

---

## PEMBERDAYAAN REAKTOR NUKLIR PADA ABAD KE-21

**Pramudita Anggraita**  
Badan Tenaga Nuklir Nasional  
email: pramudita@batan.go.id

### ABSTRAK

**PEMBERDAYAAN REAKTOR NUKLIR PADA ABAD KE-21.** Dibahas skenario kebutuhan energi dunia pada abad ke-21. Reaktor nuklir dapat mempunyai peran penting dalam penyediaan energi pada abad ke-21 jika terus dikembangkan secara evolusi maupun inovatif, sehingga kompetitif secara ekonomis, berkeselamatan tinggi, berdampak lingkungan positif, dan menjamin inovasi penyediaan energi yang berlanjut di masa depan.

**Kata kunci:** reaktor nuklir, energi, abad ke-21

### ABSTRACT

**NUCLEAR REACTOR EMPOWERMENT IN THE 21<sup>ST</sup> CENTURY.** Scenarios of global energy need in the 21<sup>st</sup> century are discussed. Nuclear reactors will have important roles in supplying energy need in the 21<sup>st</sup> century if its evolutionary and innovative developments are continued to achieve economical competitiveness, high safety, positive environmental impacts, and ensuring sustainability of innovation in the future energy supply.

**Key words:** nuclear reactor, energy, 21<sup>st</sup> century

### PENDAHULUAN

Kebutuhan energi dunia diproyeksikan akan meningkat sepanjang abad ke 21. Pendorong peningkatan ini adalah pertumbuhan ekonomi dan kenaikan jumlah penduduk, terutama di negara-negara berkembang. Proyeksi menyeluruh tentang hal ini diterbitkan pada Panel Antarpemerintah pada Perubahan Iklim (IPPC, Intergovernmental Panel on Climate Change) *Special Report on Emissions Scenarios* (SRES) pada tahun 2000. Dalam 40 skenario acuan pada SRES, penggunaan energi primer dunia tumbuh dengan faktor 1,7 sampai 3,7 atau rerata 2,5 pada tahun 2050.



Permintaan listrik tumbuh bahkan lebih cepat lagi karena pertumbuhan ekonomi secara konsisten memicu pergeseran ke arah kebutuhan listrik. Masyarakat lebih menyukainya karena kebersihan pada ujung pemakaiannya, serta kemudahan dan keluwesannya. Hingga tahun 2050 IPPC memproyeksikan pertumbuhan listrik dengan faktor antara 2 dan 8, dengan median 4,7.

