

DAUR BAHAN BAKAR NUKLIR BERBASIS TEKNOLOGI ATW

Djati H. Salimy, Ida N. Finahari, Masdin*)

ABSTRAK

DAUR BAHAN BAKAR NUKLIR BERBASIS TEKNOLOGI ATW. Telah dilakukan pengkajian daur bahan bakar nuklir berbasis teknologi ATW (*accelerator-driven transmutation waste*). ATW adalah perangkat reaktor nuklir subkritis yang dimanfaatkan untuk memfasilitasi proses transmudasi bahan bakar bekas. Sebelum dilakukan proses transmudasi, terlebih dahulu dilakukan proses partisi bahan bakar bekas, yaitu proses pengolahan dan pemisahan unsur-unsur yang terdapat dalam bahan bakar bekas. Proses Transmutasi dilakukan terhadap unsur-unsur aktinida minor dan produk fisi umur panjang. Produk dari proses transmudasi adalah unsur-unsur produk fisi yang lebih stabil dengan umur paruh yang pendek, dan listrik. Konsep ATW mempengaruhi sistem daur bahan bakar nuklir yang diadopsi selama ini. Daur bahan bakar nuklir dobel strata yang merupakan bentuk implementasi teknologi ATW juga dibahas. Pada konsep daur dobel strata, strata pertama merupakan proses transmudasi pada reaktor nuklir komersial, sedang strata kedua dilakukan pada fasilitas ATW. Sebagai hasil studi, pada makalah ini juga diajukan sejumlah strategi implementasi daur bahan bakar nuklir dobel strata.

Kata kunci : teknologi ATW, transmudasi, daur dobel strata

ABSTRACT

NUCLEAR FUEL CYCLE BASED ON THE ATW TECHNOLOGY. The assessment of nuclear fuel cycle based on the ATW (*accelerator-driven transmutation waste*) technology has been carried out. The ATW is subcritical instrument which used to transmutate spent fuels. To prepare transmutation, partition of spent fuels should be done. Partition is the process to separate the elements in the spent fuels, before transmuting its minor actinides and long lived fissile products in subcritical nuclear reactors. Products of the transmutation process are the relatively stable elements which have short lived fissile products, and electricity. The concept of double strata nuclear fuel cycles as an implementation of ATW are also studied. In this concept, the first strata is the transmutation process in critical nuclear reactors, and at the second strata is the transmutation process at the sub critical facility called ATW system. Some strategies in implementation of double strata cycles are also proposed.

Keywords : ATW technology, transmutation, double strata cycle

* Staf Bidang Perencanaan Sistem Energi

I. PENDAHULUAN

Dalam teknologi daur bahan bakar nuklir, dikenal 3 klasifikasi daur sebagai berikut: 1) daur tanpa olah ulang, yaitu menyimpan bahan bakar bekas reaktor dalam penyimpanan lestari, 2) daur dengan olah ulang, yaitu memungut plutonium fisiil dan uranium yang masih terkandung dalam bahan bakar bekas untuk dimanfaatkan kembali, dan 3) daur terbuka yang bersifat *wait and see*, dengan menyimpan sementara bahan bakar bekas sambil menunggu perkembangan teknologi apakah akan dilakukan olah ulang atau tidak.

Accelerator-driven Transmutation Waste (sistem ATW), adalah fasilitas reaktor nuklir subkritis dengan memanfaatkan akselerator berdaya tinggi sebagai sumber neutron. Teknologi ini muncul untuk memfasilitasi proses transmudasi bahan bakar bekas. Sebelum dilakukan proses transmudasi pada fasilitas ATW terlebih dahulu dilakukan proses partisi bahan bakar bekas. Proses partisi memungkinkan untuk memisahkan bahan-bahan sangat beracun seperti plutonium, unsur-unsur aktinida minor (neptunium, amerisium, curium) dan beberapa produk fisi umur panjang dari bahan bakar bekas. Kemudian proses transmudasi bahan-bahan yang dipisahkan sebelumnya, memungkinkan terjadinya konversi bahan-bahan tersebut menjadi produk yang lebih stabil dan berumur paruh pendek. Teknologi ATW ini dikenal juga sebagai reaktor hibrida, karena disamping sebagai reaktor transmudasi limbah, juga dapat menghasilkan listrik.

