

**ANALISIS FRAKSI BAKAR
BAHAN BAKAR REAKTOR ATW**

Imam Bastori¹⁾, Djati HS²⁾, Ida NF³⁾

ABSTRAK

ANALISIS FRAKSI BAKAR BAHAN BAKAR REAKTOR ATW. Fraksi bakar bahan bakar ATW merupakan parameter yang penting dalam pengelolaan teras reaktor ATW. Makalah ini akan menganalisis faktor-faktor yang mempengaruhi besarnya fraksi bakar bahan bakar ATW dibandingkan dengan bahan bakar reaktor air ringan (LWR). Hasil analisis menunjukkan bahwa besar kecilnya fraksi bakar bahan bakar ATW sangat dipengaruhi oleh fraksi diluent (uranium) dalam bahan bakar tersebut, semakin besar fraksi diluent semakin besar pula fraksi bakar bahan bakar dan semakin kecil fraksi diluent semakin kecil fraksi bakar-nya.

Kata Kunci: fraksi bakar, transmudasi, reaktor ATW

ABSTRACT

ANALYSIS OF ATW FUEL BURN-UP. ATW fuel burn-up is an important parameter for ATW core management. This paper will analyze some factors which affect the value of ATW fuel burn-up compared with light water reactor (LWR) system. Result of analysis shows that the value of burn-up of ATW fuel is affected by diluent fraction (uranium) in the fuel. Increasing diluent fraction will increase fuel burn-up and decreasing diluent fraction will decrease fuel burn-up.

Keywords: burn-up, transmutation, ATW reactor

1) Staf Bidang Manajemen Persiapan Pembangunan PLTN
2) Staf Perencanaan Sistem Energi
3) Staf Perencanaan Sistem Energi

I. PENDAHULUAN

Accelerator-driven Transmutation Waste (ATW) merupakan konsep gabungan antara teras reaktor nuklir subkritik dengan sistem pemasok neutron yang berasal dari akselerator berdaya tinggi. Konsep ini semakin menarik perhatian karena sistem ini bisa dimanfaatkan sebagai mesin transmudasi unsur-unsur trans-uranium dan aktinida minor yang terdapat dalam bahan bakar bekas PLTN. Konsep yang juga sering disebut sebagai sistem hibrida ini dioperasikan dengan memanfaatkan sisa material fisil dan produk material fertil bahan bakar bekas. Di samping untuk proses transmudasi limbah radioaktif tingkat tinggi yang terdapat dalam bahan bakar bekas, juga untuk mengubah produk fisi umur panjang dan tingkat radiotoksitas tinggi menjadi material radioisotop yang sebagian besar berumur pendek dan atau lebih stabil. Sistem ini juga menghasilkan panas yang dapat dikonversi menjadi listrik. Energi listrik yang dihasilkan sebagian digunakan untuk mengoperasikan akselerator dan sebagian lainnya masuk dalam sistem jaringan listrik.

Sebagaimana lazimnya reaktor nuklir, masalah manajemen bahan bakar juga merupakan hal yang sangat penting pada reaktor subkritis sistem ATW. Salah satu parameter penting dari manajemen bahan bakar adalah besaran fraksi bakar dari bahan bakar reaktor. Parameter tersebut akan menentukan siklus penggantian elemen bakar dalam teras reaktor dan menjadi indikator optimasi penggunaan bahan bakar. Suatu teras reaktor dengan fraksi bakar yang besar menunjukkan bahwa bahan bakar tersebut mempunyai unjuk kerja yang baik dalam pembangkitan energi, sebaliknya fraksi bakar yang kecil mengindikasikan unjuk kerja yang buruk dalam pembangkitan energi. Semakin besar fraksi bakar akan semakin besar pula energi yang dapat dibangkitkan dari bahan bakar tersebut.

