

**EFISIENSI MATERIAL PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA
NUKLIR LWR (*LIGHT WATER REACTOR*) DAN PHWR
(*PRESSURIZED HEAVY WATER REACTOR*)**

Mochammad Ahied

**Program Studi Pendidikan IPA, Universitas Trunojoyo Madura
Jl. Raya Telang Po Box 2 Kamal 69162
*ahiedalgaff@gmail.com***

Abstrak

Pada karya tulis ini dianalisis model-model reaktor nuklir dari Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN), yaitu LWR (*Light Water Reactor*) yang terdiri dari BWR (*Boiling Water Reactor*) dan PWR (*Pressurized Water Reactor*) dan PHWR (*Pressurized Heavy Water Reactor*). Dianalisa secara kualitatif kombinasi materialnya yang meliputi bahan bakar, moderator, dan pendingin untuk mendapatkan energi yang andal dan efisien dari pemrosesan berbagai model reaktor nuklir tersebut. Dari analisa didapat, *burn up* bahan bakar BWR 30.000 MWD/MTU, dan PWR 32.090 MWD/MTU, dan PHWR 8000 MWD/MTU, Zat Hidrogen merupakan moderator yang baik akan tetapi mempunyai penampang penyerapan yang tinggi. Air berat berpegang teguh pada ekonomi neutron. Moderator dapat juga berfungsi sebagai pendingin misalnya untuk LWR dan HWR.

Kata Kunci: *Burn up*, HWR (*Heavy Water Reactor*), LWR (*light Water Reactor*), moderator, dan pendingin.

Abstract

This article analyze models of nuclear reactors from nuclear power plants the LWR (Light Water Reactor), which consists of BWR (Boiling Water Reactor) and PWR (Pressurized Water Reactor) and PHWR (Pressurized Heavy Water Reactor). Analyzed qualitatively its material combination which includes fuel, moderator and cooler to get a reliable and energy efficient processing of various models of the nuclear reactor. From the analysis of the obtained, BWR fuel burn up 30,000 MWD/MTU, and PWR 32.090 MWD/MTU, and PHWR 8000 MWD/MTU, a substance Hydrogen is a good moderator but have a high absorption cross section. Heavy water neutron economy cling to. Moderators can also serve as a coolant for example for LWR and HWR.

Keywords: *Burn up*, cooler, PHWR (*Pressurized Heavy Water Reactor*), LWR (*light Water Reactor*), and moderator.

Pendahuluan

Kemelut energi yang terjadi tahun 1974, menyebabkan banyak pengertian dan pandangan yang menyangkut energi mengalami perubahan secara pesat dan mendasar. Energi, yang tadinya dianggap sebagai komoditi yang senantiasa ada, kini disadari merupakan suatu sumber daya yang bukan tak terbatas. Banyak ahli, yang tadinya memandang ‘ringan’ masalah energi kini mempublikasikan laporan-laporan yang serius tentang potensi sumber energi yang terbaharui. Kini secara umum disadari bahwa masalah energi yang menggoncangkan tahun 70-an itu bukan sekedar merupakan suatu persoalan yang bersifat sepintas lalu melainkan merupakan tanda berakhirnya suatu zaman energi murah, dan mulainya suatu peralihan ke era energi mahal. Sejak saat itu manusia berusaha untuk memanfaatkan energi yang diperlukannya dalam daya guna yang lebih tinggi.

Pada prinsipnya sumber daya energi dibagi menjadi dua bentuk yaitu energi konvensional dan modern. Energi konvensional bentuk energi yang paling umum pada saat ini. Energi ini juga disebut energi fosil yang merupakan peninggalan zaman purba yang harus digali dari perut bumi. Termasuk disini adalah minyak bumi dan gas bumi pada satu pihak, dan batu bara pada pihak lain. Kita meninjau secara sepintas bagaimana para ahli telah mencoba untuk menafsirkan besarnya cadangan yang masih ada. Kalau itu dibandingkan dengan pola pemakaian kedua jenis energi fosil tersebut maka jelaslah energi “konvensional” tidak akan dapat bertahan lama lagi.

Ada dua pilihan utama yaitu energi surya dan nuklir. Di bidang listrik, energi nuklir mempunyai sumbangan yang sangat besar/penting dalam penyediaan

energi dunia dimana 17% listrik yang dibangkitkan berasal dari PLTN.

Kecenderungan penggunaan listrik nuklir akan meningkat di dunia berhubung sumber energi fosil, utamanya batu bara secara langsung telah menimbulkan dampak negatif terhadap kesehatan dan lingkungan disebabkan polusi SO₂, NO_x dan logam-logam berat.