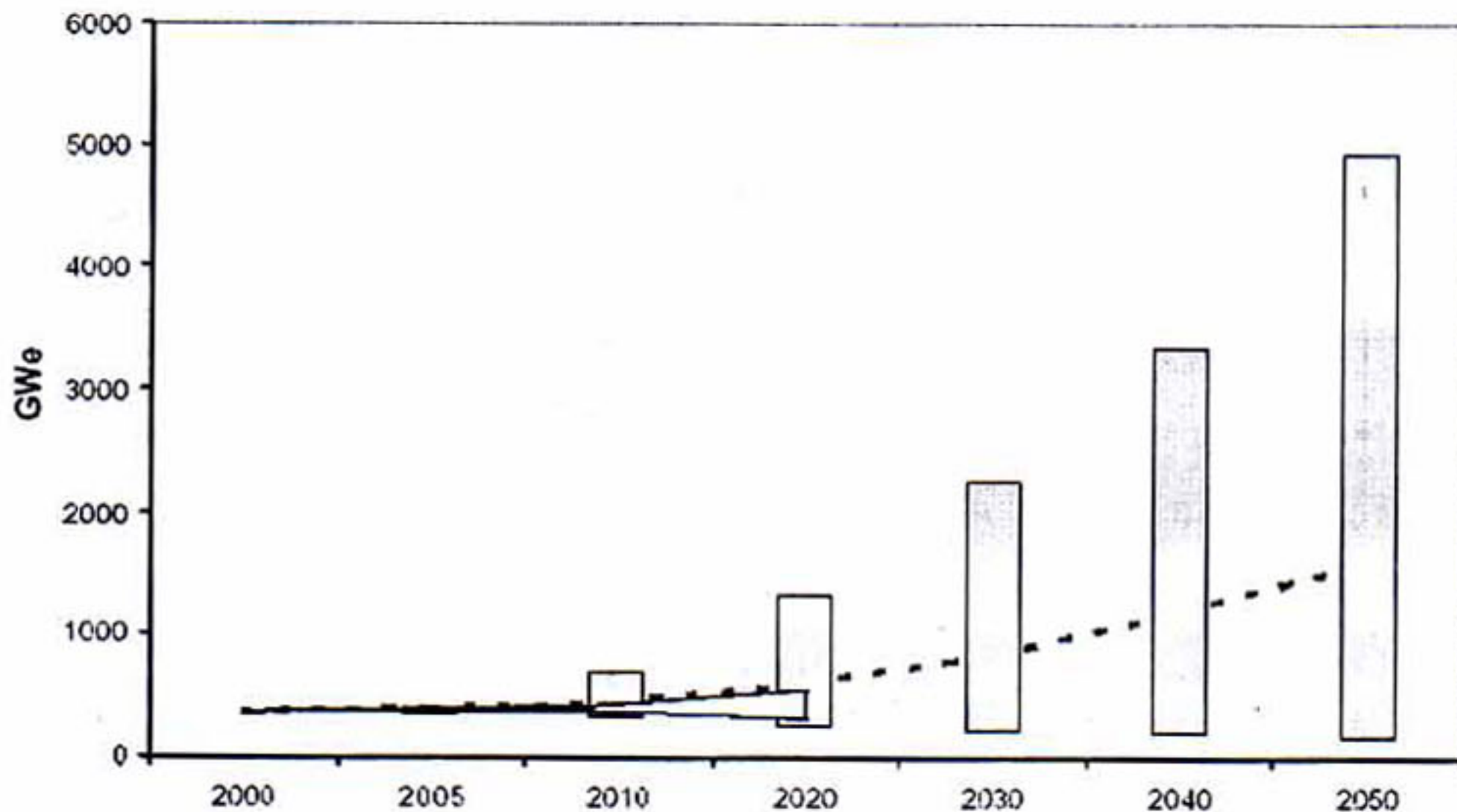
Dari 40 skenario SRES tidak ada yang memasukkan kebijakan yang berkaitan dengan perubahan iklim. Laporan selanjutnya dari SRES, *Third Assessment Report (TAR)*, memberikan 76 skenario paska-SRES yang melibatkan kebijakan ini. Karena batas emisi karbon dalam skenario TAR, pertumbuhan energi tidak secepat skenario SRES, tetapi masih cukup cepat dengan pertumbuhan antara 1% dan 2,5% per tahun. Selama abad ke-20 telah dapat dilakukan perbaikan efisiensi sekitar 1% per tahun, dan skenario mengasumsikan potensi perbaikan ini dapat tetap berlanjut. Lebih lanjut skenario SRES yang sangat "hijau" juga memasukkan penghematan yang lebih luas dan perubahan sikap hidup. Meskipun jumlah penduduk dan penggunaan energi tumbuh lebih lambat, bahkan meskipun penggunaan energi di negara-negara maju secara absolut berkurang, penggunaan energi secara global tetap meningkat hingga paling tidak pada akhir abad 21. Dalam skenario di mana jumlah penduduk dunia mencapai puncak pada 8,6 milyar pada tahun 2050, pertumbuhan ekonomi di negara-negara berkembang tetap menyebabkan pertumbuhan energi dunia.

## **PROYEKSI KAPASITAS NUKLIR**

Proyeksi kapasitas nuklir SRES pada tahun 2050 adalah peningkatan dari sekarang 350 GWe menjadi 5000 GWe (median 1500 GWe), atau penambahan 50-150 GWe per tahun antara 2020-2050. Dari 19 skenario TAR, proyeksi untuk 2050 berkisar antara 2300 GWe hingga 7000 GWe (median 4400 GWe), atau penambahan 50-205 GWe per tahun antara 2020-2050, di samping beberapa reaktor yang harus diganti [1].