Secara teori fraksi bakar bahan bakar pada reaktor subkritis ATW lebih besar dari reaktor nuklir air ringan (LWR), karena sistem ATW dirancang untuk proses transmudasi secara terus-menerus sampai terbentuknya inti ringan dengan tingkat radioaktivitas rendah atau stabil. Dengan kata lain dalam konsep ATW hampir semua inti berat diusahakan terbakar dan terkonversi menjadi energi nuklir. Hal ini berbeda dengan proses pada reaktor daya konvensional yang mana hanya sebagian inti berat saja yang terbakar, dan masih menyisakan inti berat fertil maupun fisil. Dalam makalah ini akan dilakukan analisis besarnya fraksi bakar bahan bakar reaktor subkritis ATW dibandingkan dengan fraksi bakar bahan bakar reaktor air ringan (LWR).

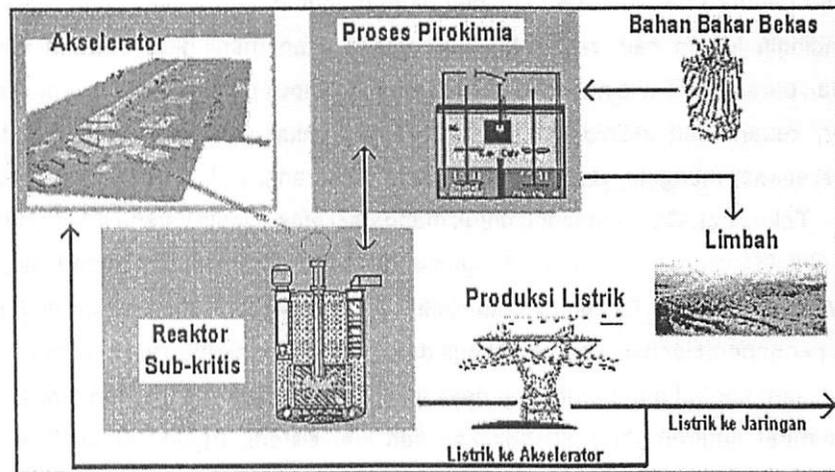
II. KONSEP ATW

Berbagai studi tentang bahan bakar bekas menunjukkan bahwa risiko radiologi jangka panjang berkaitan dengan penyimpanan bahan bakar bekas pada fasilitas penyimpanan lestari meliputi^[1,2]: 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 relatif berumur paruh pendek. Untuk mengatasi masalah-masalah tersebut munculah konsep ATW yang pada prinsipnya bertujuan untuk memperpendek waktu paruh produk fisi yang waktu paruhnya sangat panjang, dan menstabilkan produk fisi trans-uranium.

2.1 Sistem ATW

Sistem ATW melibatkan beberapa elemen penting yang saling terkait seperti terlihat pada Gambar 1. Elemen-elemen tersebut meliputi ^[3]: 1) akselerator proton linier berdaya tinggi, 2) instalasi proses pirokimia yang merupakan teknologi kunci proses penanganan 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 1. Skema Sistem ATW ^[3]

Untuk memenuhi tujuan transmudasi bahan bakar bekas, sistem ATW harus mampu untuk ^[3,4]:

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 radiotoksitas tinggi
3. Memisahkan Sr-90 dan Cs-137 dari bahan bakar bekas, meskipun merupakan produk fisi yang relatif berumur 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