Secara garis besarnya, implementasi proses transmudasi bahan bakar bekas bertujuan untuk [1,2]:

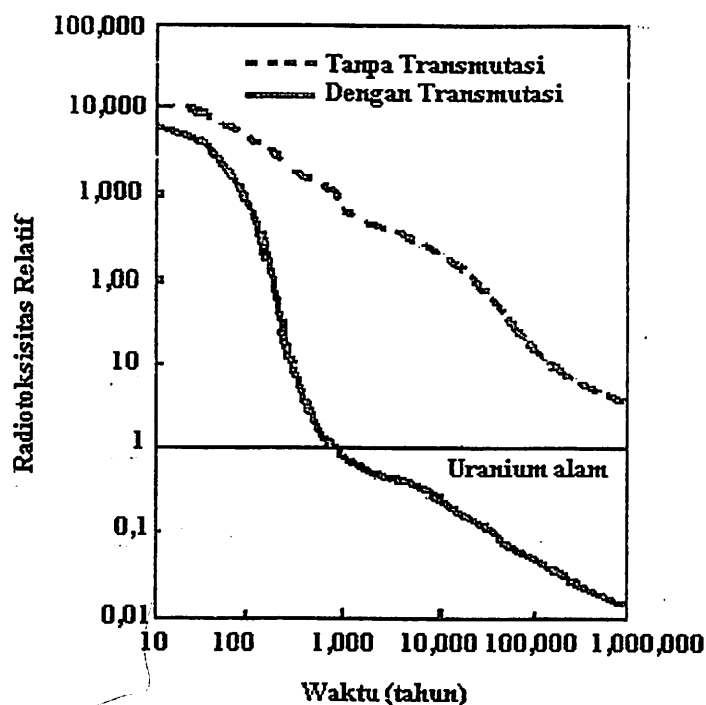
1. Memperbaiki penerimaan publik terhadap masalah keselamatan nuklir jangka panjang melalui pengurangan dosis radiotoksitas
2. Mengurangi aspek akumulasi panas maupun massa pada penyimpanan lestari yang bisa menimbulkan bahaya kekritisasi
3. Mengurangi resiko penggunaan dalam proliferasi nuklir
4. Meningkatkan prospek energi nuklir dengan memperbaiki aspek penerimaan publik dan kesinambungan pasokan.

Proses transmudasi bisa juga dilakukan pada fasilitas reaktor kritis komersial. Fasilitas kritis yang bisa mengakomodasi proses transmudasi adalah reaktor-reaktor termal konvensional, reaktor pembiak, maupun reaktor suhu tinggi. Meskipun begitu ada sejumlah kelemahan terutama berkaitan dengan parameter fisika neutron yang tidak bisa diatasi oleh sistem reaktor kritis. Karena itu muncullah konsep ATW untuk mengatasi proses transmudasi yang tidak bisa dilakukan pada sistem reaktor kritis. Dimungkinkannya proses transmudasi pada 2 sistem reaktor nuklir berakibat pada berubahnya sistem daur bahan bakar nuklir.

Pada makalah ini dikaji konsep ATW dan implikasinya terhadap perkembangan sistem daur bahan bakar nuklir, serta beberapa model implementasi daur bahan bakar nuklir terkait teknologi ATW.

II. TEKNOLOGI ATW

Konsep ATW dikembangkan di Amerika oleh LANL (Los Alamos National Laboratory) pada awal dekade 1990-an untuk menyediakan teknologi alternatif penanganan bahan bakar nuklir bekas. Berbagai studi tentang bahan bakar bekas menunjukkan bahwa resiko radiologi jangka panjang berkaitan dengan penyimpanan bahan bakar bekas pada fasilitas penyimpanan lestari meliputi: elemen-elemen trans-uranium berumur paruh sangat panjang, produk fisi Tc-99 dan I-129 yang mempunyai radiotoksitas sangat tinggi, serta akumulasi beban panas yang muncul akibat produk fisi Sr-90 dan Cs-137 yang berumur paruh pendek. Untuk mengatasi masalah-masalah tersebut muncullah konsep ATW yang pada prinsipnya bertujuan untuk memperpendek waktu paruh produk fisi yang waktu paruhnya sangat panjang, dan menstabilkan produk fisi transuranium. Pada Gambar 1 disajikan perbandingan waktu peluruhan antara limbah bahan bakar bekas yang ditransmutasi dan yang tidak.