Proyeksi kapasitas energi nuklir pada skenario SRES diperlihatkan sebagai balok vertikal pada Gambar 1. Pada gambar tersebut juga diperlihatkan proyeksi jangka menengah



Gambar 1. Proyeksi kapasitas nuklir dalam 3 skenario: SRES (balok) dan median (garis putus) dan IAEA (segitiga, proyeksi atas dan bawah hingga tahun 2020).

yang lebih rendah (hingga tahun 2020). Proyeksi IAEA ditunjukkan sebagai segitiga. Alas segitiga adalah proyeksi bawah yang memisalkan tidak adanya PLTN baru dan dekomisioning PLTN yang sudah tua, sehingga pembangkitan listrik nuklir turun 9% pada tahun 2020. Bagian atas segitiga menunjukkan proyeksi atas dengan perkiraan kenaikan 53% yang sedikit di bawah median proyeksi SRES. Proyeksi yang lain adalah dari International Energy Agency (IEA) yang tidak berbeda dari proyeksi bawah IAEA, meskipun hanya mengandaikan penurunan 3% pembangkitan listrik nuklir antara tahun 2000 hingga tahun 2020.



Beda proyeksi antara skenario jangka-menengah IAEA dan IEA dengan skenario jangka-panjang SRES dan TAR terutama disebabkan oleh beda asumsi tentang kendala politik, perbaikan biaya, dan inovasi. Tidak adanya PLTN di Eropa Barat dan Amerika Utara dalam proyeksi IEA dan proyeksi bawah IAEA memisalkan lingkungan politik yang menentang PLTN, tidak ada inovasi atau tidak ada perbaikan dalam biaya PLTN baru. Sebaliknya skenario jangka-panjang SRES dan TAR memisalkan bahwa teknologi nuklir, seperti teknologi yang lain, tidak statik dan investasi jangka panjang dilakukan dengan alasan ekonomi. Dalam skenario ini, industri nuklir terus melakukan reduksi biaya, melakukan inovasi, dan dapat menjual PLTN semata-mata berdasarkan harga dan unjuk-kerjanya pada lingkungan pasar yang neutral secara politik. Sejumlah skenario SRES dan TAR juga mengasumsikan peningkatan peran energi nuklir untuk aplikasi inovatif non-listrik, termasuk untuk produksi hidrogen untuk transportasi maupun penggunaan stasioner.

Mengurangi beda antara kedua kelompok proyeksi tersebut memerlukan keberhasilan pada dua hal. Pertama: melalui perbaikan secara evolusi dan inovasi, industri nuklir harus mereduksi biaya secara berkelanjutan. Kedua: kemajuan juga harus dicapai pada hal-hal yang bersifat politis dan penerimaan masyarakat. Keduanya tidak akan terjadi dengan sendirinya. Yang pertama memerlukan penelitian dan pengembangan yang inovatif di pihak industri. Yang kedua memerlukan diskusi publik dan politik yang berkelanjutan antara yang menerima dan yang menentang semua opsi energi.

## **PERBAIKAN DAN INOVASI PLTN**

Dalam pasar yang kompetitif, teknologi harus terus melakukan perbaikan dan inovasi atau tertinggal di belakang. Generasi reaktor dapat dibagi menjadi empat: prototip awal reaktor (Generasi I), PLTN besar (supaya ekonomis) seperti yang ada sekarang (Generasi II), PLTN maju dengan sistem pengamanan melekat yang didesain

