pengerolan.



Gambar 1. IEB U-10Zr-4Nb

b. Pembuatan *frame*, *cover*, dan perakitan IEB U-10Zr-4Nb menjadi PEB U-10Zr-4Nb

Frame dan *cover* yang terbuat dari bahan paduan AlMg2 dipotong-potong menjadi 3 buah, dimana 1 buah dilubangi berbentuk empat persegi panjang untuk dijadikan *frame*. *Frame* kemudian dimasuki IEB U-10Zr-4Nb (*meat*) dan ditutup pada bagian atas maupun bawah serta dilas pada keempat sisinya menjadi rakitan elemen bakar. Langkah selanjutnya adalah mengerol panas rakitan elemen bakar hingga empat tahap pada temperatur $415 \text{ }^\circ\text{C}$ sehingga menjadi PEB U-10Zr-4Nb. Hasil proses pengerolan panas

ditampilkan pada Tabel 2 menunjukkan ketebalan akhir PEB U-10Zr-4Nb adalah sebesar 1,60 mm. Dilihat dari proses pengerolan terlihat pada setiap tahap ketebalan PEB U-10Zr-4Nb yang dirol masih memenuhi rentang ketebalan yang diset pada peralatan mesin rol. Ketebalan PEB U-10Zr-4Nb yang diperoleh tersebut selanjutnya dirol dingin dua tahap sehingga ketebalan mencapai 1,33 mm.

Tabel 2. Hasil pengerolan panas PEB U-10Zr-4Nb

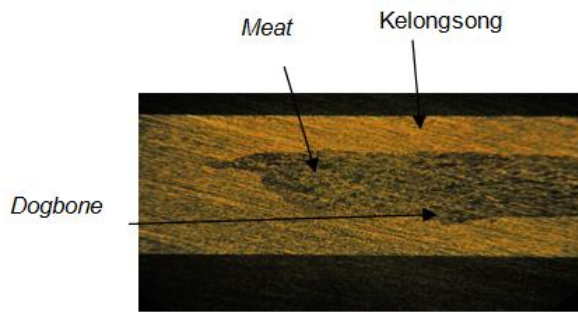
| Tahap | Ketebalan (mm) | Waktu pemanasan (menit) | Setting ketebalan (mm) |
|-------|----------------|-------------------------|------------------------|
| I | 6,9 | 30 | 8,35-7,0 |
| II | 5,52 | 3 | 7,0-5,6 |
| III | 2,51 | 6 | 5,6-2,6 |
| IV | 1,60 | 3 | 2,6-1,65 |

c. Pembuatan PEB U-10Zr-4Nb dan pengujian

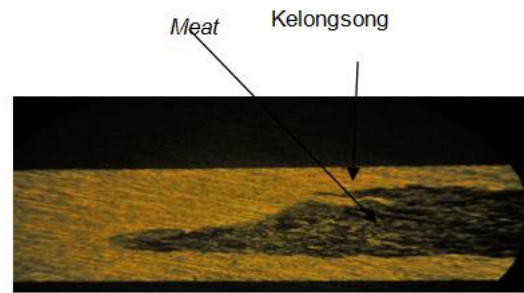
PEB U-10Zr-4Nb yang dibuat melalui pengerolan panas dan dingin dikenai beberapa pengujian yang dikelompokkan menjadi uji merusak (*destructive test/DT*) dan uji tidak merusak (*non destructive test/NDT*).

1. Pengujian merusak (DT)

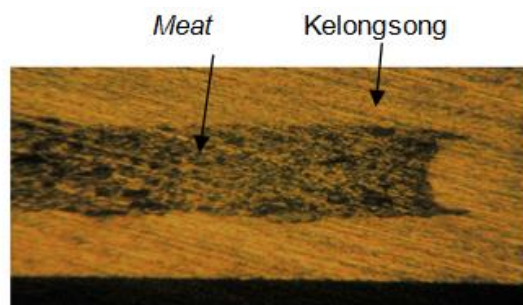
Hasil pengujian merusak PEB U-10Zr-4Nb yakni pengamatan mikrostruktur dan ketebalan kelongsong. Pengamatan mikrostruktur ditampilkan pada Gambar 1, 2 dan 3 serta Tabel 3. Gambar 1, 2 dan 3 merupakan gambar *meat* U-10Zr-4Nb setelah dirol panas dan dingin. Tampak pada Gambar 1(SD) terdapat fenomena *dogbone* sedangkan pada Gambar 2 sisi jauh (SJ) dan Gambar 3 (TG) tidak terdapat *dogbone* maupun *whisker*. *Dogbone* terbentuk karena kekerasan bahan bakar lebih tinggi daripada kekerasan kelongsongnya sehingga sewaktu dilakukan pengerolan bahan bakar mendesak kelongsong sedangkan *whisker* sebaliknya. Terbentuknya *dogbone* maupun *whisker* pada PEB sebaiknya dihindari karena kedua fenomena tersebut dapat mengurangi ketebalan kelongsong. Selain itu terbentuknya *dogbone/whisker* dapat menyimpan panas di dalam *dogbone/whisker* sehingga panas menjadi terperangkap dan mengakibatkan terjadinya pelepuhan pada PEB.