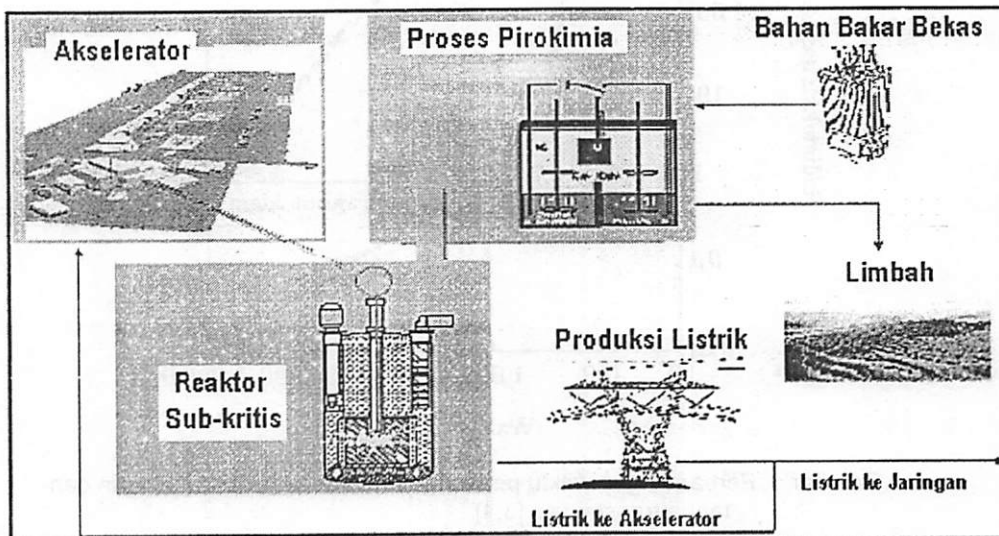


Gambar 1. Perbandingan waktu peluruhan bahan bakar bekas dengan dan tanpa transmutasi [3,4]

Untuk memenuhi tujuan transmudasi yang telah disebutkan, teknologi ATW harus mampu untuk [5,6]:

1. Menghancurkan lebih dari 99,9% unsur-unsur transuranium yang berumur panjang dan membebani akumulasi panas pada fasilitas penyimpanan lestari
2. Menghancurkan lebih dari 99,9% produk fisi Tc-99 dan I-129 yang berumur panjang dan mempunyai tingkat radiotoksistas tinggi
3. Memisahkan Sr-90 dan Cs-137 dari bahan bakar bekas, meskipun merupakan produk fisi umur pendek, kedua isotop ini akan meningkatkan akumulasi panas dalam jangka pendek pada penyimpanan lestari
4. Memisahkan uranium untuk dimanfaatkan kembali, mengingat uranium yang terkandung dalam bahan bakar bekas masih mempunyai kadar U-235 yang lebih tinggi daripada U-alam
5. Produksi listrik. ATW adalah perangkat sub-kritis yang dari reaksi fisinya menghasilkan energi yang dapat dikonversi menjadi listrik. Listrik ini sejumlah kecil digunakan untuk menggerakkan akselerator, sisanya disambungkan ke jaringan.

Untuk dapat memenuhi kebutuhan di atas, teknologi ATW melibatkan beberapa elemen penting yang saling terkait seperti terlihat pada Gambar 2. Elemen-elemen itu meliputi :1) akselerator proton linier berdaya tinggi, 2) instalasi proses pirokimia yang merupakan teknologi kunci proses pemisahan bahan bakar bekas sebelum diumpankan sebagai bahan bakar pada perangkat reaktor subkritis, dan 3) reaktor subkritis berpendingin lead-bismuth cair sebagai perangkat transmudasi dengan sumber neutron dari akselerator berdaya tinggi.