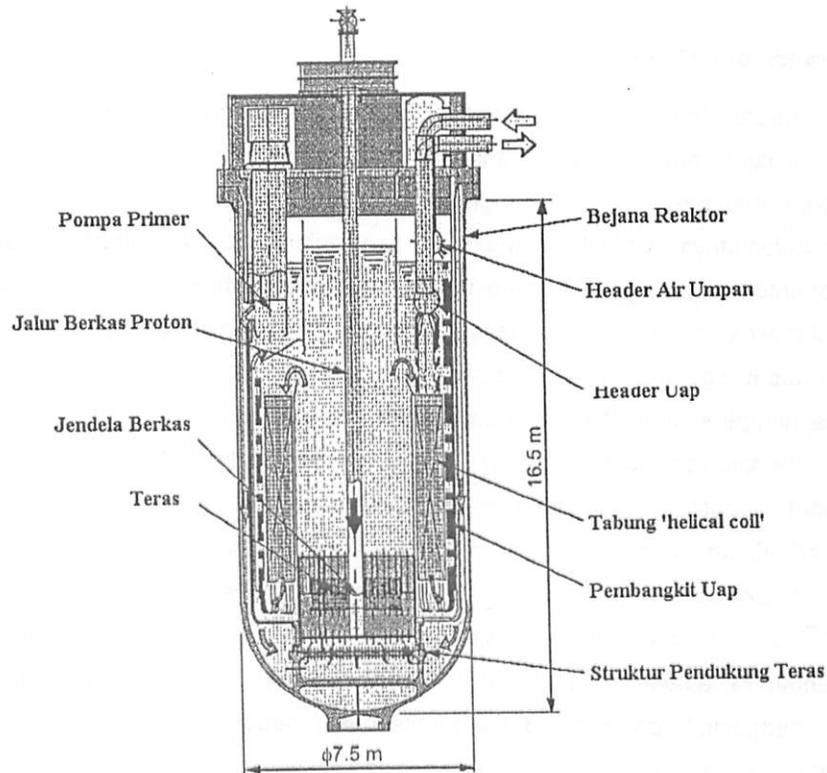
2.2 Perangkat Reaktor Subkritis

Pada prinsipnya semua jenis reaktor nuklir (baik reaktor termal, cepat, maupun fasilitas subkritis) dapat digunakan untuk mentransmutasi bahan bakar bekas. Di antara 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, tetapi pada sistem reaktor termal justru akan berfungsi sebagai racun penyerap 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 transmulasi 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 subkritis, sistem kontrol dan perubahan daya tidak tergantung pada neutron tunda, tapi dipecu 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 trans-uranium 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 pemblok cepat berpendingin logam cair dan teknologi reaktor kapal selam berpendingin Pb-Bi milik USSR^[6]. Dengan sumber neutron akselerator berdaya berkas proton sebesar 1 GeV = 48 mA, target mampu melakukan faktor pelipatan neutron efektif sebesar 0,98 menghasilkan daya termal sebesar 800 MWth.

Dengan asumsi faktor beban sebesar 80%, laju transmulasi 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 kebutuhan listriknya dari sistem itu sendiri. Pada Gambar 2 ditunjukkan desain konseptual reaktor ATW.



Gambar 2. Konsep desain reaktor subkritis ATW ^[5]

III. ANALISIS FRAKSI BAKAR

3.1 Perhitungan Fraksi Bakar

Dalam teras reaktor nuklir, inti bahan bakar (yang merupakan bahan dapat belah) akan mengalami reaksi fisi dengan neutron menghasilkan energi panas. Besarnya energi yang dibebaskan oleh setiap reaksi fisi adalah 32 pJ (200 MeV)^[6]. Jika reaksi fisi tersebut dikenakan terhadap 1 kg bahan bakar (fisil) akan menghasilkan energi termal sebesar 80 TJ (Tera Joule) yang setara 925 MW.d (Mega Watt day)^[6].

Perbandingan antara energi yang dibangkitkan dengan massa bahan bakar disebut fraksi bakar yang dinyatakan sebagai berikut ^[7]:

$$\text{Fraksi.bakar} = \frac{\text{Energi.yang.dibangkitkan}}{\text{Massa.elemen.bakar}}$$

(1)