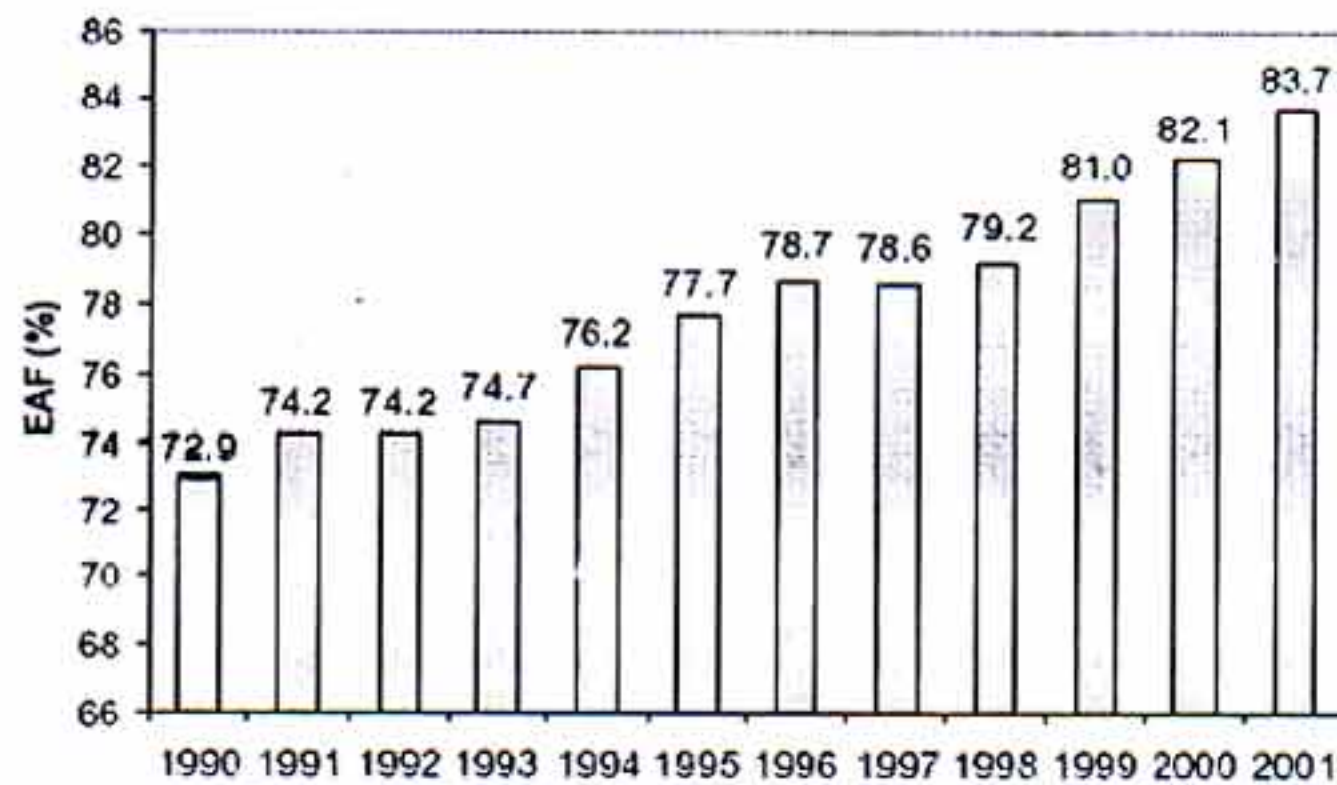


akhir-akhir ini (Generasi III), dan sistem generasi mendatang yang akan didesain dan dibuat dalam dua dekade dari sekarang (Generasi IV). Pada tahun 2000, sembilan negara bekerjasama dalam proyek Generasi IV: Argentina, Brasil, Kanada, Perancis, Jepang, Afrika Selatan, Korea Selatan, Inggris, dan Amerika Serikat [2].