Gambar 2. Skema Sistem ATW [5]

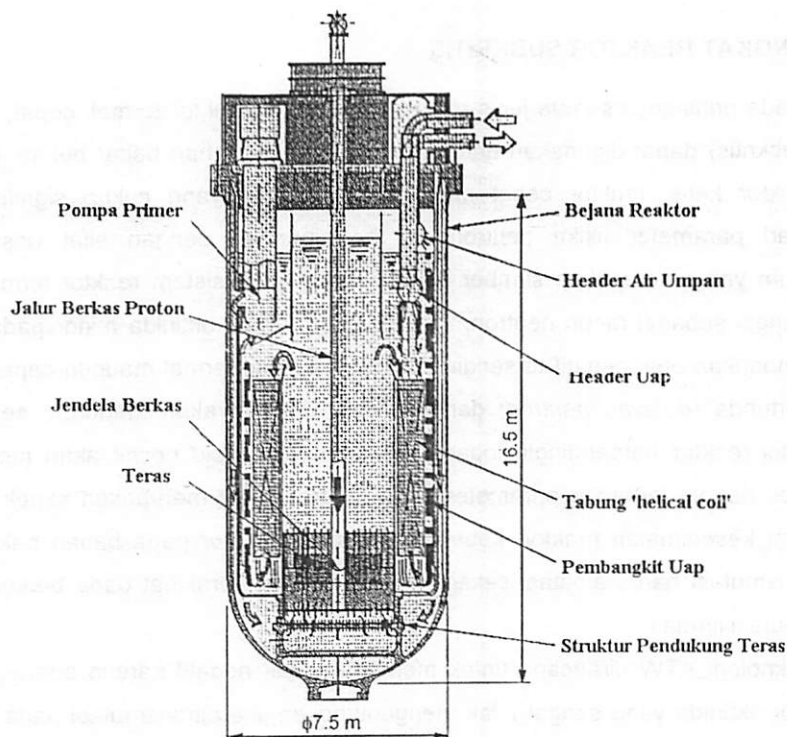
III. PERANGKAT REAKTOR SUBKRITIS

Pada prinsipnya semua jenis reaktor nuklir (baik reaktor termal, cepat, maupun fasilitas subkritis) dapat digunakan untuk mentransmutasi bahan bakar bekas. Diantara reaktor-reaktor kritis, reaktor cepat memiliki keuntungan yang cukup signifikan jika ditinjau dari parameter fisika neutron. Ini berhubungan dengan sifat unsur-unsur transuranium yang merupakan sumber neutron yang pada sistem reaktor termal justru akan berfungsi sebagai racun neutron. Adanya unsur-unsur aktinida minor pada bahan bakar memberikan efek negatif tersendiri baik pada sistem termal maupun cepat. Fraksi neutron tertunda (*delayed neutron*) dan koefisien Doppler akan menurun, sementara pada reaktor-reaktor berpendingin logam cair, reaktivitas void positif akan meningkat. Karena efek negatif terhadap parameter fisika neutron yang merupakan aspek penting pada sistem keselamatan reaktor, keberadaan aktinida minor pada bahan bakar yang akan ditransmutasi harus dibatasi sekecil mungkin, yang berakibat pada berkurangnya laju transmutasi limbah.

Teknologi ATW dirancang untuk mengatasi efek negatif karena adanya unsur-unsur minor aktinida yang sangat tidak menguntungkan jika ditransmutasi pada fasilitas reaktor kritis yang sudah ada. Di samping itu sistem ATW ini lebih mudah dikontrol dan fleksibel dalam pengoperasiannya, karena bekerja dalam kondisi subkritis. Pada sistem reaktor sub-kritis, sistem kontrol dan perubahan daya tidak tergantung pada neutron tunda, tapi dipicu oleh sumber neutron yang dibangkitkan dari luar sistem. Batang kendali dan *reactivity feedback* juga bukan masalah penting, karena sistem ini secara netronik terpisah dari sumber neutron sehingga memungkinkan beroperasi dengan berbagai komposisi bahan bakar. Jadi dimungkinkan untuk menghancurkan isotop-isotop transuranium atau produk fisi atau keduanya tanpa terlalu terpengaruh dengan sifat netroniknya.

Desain konseptual fasilitas subkritis telah dilakukan oleh JAERI Jepang. Sistem reaktor berpendingin Pb-Bi yang terpilih merupakan pengembangan teknologi reaktor pembiak cepat berpendingin logam cair dan teknologi reaktor kapal selam berpendingin Pb-Bi milik USSR [7]. Dengan sumber neutron akselerator berdaya berkas proton sebesar 1 GeV – 45 mA, target/teras mampu melakukan faktor pelipatan neutron efektif sebesar 0,95 menghasilkan daya termal sebesar 800 MWth.