Jelaslah dengan memperhitungkan aspek sumber daya alam, kesehatan dan lingkungan, energi nuklir mempunyai prospek masa depan yang cerah bagi PLTN khususnya di Indonesia.

Berdasarkan cetak biru (*blue print*) pengelolaan energi Nasional 2005-2025 yang telah disusun oleh Departemen ESDM, diperkirakan bahwa sekitar 1, 99% dari total kebutuhan listrik Nasional pada tahun 2025 atau sekitar 10.000 Mwe akan dikembangkan dari energi nuklir. [3].

Reaktor merupakan sumber energi yang sangat efisien. Dan terdapat berbagai model reaktor nuklir yang diterapkan sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir. Tetapi dari model reaktor yang diterapkan di berbagai negara belum jelas mana yang paling efektif ditinjau dari segi kombinasi materialnya yang meliputi bahan bakar, moderator, dan pendingin.

Metode Penelitian

Karya tulis ini menganalisa secara kualitatif kombinasi material untuk mendapatkan energi yang andal dan efisien dari pemrosesan berbagai model reaktor nuklir dari berbagai PLTN.

Dikenal ada dua jenis reaksi inti yang dapat membebaskan energi : proses pada inti (fusi) dan belah inti (fisi). Dalam tulisan ini dibatasi pada model reaktor nuklir dari belah inti (fisi) berhubung prinsip pembangkitan energi melalui fusi masih berada dalam taraf laboratorium, sehingga masih jauh dari taraf

pemanfaatan yang praktis. Dan hanya 2 jenis reaktor nuklir yang dianalisa. Kedua jenis reaktor nuklir tersebut adalah LWR (*Light Water Reactor*) yang terdiri dari BWR (*Boiling Water Reactor*) dan PWR (*Pressururized Water Reactor*), dan PHWR (*Pressurized Heavy Water Reactor*).

Dari tulisan ini, diharapkan dapat menjadi pertimbangan model reaktor nuklir yang cocok dipakai pada Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) di Indonesia dan masyarakat mau menerima keberadaan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN).

Hasil dan Pembahasan

Bahan bakar, untuk reaktor BWR, PWR, PHWR, pengayaan bahan bakar berbeda-beda. Oleh karena itu untuk menyederhanakan perhitungan, biasanya kebutuhan bahan bakar diperkirakan untuk pengayaan equilibrium atau pengayaan rata-rata [7]. Demikian juga dengan efisiensi thermal. Efisiensi termik pada PLTN dihitung dari daya listrik netto dibagi daya termik yang dihasilkan oleh reaktor. Adapun hasilnya sebagai berikut;

Tabel 1. Efisiensi Thermal

Jenis	Perkayaan Rata-rata, %	Efisiensi Thermal, %
BWR	2.6	32.7
PWR	3.2	32.9
PHWR	0.71	28.5

Sedangkan untuk menilai kebutuhan Uranium tiap tahun atau kebutuhan awal (uranium alam) harus dicari dari besar-besaran yang mencirikan operasi PLTN, antara lain efisiensi thermal, capacity factor, dan burn up (fraksi bakar).

Biaya modal yang besar pada PLTN mengharuskan PLTN beroperasi pada beban dasar untuk memperoleh jumlah kWh sebanyak mungkin tiap tahunnya. Terlaksana atau tidaknya keharusan ini dapat dilihat dari faktor beban (*capacity factor/load factor*, CF). Faktor beban berbeda-beda untuk berbagai jenis PLTN dan harganya berubah-ubah seiring dengan waktu dan perkembangan teknologi reaktor. CF setelah 2015 dari berbagai jenis PLTN sama sebesar 0, 85 seiring perkembangan teknologi. [9].

Capacity factor adalah perbandingan waktu yang diberi oleh energi dalam waktu produksi dengan produksi maximum net energi selama operasi berlangsung. [1].

$$CF = \frac{E}{Em} \cdot 100\%$$

$$E = \text{Produksi energi netto} (Mk_{(e)}.h)$$

$$Em = \text{Produksi maximum energi netto} (Mk_{(e)}.h)$$

Selanjutnya, bahan bakar itu telah dimanfaatkan dalam teras reaktor (besarnya tenaga panas yang dapat dihasilkan dari suatu berat uranium dalam bundel-bundel bahan bakar) akan dapat dinilai dari “burn up” (fraksi bakar), yang mempunyai satuan MWD/ton U, megawatt termik hari tiap ton uranium bahan bakar jadi.