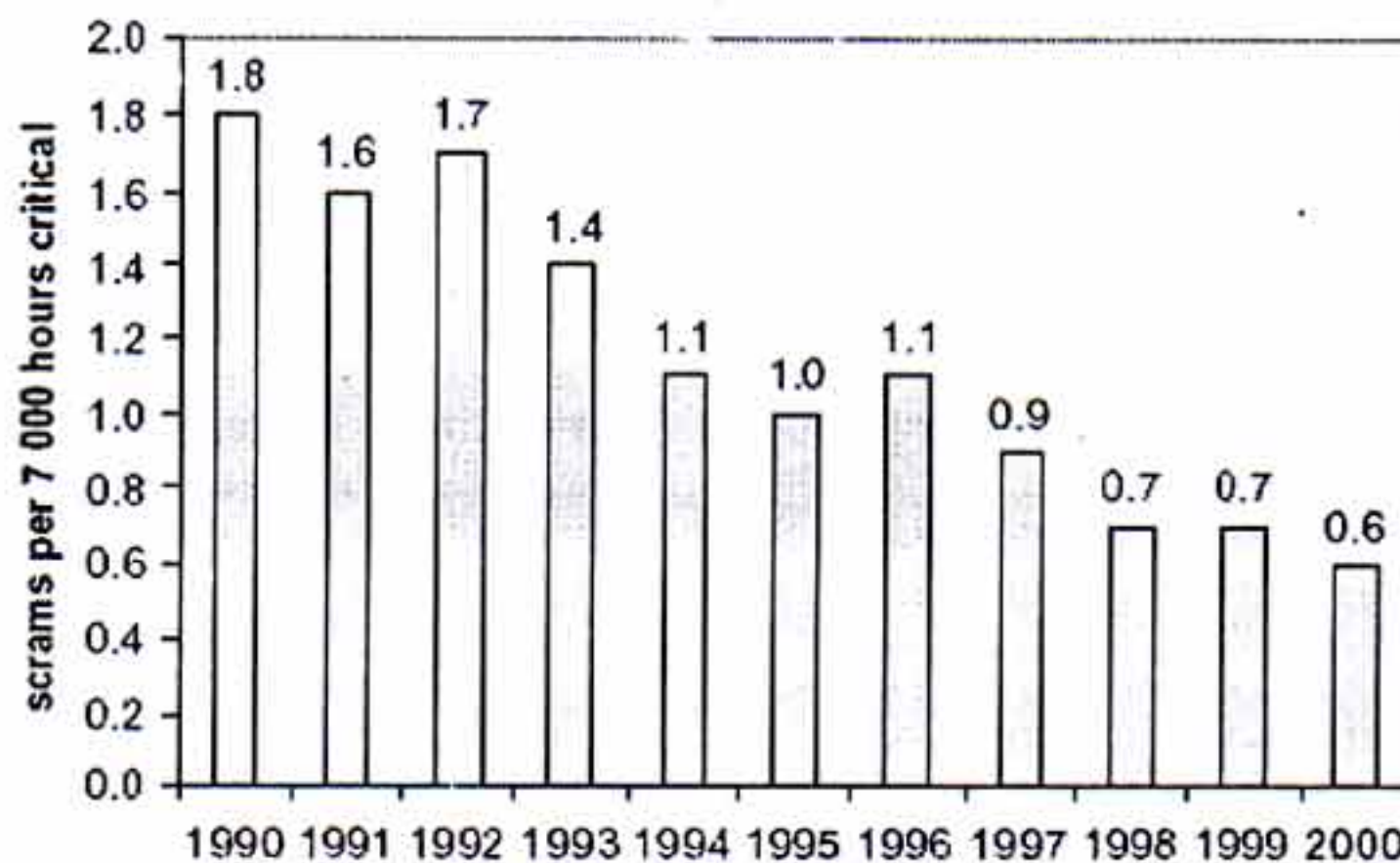
PLTN yang ada sekarang (Generasi II) sebanyak 438 di seluruh dunia membangkitkan 16% energi listrik. Di AS, 103 PLTN menyediakan sekitar 20% energi listrik. Meskipun tidak ada PLTN dibangun atau dipesan di AS dalam dua dekade, pembangkitan listrik nuklir tumbuh hampir 8% per tahun karena industrinya makin dewasa dan efisien. Dalam 10 tahun terakhir, PLTN di AS telah menambah lebih dari 23.000 MW listrik nuklir, setara dengan 23 PLTN besar, meskipun tidak ada konstruksi PLTN baru [2]. Ini menunjukkan perbaikan dan inovasi dalam sistem PLTN yang ada sekarang, yang juga ditunjukkan pada Gambar 2 (*energy availability factor* yang meningkat), Gambar 3 (jumlah *scram* tak terencana yang menurun) dan Gambar 4 (jumlah kecelakaan di industri nuklir yang makin menurun, atau keselamatan yang makin meningkat) [1].

Sistem generasi mendatang didasarkan pada 3 kelas umum reaktor: pendingin gas, pendingin air, dan reaktor cepat. Sistem berpendingin gas dikembangkan di Cina, Afrika Selatan, dan AS. Afrika Selatan akan mengoperasikan prototip *full-size* pada tahun 2006. Pendingin gas helium dapat beroperasi pada suhu 900 °C, sehingga jika langsung menggerakkan turbin dapat menghasilkan 40% efisiensi termal, dibandingkan dengan reaktor Generasi II yang hanya dapat beroperasi pada suhu 300 °C dengan efisiensi termal sekitar 30%. Suhu operasi yang cukup tinggi ini juga memungkinkan untuk produksi hidrogen dengan pemecahan molekul air. Kemungkinan ini dapat menjamin inovasi penyediaan energi yang berlanjut di masa depan, baik untuk transportasi maupun penggunaan stasioner dengan menggunakan sel bahan bakar (*fuel cell*) yang ramah lingkungan [2].