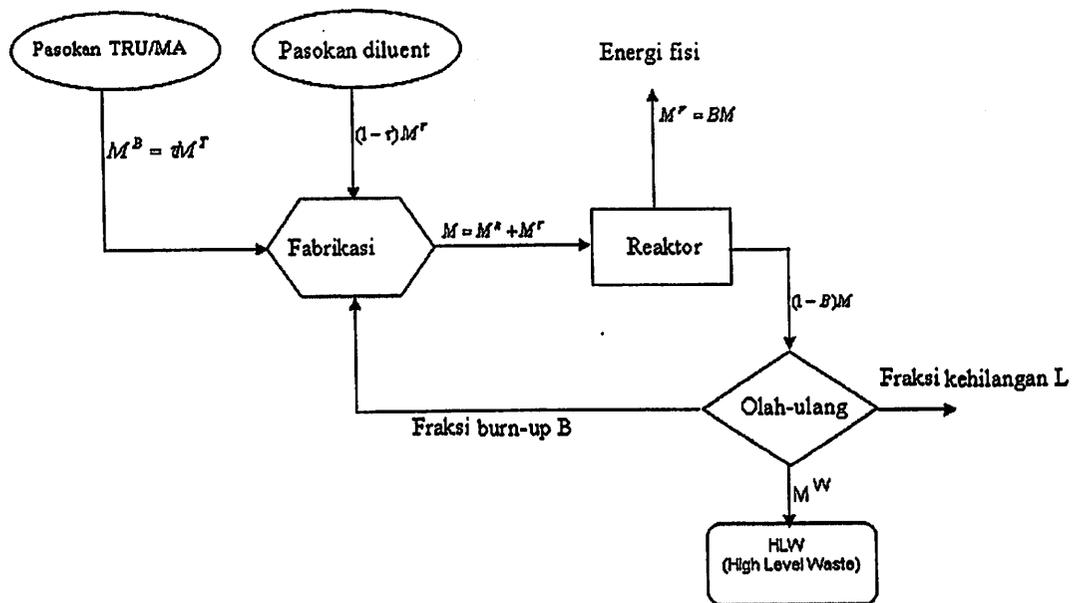
Biasanya satuan fraksi bakar dinyatakan dengan MW.d/kg (mega watt day/kilogram bahan bakar) atau GWd/t (giga watt day/ton)

Dalam kenyataannya tidak semua bahan fisil yang terkandung dalam bahan bakar pada teras reaktor mengalami reaksi fisi akan tetapi masih menyisakan sejumlah bahan fisil dalam bahan bakar bekas. Bagian bahan bakar yang mengalami reaksi fisi dinyatakan dalam fraksi bakar, dengan notasi *B*. Satuan *B* biasanya dinyatakan dalam persen (%).

3.2 Transmutasi Inti Berat

Strategi untuk proses transmutasi inti dilakukan dengan siklus bahan bakar tertutup. Dalam siklus tertutup ini trans-uranium (TRU)/aktinida minor (MA) dipasok ke instalasi fabrikasi bahan bakar bersama dengan *diluent* (biasanya uranium) untuk membuat bahan bakar. Selanjutnya setelah mengalami pendinginan, bahan bakar digunakan dalam reaktor untuk membangkitkan energi termal dan berikutnya bahan bakar bekas dari reaktor ATW diproses ulang untuk dipisahkan antara material limbah dengan material inti berat yang masih dapat digunakan kembali dalam fabrikasi bahan bakar. Siklus ini terus berulang sampai hampir semua inti berat terbakar dalam reaksi fisi.

Secara sederhana alur siklus bahan bakar tertutup dinyatakan pada Gambar 3. Pada gambar tersebut terlihat, TRU/MA dipasok ke instalasi fabrikasi bahan bakar dengan massa $M^B = \alpha M^T$, dimana M^T adalah massa *top up fuel* dan α merupakan fraksi TRU/MA dalam *top up fuel*. Diluent (biasanya uranium) dipasok ke fabrikasi bahan bakar dengan massa sebesar $(1-\alpha)M^T$. Hasil fabrikasi adalah bahan bakar reaktor sub-kritis ATW dengan massa $M = M^B + M^T$ dengan M^R adalah massa TRU/MA hasil olah-ulang. Selanjutnya dalam reaktor bahan bakar mengalami transmutasi dengan fraksi bakar sebesar B , massa bahan bakar yang mengalami fisi adalah $M^F = BM$ dan massa bahan bakar yang masuk pada olah-ulang $(1-B)M = (1-B)M^F/B$. Dalam olah-ulang dapat diambil kembali massa TRU/MA sebesar M^R sisanya adalah massa limbah sebesar $M^W = (1-B)LM^F/B$, dimana L adalah fraksi kehilangan selama olah-ulang.