Adapun tambahan bahan bakar setiap tahun sebagai berikut [6]:

$$tonU/th = \text{Dayanominat} (MW\theta) * \frac{1 MWt}{\text{efisiensi termik} MW_e} * CF * 365 \frac{\text{hari}}{\text{tahun}} * \frac{1 tonU}{\text{Burnup} MWD} \dots\dots\dots (1)$$

Angka hasil adalah jumlah Uranium yang terdapat dalam bundel-

bundel bahan bakar yang telah siap (jadi) yang diperlukan setiap tahun.

Kalau konsumsi Uranium pertahun tersebut tidak sama, hal ini menunjukkan penggantian bahan bakar yang tidak akan selalu mencapai burn up yang sama. Ini tergantung pada Capacity faktor dan disain teras. Karena penggantian teras yang berbeda-beda. Setelah beberapa kali penggantian bahan bakar, apabila pola operasi reaktor telah mapan dan ajeg, maka akan selalu sama dengan jumlah yang mengganti dan burn up yang dicapai hampir selalu sama. Keadaan ini disebut keadaan keseimbangan (equilibrium), menurut istilah pengelolaan bahan bakar nuklir.

Burn up equilibrium yang didapat untuk BWR 33.000 MWD/MTU, PWR 32090 MWD/MTU dan PHWR 8000 MWD/MT [9]. Burn up lebih besar berarti dari tiap ton-U dalam bahan bakar lebih kompak. Dan juga berarti bahwa bahan bakar jadi tersebut telah dibuat lebih tahan terhadap iradiasi. Menurut ciri ini maka urutan terbaik PWR, BWR, dan PHWR.

Namun demikian ketiga jenis reaktor PLTN ini menggunakan bahan bakar dengan pengayaan yang berbeda-beda, sehingga bahan baku masing-masing diperlukan yang tidak sama, juga ongkos pengayaan dan fabrikasi yang berlainan. Oleh karena itu ditinjau dari bahan mentahnya (kuntisasi bahan) akan lebih visuil dalam bentuk U3O8 (YC=Yellow Cake).

Pengkayaan rata-rata bahan bakar (equilibrium) untuk reaktor PLTN U-235, dengan memperoleh perkayaan equilibrium dari 0.71% masukan dengan buangan sekitar 0.2% diperlukan bahan masukan (=Bm) [6].

$$Bm * (0.71\%) = (1 * \text{pengkayaan equilibrium}) + ((Bm - 1)0.2\%).. (2)$$

Selama proses konversi, pengkayaan, dan fabrikasi,

masing-masing diasumsikan ada kehilangan/kerugian (*losser*) sebesar 1%, 1% dan 1%. Sehingga dapat disimpulkan, masukan *Yellow Cake* (=YC) adalah sebanyak [6]:

$$YC = Bm * (1 + 0.01) * (1 + 0.01) * (1 + 0.01) \text{ kg-U} = Bm * 3.03 \text{ kg-U} \dots\dots\dots (3)$$

Sedangkan PHWR tanpa proses konvensi dan pengkayaan sehingga menjadi,

$$YC = Bm * (1 + 0.01) \text{ kg-U} \dots\dots (4)$$

Karena *Yellow Cake* biasanya disebut dalam kandungan U3O8 maka angka terakhir menjadi:

$$YC = \text{kg-U} \cdot 26 \frac{\text{lbsU}_3\text{O}_8}{\text{kg-U}} = YC \text{ lbsU}_3\text{O}_8 \dots\dots\dots (5)$$

Perbandingan jenis bahan bakar dengan pemanfaatan bahan dasar urutan terbaik PHWR (0, 6 MWD/lbs *yellow cake*), PWR (2 MWD/lbs *yellow cake*), dan BWR (3 MWD/lbs *yellow cake*).[9]

Moderator, Neutron yang dilepaskan oleh fisi mempunyai energi kinetik yang relatif sangat tinggi (sekitar 2 MeV) dengan kecepatan yang sangat tinggi. Agar neutron dapat menyebabkan fisi yang berikutnya lagi, energinya harus dikurangi sampai mencapai energi termik (0.025 eV)[5].

Kecepatan diklasifikasikan sebagai kecepatan dengan memiliki energi neutron sekitar 0.1-10 MeV, tidak begitu cepat sekitar 1 eV, dan lambat sekitar 0.025 eV (*Fast, Intermediate, dan Slow*). Energi perantara dalam mendapatkan fungsi temperature, adalah neutron thermal, dalam kategori neutron lambat (*slow neutron*) [4].