Gambar 2. Perbaikan dalam EAF (*energy availability factor*) rerata PLTN di dunia.



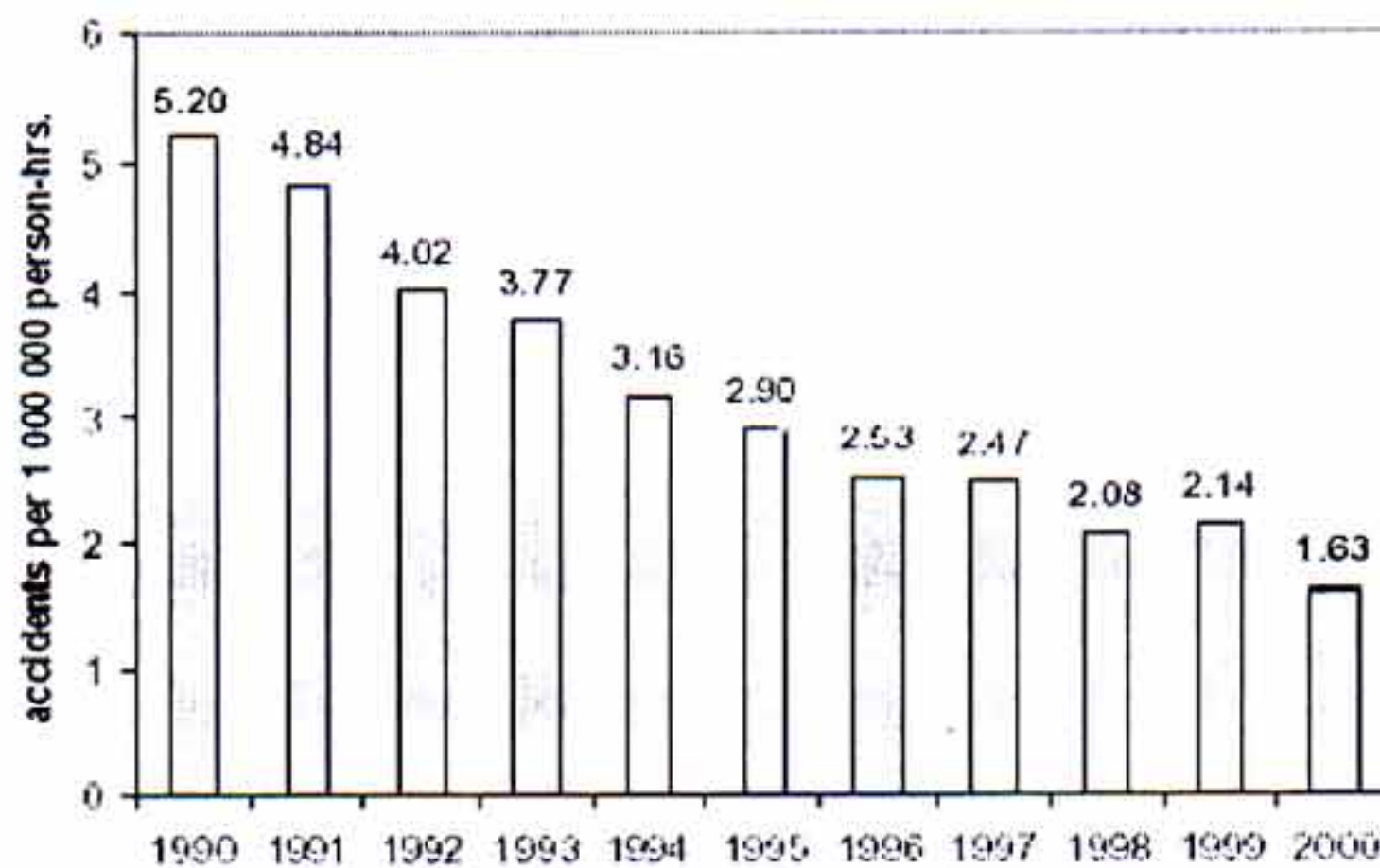
Gambar 3. *Scram* otomatis tak-terencana per 7.000 jam.