Gambar 1. Meat U-10Zr-4Nb (SD)



Gambar 2. Meat U-10Zr-4Nb (SJ)



Gambar 3. Meat U-10Zr-4Nb (TG)

Pada pengukuran ketebalan kelongsong didapat hasil pengukuran seperti tertera pada Tabel 1 terlihat pada sisi dekat (SD) bagian atas mempunyai ukuran ketebalan kelongsong dibawah yang disyaratkan yakni sebesar 0,19 mm sedangkan persyaratan untuk ketebalan kelongsong $> 0,25$ mm^[8]. Demikian pula ketebalan kelongsong pada sisi jauh (SJ) bagian atas hanya 0,18 μ m. Ketebalan kelongsong berkaitan dengan terbentuknya *dogbone* atau *whisker*, dimana apabila terbentuk *dogbone* atau *whisker* maka ketebalan kelongsong akan berkurang. Dengan demikian, dilihat dari sisi ketebalan kelongsong maka PEB U-10Zr-4Nb yang diuji tidak memenuhi persyaratan.

Tabel 3. Ketebalan kelongsong PEB U-10Zr-4Nb

| No. | Sisi Dekat (SD) (mm) | | Tengah (TG) (mm) | | Sisi Jauh (SJ) (mm) | |
|-----|-------------------------|-------|---------------------|-------|------------------------|-------|
| | Atas | Bawah | Atas | Bawah | Atas | Bawah |
| 1 | 0,40 | 0,47 | 0,30 | 0,47 | 0,40 | 0,53 |
| 2 | 0,41 | 0,45 | 0,30 | 0,41 | 0,40 | 0,46 |
| 3 | 0,41 | 0,42 | 0,35 | 0,45 | 0,39 | 0,39 |
| 4 | 0,38 | 0,39 | 0,34 | 0,43 | 0,30 | 0,37 |
| 5 | 0,40 | 0,37 | 0,36 | 0,43 | 0,22 | 0,24 |
| 6 | 0,37 | 0,38 | 0,35 | 0,45 | 0,19 | 0,24 |
| 7 | 0,41 | 0,33 | 0,35 | 0,45 | 0,25 | 0,26 |
| 8 | 0,45 | 0,36 | 0,32 | 0,48 | 0,25 | 0,30 |

| | | | | | | |
|----|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 9 | 0,45 | 0,39 | 0,30 | 0,42 | 0,30 | 0,30 |
| 10 | 0,44 | 0,41 | 0,29 | 0,44 | 0,32 | 0,31 |
| 11 | 0,41 | 0,43 | 0,30 | 0,44 | 0,35 | 0,35 |
| 12 | 0,35 | 0,39 | 0,32 | 0,44 | 0,35 | 0,36 |
| 13 | 0,35 | 0,40 | 0,31 | 0,39 | 0,36 | 0,37 |
| 14 | 0,36 | 0,41 | 0,31 | 0,40 | 0,36 | 0,39 |
| 15 | 0,30 | 0,39 | 0,33 | 0,44 | 0,39 | 0,37 |
| 16 | 0,28 | 0,37 | 0,31 | 0,46 | | |
| 17 | 0,19 | 0,29 | 0,32 | 0,49 | | |
| 18 | 0,34 | 0,44 | | | | |
| 19 | 0,44 | 0,57 | | | | |
| 20 | 0,42 | 0,50 | | | | |
| | Ketebalan Rerata 0,38 mm | Ketebalan Rerata 0,41 mm | Ketebalan Rerata 0,32 mm | Ketebalan Rerata 0,44 mm | Ketebalan Rerata 0,32 mm | Ketebalan Rerata 0,35 mm |
| | Ketebalan Minimal 0,19 mm | Ketebalan Minimal 0,29 mm | Ketebalan Minimal 0,29 mm | Ketebalan Minimal 0,40 mm | Ketebalan Minimal 0,18 mm | Ketebalan Minimal 0,24 mm |