Untuk memperlambat neutron cepat sampai mencapai energi yang lebih rendah, neutron yang berenergi tinggi itu ditumbukkan pada atom-atom yang terdapat dalam bahan tertentu, yang disebut moderator. Syarat untuk memilih dan menentukan bahan moderator adalah : Pada tiap tumbukan terdapat kehilangan energi neutron yang besar, penampang penyerapan yang rendah, dan penampang penghamburan yang rendah.

Zat hidrogen pada reaktor LWR merupakan moderator yang baik jika dilihat dari kehilangan pada energi neutron setelah terjadi tumbukan. Karena inti adalah suatu proton dan mendekati sama dengan ukuran neutron [4]. Namun, proton cenderung untuk menangkap neutron untuk membentuk deuteron melalui reaksi $1H(n,\mu)2H$. Untuk itu Uranium perlu diperkaya [2].

Air berat (D2O) pada reaktor HWR juga moderator yang baik disebabkan suatu proton mendekati sama dengan ukuran neutron dan berpegang teguh pada ekonomi neutron [8]. Karena deuteron mempunyai peluang yang lebih kecil daripada proton untuk menangkap neutron, air berat menjadi bahan moderator yang lebih baik daripada air ringan [2]. Dan prinsip ekonomi neutron memungkinkan penggunaan Uranium alam sebagai bahan. Dan HWR dengan moderator D2O mempunyai prospek yang baik bila sudah di produksi dalam negeri.

Pendingin, setiap inti atom U-235 yang mengalami pembelahan melepaskan sejumlah energi sebesar kira-kira 200 MeV, yang kemudian hampir seluruhnya keluar dalam bentuk panas [5]. Suatu zat pendingin diperlukan untuk menghindarkan terjadinya suhu yang berlebihan dalam bajana reaktor. Bahan bakar nuklir untuk PLTN tipe BWR dan PWR dengan pengayaan U235 sekitar 33.000 MWD/MTU memerlukan pendingin lebih lama dibanding PHWR.

Salah satu faktor yang harus dimiliki oleh zat pendingin ialah: mempunyai penyerapan neutron yang rendah, mempunyai perpindahan panas yang baik, tidak korosif.

Adakalanya moderator berfungsi sebagai pendingin misalnya Hidrogen pada reaktor LWR dan D2O pada reaktor HWR.

Simpulan dan Saran

Simpulan, Dari segi burn upnya bahan bakar paling tinggi, PWR, BWR, dan PHWR. Karena burn up berbanding lurus dengan energi maka energi yang paling efisien adalah PWR, BWR, dan PHWR. Ditinjau dari bahan U3O8 urutan terbaik BWR, PWR, dan PHWR,

moderator dapat juga berfungsi sebagai coolant misalnya untuk LWR dan Moderator air berat lebih baik daripada moderator air ringan ditinjau dari proton dalam menangkap neutron.

Saran. Reaktor HTGR (*High Temperature Gas Reactor*) yang memakai reaktor pebble bed hanya ada satu sampai sekarang. Namun secara empiris telah berhasil dioperasikan secara komersial. Agar lebih memantapkan keberhasilan operasional jenis ini perlu dikembangkan dengan prototype-prototype yang lain, diperlukan data yang sempurna dan up to date untuk analisa kualitatif selanjutnya.

Daftar Pustaka

- Anonymous, 1988, *Operating Experience with Nuclear Power Station in Member States in 1986*, IAEA, Vienna.
- Beiser, A., 1992 *Konsep Fisika Modern*. Erlangga. Jakarta.

Departemen ESDM, 2005, *Blue Print Pengelolaan Energi Nasional*, Jakarta.

El-Wakil, M.M., 1971. *Nuclear Energi Conversion*, Intext Educational Publishers, New York.

Ilyas, J., 1978, *Pengolahan Bahan Reaktor dalam : Pengantar Ilmu dan Teknologi Nuklir*, Batan. Jakarta.

Kuncoro, AH., 1992. *Kebutuhan Bahan Bakar Program PLTN di Indonesia*. Lokakarya 12-13 Februari 1992. Batan. Jakarta.

Soekarno & Djolelono, M., 1975, *Catatan tentang Operasi PLTN Jenis PWR, BWR, dalam : Teknologi Pusat Listrik Tenaga Nuklir*, Batan, Jakarta.

Subki, I. & Kusnowo, A. 1978, *Pembangkit Listrik Tenaga Listrik Sistem Air Berat (HWR) dalam : Teknologi Pusat Listrik Tenaga Nuklir*, Batan, Jakarta.

Wati, Nurokhim, *Pengelolaan Bahan Bakar Nuklir bekas dari PLTN*, Prosiding Seminar Nasional Teknologi Pengelolaan Limbah VI, Batan, ISSN 1410-6086, Hal 88-89.