Dengan asumsi faktor beban sebesar 80%, laju transmutasi diperkirakan 250 kg/tahun. Produksi listrik 240 MWe (efisiensi termal 30%), sekitar 115 MWe digunakan untuk mengoperasikan akselerator dan sisanya disambungkan ke jaringan listrik komersial. Dengan pola ini, berarti sistem ATW mampu memasok kebutuhannya dari sistem itu sendiri. Pada Gambar 3 ditunjukkan desain konseptual reaktor ATW.



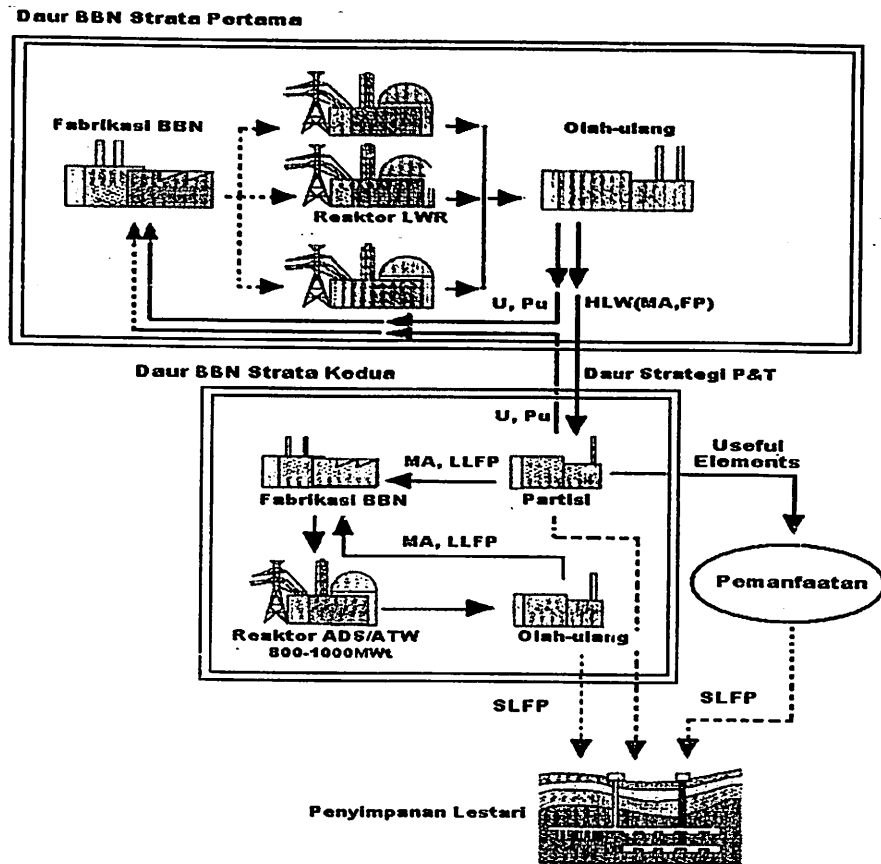
Gambar 3. Konsep desain reaktor subkritis ATW [7]

IV. DAUR BAHAN BAKAR NUKLIR DOBEL STRATA

Daur bahan bakar nuklir dobel strata merupakan model daur sebagai implementasi teknologi ATW. Pada Gambar 4 ditunjukkan skema daur dobel strata yang melibatkan daur berbasis reaktor kritis sebagai daur strata pertama, dan reaktor sub kritis ATW sebagai strata kedua. Pada strata pertama yang merupakan daur bahan bakar berbasis reaktor komersial, dilakukan pemungutan plutonium fisil dan uranium, untuk diolah kembali sebagai masukan bahan bakar reaktor baik sebagai bahan bakar oksida maupun bahan bakar MOX. Sedang pada strata kedua, bahan bakar bekas luaran strata pertama diproses kemudian diumpankan sebagai bahan bakar bersama aktinida minor dan produk fisi berumur panjang ke sistem transmudasi pada reaktor sub kritis. Beberapa studi menunjukkan bahwa radiotoksisitas limbah bahan bakar bekas dapat diturunkan sampai 10 kalinya jika hanya strata pertama yang dioperasikan. Jika strata pertama dan kedua dimanfaatkan dua-duanya akan bisa dicapai penurunan toksisitas sampai 100 kalinya [3,4].