Gambar 3. Alur siklus bahan bakar ATW

Pada kondisi seimbang yaitu fraksi kehilangan TRU/ MA dalam proses olah-ulang dan fabrikasi sangat kecil (mendekati nol) maka L dinyatakan dengan persamaan ^[8]:

$$L = \frac{\tau}{\delta R^M}$$

(2)

dengan R^M adalah faktor reduksi massa limbah, sedangkan δ yang merupakan faktor fraksi bakar yang dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai ^[8]:

$$\delta = \frac{1 - B}{B}$$

(3)

dengan B adalah fraksi bakar bahan bakar ATW yaitu parameter yang menyatakan besarnya bahan bakar ATW yang mengalami reaksi fisi

IV. DISKUSI DAN PEMBAHASAN

Dari dua persamaan (2) dan (3) dapat diturunkan persamaan untuk fraksi bakar bahan bakar ATW sebagai berikut :

$$B = \frac{LR^M}{LR^M + \tau}$$

(4)

Dari persamaan (4) ini, nampak bahwa fraksi bakar bahan bakar ATW ditentukan oleh besarnya parameter-parameter L , R^M dan τ . Selanjutnya karena 1 kg bahan bakar (fisil) menghasilkan sekitar 925 MW.d (Mega Watt day), maka besarnya fraksi bakar bahan bakar ATW dapat dinyatakan sebagai:

$$\text{Fraksi - bakar} = \frac{925 LR^M}{LR^M + \tau}$$

(5)

Berdasarkan Persamaan (5) dapat dihitung fraksi bakar bahan bakar ATW. Misalnya, dalam suatu kasus di mana teras ATW diisi dengan bahan bakar TRU/MA murni tanpa adanya uranium (diluent) yaitu $\tau = 1$, dengan faktor reduksi massa limbah $R^M = 100$ dan fraksi kehilangan TRU/MA dalam proses olah-ulang dan fabrikasi $L = 0,18\%$ ^[8] maka besarnya fraksi bakar bahan bakar tersebut dapat dihitung menggunakan Persamaan (5) sebesar sekitar 140 MW.d/kg atau 140 GW.d/t (giga watt day/ton). Hasil ini sesuai dengan hasil yang dipaparkan oleh OECD (Organization For Economic Co-operation and Development) yang ditunjukkan oleh Tabel 1.

Dari tabel nampak bahwa fraksi bakar rata-rata untuk sistem ATW dengan bahan bakar Ac-Zr dan AcN-ZrN besarnya 140 GWd/t (Giga watt day/ ton), lebih besar dari pada

sistem LWR dengan bahan bakar dari jenis UOX dan MOX yang hanya sekitar 50 GWd/t. Oleh karena itu dapat dikatakan bahwa dalam sistem daur bahan bakar tertutup, jika ditinjau dari sisi fraksi bakar, mendaur-ulang bahan bakar bekas akan lebih efektif jika menggunakan sistem ATW dibanding menggunakan sistem reaktor LWR. Harga fraksi bakar yang relatif lebih besar pada sistem ATW ini, menandakan bahwa hampir semua bahan fisil dalam bahan bakar bekas dapat terbakar dan terkonversi lebih baik. Hal ini akan berimplikasi pada penghematan bahan bakar nuklir untuk jangka panjang.