2. Pengujian tidak merusak (NDT)

Pengujian NDT yang dilakukan pemeriksaan ada tidaknya *white point* dan *blister*. Pada Tabel 1 dapat dilihat standar inspeksi uji PEB. *White point* merupakan keadaan dimana uranium keluar dari daerah *meat*. Dari pemeriksaan yang dilakukan secara visual tidak ditemukan *white point* baik dalam arah sejajar maupun arah melintang dengan PEB. Keberadaan *white point* sebaiknya dihindari karena bila terdapat banyak *white point* maka *white point* tersebut bila terkena neutron dapat menghasilkan produk fisi dan timbul panas. Oleh karena keberadaan *white point* berada di luar *meat* maka produk fisi tersebut tidak terkungkung oleh matriks Al dan dapat membahayakan. Hasil pemeriksaan *white point* ditampilkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Hasil pemeriksaan *white point*

Pada pengamatan ada tidaknya *blister* di permukaan PEB secara visual menunjukkan bahwa PEB U-10Zr-4Nb tidak terlihat *blister*. Hal ini menunjukkan bahwa

ikatan permukaan antara kelongsong yang terbuat dari paduan AlMg2 dengan *meat* sudah cukup baik. Pengujian lain yang lebih teliti bias dilakukan dengan menggunakan alat ultrasonic. Namun, karena peralatan ultrasonik tidak bisa digunakan sehingga pengujian dengan menggunakan alat tersebut tidak bisa dilakukan.

KESIMPULAN

Fabrikasi dan pengujian PEB U-10Zr-4Nb masih memenuhi persyaratan untuk dibuat PEB U-10Zr-4Nb. Dari pengujian mikrostruktur pada PEB U-10Zr-4Nb terlihat terbentuknya *dogbone* pada sisi jauh (SJ), sedangkan hasil pengukuran ketebalan kelongsong masih ditemukan ketebalan kelongsong dibawah persyaratan. Hasil pemeriksaan *white point* dan *blister* pada PEB U-Zr-Nb secara visual menunjukkan tidak ditemukan *white point* maupun *blister*. Secara keseluruhan PEB U-10Zr-4Nb belum memenuhi persyaratan untuk dapat digunakan di reaktor.

DAFTAR PUSTAKA

1. Masrukan, M. Husna Al Hasa, Suyoto, Yatno D.A . Program Pemanfaatan Uranium Diperkaya ²³⁵U < 20 % di IEBE. Laporan Teknis PTBBN, tahun 2014.
2. Supardjo, H. Suwarno dan A. Kadarjono. Karakteristik Paduan U-7%Mo dan U-7% Mo-x%Si (x=1, 2 dan 3%). Hasil Peleburan dalam Tungku Busur Listrik, Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir "Urania", Vol. 15 No. 4, Oktober 2009: 171 - 232.
3. Balart dkk , *Progress on LEU Very High density Fuel And Target Development in Argentina*", RFM Meeting, 30 April-3 Mey 2006, Sofia, Bulgaria.
4. Masrukan, Pembuatan Pelat Elemen Bakar Mini U-6Zr/Al Untuk Bahan Bakar Reaktor Riset", Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah (PPIS), Badan Standarisasi Nasional (BSN), Bali, 8 Mei 2012. ISSN: 0853-9677.
5. A. Kaufmann, *Nuclear Reactor Fuel Elements and Fabrication Metallurgy*, US. Atomic Energy Commission, New York, Interscience Publisers, John Wiley and Sons. 1972, pp 82- 83.
6. Masrukan. Pengembangan Paduan U-Zr Untuk Bahan Bakar Reaktor Riset, Laporan Presentasi Ilmiah Peneliti Utama, PTBBN, 2012.
7. Suyoto, Yatno D.A, Yuwono. Penyerapan Gas Hidrogen Oleh Ingot Paduan U-6Zr Pada Proses *Hydriding*. Laporan Teknis PTBN, tahun 2015.
8. Anonymus. Document of Nuclear Fuel Element Fabrication. NUKEM, GmbH, 1987.