Dalam konsep daur bahan bakar dobel strata, sistem ATW berperan sebagai fasilitas transmudasi strata kedua, dimana bahan bakar yang mengandung unsur-unsur minor aktinida akan memberikan efek negatif jika ditransmudasikan pada fasilitas reaktor kritis. Karena kemampuannya membakar bahan bakar mengandung unsur-unsur minor aktinida, sistem ATW sering juga disebut sebagai reaktor pembakar aktinida. Sistem

ATW dapat membakar sejumlah besar aktinida minor per unit sistem secara aman, menghasilkan panas yang dapat dikonversi menjadi listrik, juga menghancurkan produk-produk fisi dengan radiotoksitas tinggi dan berumur sangat panjang. Tidak tercapainya kondisi kritis pada ATW memungkinkan sistem ini dioperasikan dengan komposisi bahan bakar yang lebih fleksibel



Gambar 4. Daur bahan bakar double strata [7,8]

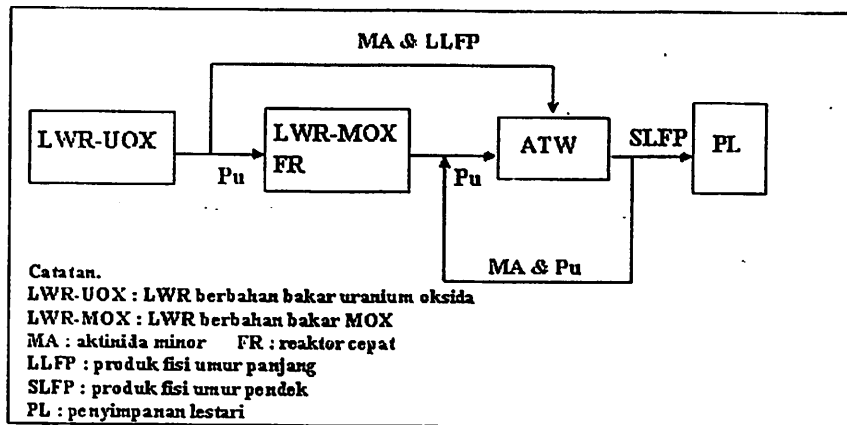
Ada sejumlah keuntungan yang bisa diperoleh dengan sistem daur double strata tersebut dibanding jika aktinida minor dibakar pada strata pertama. Dengan hanya membakar minor aktinida dan produk fisi berumur panjang pada strata kedua (U dan Pu ditransmutasi pada strata pertama), akan mengurangi beban aliran massa pada strata kedua. Ini akan berdampak pada semakin kompaknya sistem ATW yang mengambil peran utama pada strata kedua. Kompaknya ukuran sistem ATW memungkinkan fasilitas tersebut berada di dekat reaktor komersial. Pada sistem reaktor nuklir kritis, teras dengan bahan bakar minor aktinida saja (atau bersama Pu) akan memperbesar laju transmudasi. Meskipun begitu, sistem dengan kadar minor aktinida yang tinggi akan menghadapi sejumlah kendala terkait dengan koefisien reaktivitas (akan meningkat pada koefisien *void reactivity* dan turun pada efek Doppler), dan yang terkait dengan neutron

tertunda. Untuk mengatasi masalah ini, sejumlah uranium harus ditambahkan ke dalam bahan bakar berbasis minor aktinida (lebih baik uranium diperkaya) agar kadar minor aktinida nya rendah. Tetapi cara ini berdampak pada terjadinya penurunan laju transmudasi. Karena kesulitan tersebut di atas, muncullah konsep ATW yang mengandalkan sistem subkritis yang bisa beroperasi dengan basis bahan bakar minor aktinida tanpa penambahan uranium dengan tetap menghasilkan laju transmudasi yang tinggi.

V. DISKUSI DAN PEMBAHASAN

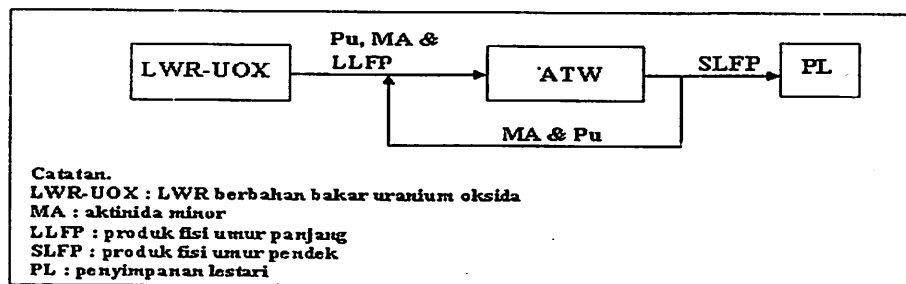
Sistem daur bahan bakar dobel strata yang menawarkan proses transmudasi 2 tingkat memberikan solusi implementasi daur yang bisa disesuaikan dengan bahan bakar nuklir masing-masing negara pengguna energi nuklir.