Tabel 1. Reaktor dan karakteristik siklus bahan bakar ^[8]

Reaktor/ATW	Bahan Bakar	Fraksi bakar rata-rata (GWd/t)	Penyimpanan/ pendinginan (th)	Metode Olah Ulang
LWR ¹	UOX	50	2/4	basah
LWR ¹	MOX	50	2/7	basah
Pembakar PU (FR) ²	MOX	185	2/7	basah
Pembakar TRU (FR) ³	Ac-Zr	140	1/2	kering
Pembakar TRU (ATW) ⁴	Ac-Zr	140	1/2	kering
Pembakar MA (ATW)	AcN-ZrN	140	1/2	kering
Reaktor cepat	Ac-Zr	140	1/2	kering

1. PWR (French N4 reactor)
2. Desain CAPRA dengan fraksi bakar teras tinggi
3. Teras pembakar ALMR dengan rasio konversi 0,5
4. ATW, teras berpendingin timbal-bismut (usulan ANL)

Nilai fraksi bakar pada Tabel 1 merupakan nilai minimum dari sistem ATW. Untuk meningkatkan fraksi bakar sistem tersebut dapat dilakukan dengan menambahkan diluent (uranium) dalam komposisi bahan bakar sehingga harga β turun. Jika penambahan diluent tersebut mencapai harga maksimal yaitu $\beta = 1$ maka fraksi bakar bahan bakar ATW mencapai nilai maksimal juga. Namun demikian karena adanya rekomendasi dari para ahli untuk membatasi nilai fraksi bakar maksimal bahan bakar ATW sebesar 25% ^[8] maka tidak dimungkinkan pembakaran dengan kondisi $\beta = 1$. Dari fakta ini maka dapat dikatakan bahwa besarnya fraksi bakar bahan bakar ATW sangat tergantung pada keberadaan diluent dalam bahan bakar namun dengan jumlah yang dibatasi dan β merupakan parameter yang penting dalam menentukan besarnya fraksi bakar bahan bakar ATW.

V. KESIMPULAN

1. Besarnya fraksi bakar bahan bakar ATW berbanding lurus dengan fraksi diluent (biasanya uranium) dalam bahan bakar atau berbanding terbalik dengan fraksi TRU/MA dalam *top up fuel* (□).
2. Fraksi bakar rata-rata bahan bakar ATW adalah 140 GWd/t sedangkan fraksi bakar rata-rata bahan bakar LWR adalah 50 GWd/t. Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa fraksi bakar rata-rata bahan bakar ATW lebih besar dari pada bahan bakar LWR.
3. Transmutasi bahan bakar bekas menggunakan perangkat sub-kritis ATW lebih menguntungkan daripada menggunakan reaktor kritis (termal maupun *fast*). Pada perangkat sub-kritis, komposisi bahan bakar bisa lebih fleksibel, karena beroperasi dengan neutron yang berasal dari luar sistem reaktor.

DAFTAR PUSTAKA

1. THE EUROPEAN TECHNICAL WORKING GROUP ON ATW, a European Roadmap for Developing Accelerator Driven Systems (ATW) for Nuclear Waste Incineration, ENEA, Roma, April 2001.
2. 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
3. VENNARI, 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.
4. DURPEL, L. V., WYDLER, P., SAKURAI, S., NA, B. C., DOMAE, M., OECD/NEA Comparative Study on ATW & FR in Advance Fuel Cycles, Proceeding of the 3rd International Conference on Accelerator Driven Transmutation Technologies and Applications, Praha, 7-11 June 1999.
5. 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.
6. SAMUAL GLASSTONE, ALEXANDER SESONSKE, *Nuclear Reactor Engineering, Reactor Design Basics*, Fourth Edition Volume One, 1994
7. JAMES J. DUDERSTADT, LOUIS J. HAMILTON, *Nuclear Reactor Analysis*, Department of Nuclear Engineering, The University of Michigan, Ann Arbor Michigan, John Wiley & Sons, 1942
8. OECD, *Accelerator Driven System (ATW) and Fast Reactor (FR) in Advanced Fuel Nuclear Cycles , A Comparative Study*, Nuclear Energy Agency, Organization For Economic Co-operation and Development, 2002