Jepang, Inggris, dan Perancis sebagai negara yang program nuklirnya sudah sangat mantap, beranggapan bahwa daur ulang plutonium dan uranium dari bahan bakar bekas merupakan hal yang sangat penting. Karena alasan tersebut, negara-negara itu sangat ambisius mengimplementasikan sistem daur bahan bakar nuklir dobel strata secara lengkap. Skema strategi 1 ini dapat dilihat pada Gambar 5. Pada sistem ini, transmudasi bahan bakar bekas dilakukan dengan 2 langkah. Pertama, bahan bakar bekas luaran reaktor konvensional diproses untuk dipungut plutonium dan uraniumnya. Uranium didaur-ulang untuk diproses menjadi bahan bakar oksida konvensional, sedangkan plutonium didaur-ulang untuk diproses sebagai bahan bakar MOX, atau sebagai bahan bakar reaktor maju baik sistem termal maupun sistem cepat. Pada strata kedua, bahan bakar bekas reaktor-reaktor berbahan bakar plutonium tadi dicampur dengan minor aktinida sisa bahan bakar bekas reaktor konvensional yang telah dipungut plutonium dan uraniumnya, kemudian diproses sebagai bahan bakar berbasis minor aktinida untuk diumpankan pada sistem transmudasi strata kedua. Dengan pola daur bahan bakar dobel strata seperti ini, diharapkan aliran massa pada strata kedua lebih kecil sehingga fasilitas subkritis ATW bisa dirancang lebih kompak dengan kapasitas kecil dan bisa dibangun di dekat fasilitas reaktor komersial.



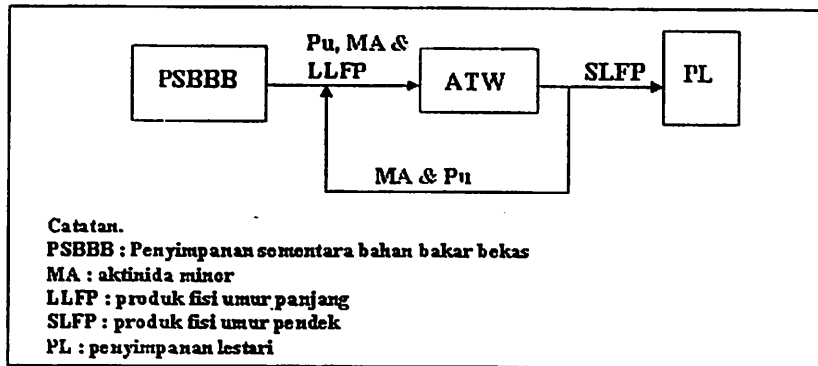
Gambar 5. Strategi 1 daur bahan bakar berbasis ATW [3,8]

Berbeda dengan negara-negara Jepang, Perancis, dan Inggris yang konsisten dengan sistem daur ulang, beberapa negara seperti Swedia karena alasan tertentu tidak memungut plutonium dari bahan bakar bekas reaktor komersialnya. Pada kasus ini, plutonium dibiarkan tetap bersama-sama dengan minor aktinida diproses sebagai bahan bakar reaktor subkritis ATW (strategi2). Skema strategi 2 ini dapat dilihat pada Gambar 6. Dibanding strategi 1, strategi ini berimplikasi pada dibutuhkannya jumlah fasilitas ATW yang lebih besar dan lebih banyak. Tetapi ditinjau dari sisi proliferasi nuklir, sistem ini lebih aman karena tidak melibatkan proses pemungutan plutonium fisil.



Gambar 6. Strategi 2 daur bahan bakar berbasis ATW [3,8]

Sistem daur bahan bakar berbasis proses teknologi ATW juga memungkinkan untuk diadopsi oleh negara yang berminat untuk menghentikan program nuklirnya. Sebagai contoh, Jerman yang kebijakan pemerintahnya sudah tidak akan membangun PLTN lagi dan hanya mengoperasikan PLTN yang masih ada, bisa memanfaatkan teknologi ATW dengan model transmudasi strategi 3. Skema strategi 3 ini dapat dilihat pada Gambar 7. Pada strategi ini, semua bahan bakar bekas yang disimpan pada fasilitas penyimpanan sementara, diproses sebagai bahan bakar ATW, tanpa dilakukan pemungutan plutonium fisil.



Gambar 7. Strategi 3 daur bahan bakar berbasis P&T [3,8]

Konsep ATW berperan penting pada sistem daur bahan bakar nuklir pada masa yang akan datang. Meskipun pada prinsipnya semua reaktor nuklir (kritis maupun subkritis) bisa dimanfaatkan sebagai reaktor transmudasi, tetapi fasilitas kritis kurang menguntungkan ditinjau dari aspek keselamatan yang berkaitan dengan parameter fisika teras. Keberadaan unsur-unsur minor aktinida pada bahan bakar bekas yang akan ditransmutasi, akan menurunkan reaktivitas pada reaktor kritis. Tetapi pada fasilitas ATW, karena beroperasi pada daerah subkritis, jenis dan sistem bahan bakar untuk mengoperasikannya bisa lebih fleksibel.

VI. KESIMPULAN

1. Teknologi ATW memainkan peran yang penting pada sistem daur bahan bakar nuklir di masa yang akan datang, terutama terkait dengan penanganan bahan bakar bekas.
2. Teknologi reaktor maju berbahan bakar plutonium, disamping sebagai reaktor pembangkit listrik, juga bisa berfungsi sebagai reaktor transmudasi limbah pada strata pertama. Sementara itu, teknologi ATW sebagai perangkat subkritis berperan sangat penting sebagai fasilitas transmudasi strata kedua, karena fasilitas ini bisa beroperasi dengan bahan bakar yang lebih fleksibel komposisinya.
3. Teknologi ATW serta skema implementasi daur bahan bakar nuklirnya perlu dikaji lebih intensif di Indonesia, mengingat di masa yang akan datang Indonesia akan membangun dan mengoperasikan PLTN. Teknologi ATW ini boleh jadi akan menjadi teknologi kunci dalam pengelolaan bahan bakar bekas.

DAFTAR PUSTAKA

1. GLATS, J. P., HAAS, D., MAGILL, J., WIDER, H., Partitioning and Transmutation in Spent Fuel management, Proceeding of the 3rd International Conference on Accelerator Driven Transmutation Technologies and Applications, Praha, 7-11 June 1999.
2. BAXTER, A., Accelerator Driven GT-MHRS for waste Disposal and Proliferation-Resistant Fuel Cycles, Proceeding of the 3rd International Conference on Accelerator Driven Transmutation Technologies and Applications, Praha, 7-11 June 1999.
3. THE EUROPEAN TECHNICAL WORKING GROUP ON ADS, a European Roadmap for Developing Accelerator Driven Systems (ADS) for Nuclear Waste Incineration, ENEA, Roma, April 2001.
4. DOE, Report to Congress on Advanced Fuel Cycle initiative: The Future Path for Advanced Spent Fuel Treatment and Transmutation Research, U.S. Department of Energy Office of Nuclear Energy, Science, and Technology January 2003
5. VENNERI, F., WILLIAMSON, M., LI, N., HOUTS, M., MORLEY, R., BELLER, D., SAILOR, W., LAWRENCE, G., Disposition of Nuclear Waste Using Subcritical Accelerator-driven Systems: Technology Choices and a Possible Implementation Scenario, The Uranium Institute 24th annual International Symposium, 1999.
6. DURPEL, L. V., WYDLER, P., SAKURAI, S., NA, B. C., DOMAE, M., OECD/NEA Comparative Study on ADS & FR in Advance Fuel Cycles, Proceeding of the 3rd International Conference on Accelerator Driven Transmutation Technologies and Applications, Praha, 7-11 June 1999.
7. TAKIZUKA, T., TSUJIMOTO, K., SASA, T., TAKANO, H., Dedicated Accelerator Driven System for nuclear waste Transmutation, Proceeding of the 3rd International Conference on Accelerator Driven Transmutation Technologies and Applications, Praha, 7-11 June 1999.
8. NEA-OECD, Trend in Nuclear Fuel Cycle: Economic, Environmental, and Social Aspects, NEA-OECD Publication 2001.