Penyederhanaan juga dilakukan dalam Generasi IV dengan membuat semua komponen primer berada dalam satu bejana, misalnya disain IRIS (*International Reactor Inovatif and Secure*) yang dikembangkan oleh Westinghouse Electric (AS), sehingga dapat dibuat dalam modul kecil yang pengembangan selanjutnya lebih luwes



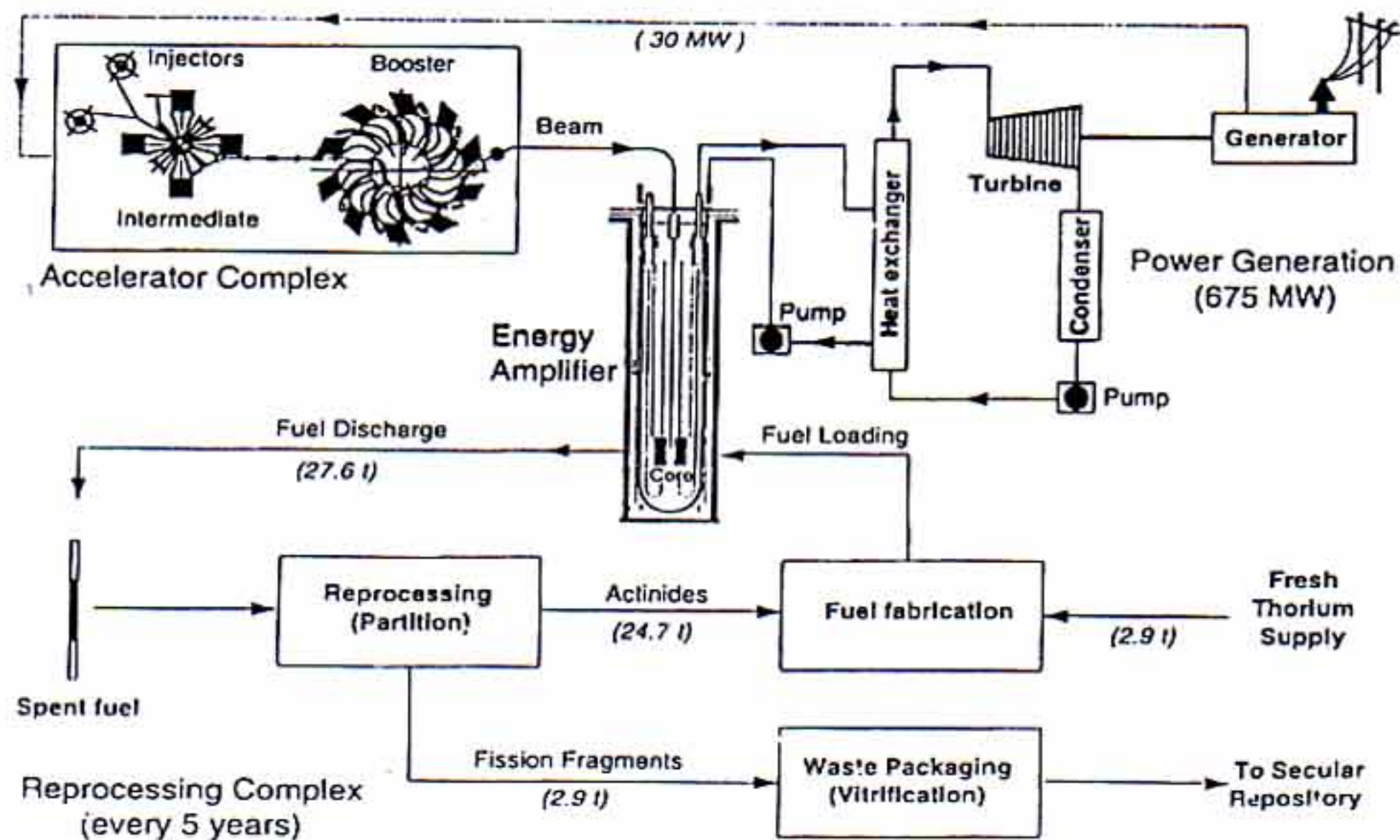
dan mengurangi biaya. Penelitian sedang dilakukan di Kanada, Perancis, Jepang, Korea Selatan, dan AS untuk menggunakan pendingin air superkritis dengan suhu operasi yang lebih tinggi [2].

Pendekatan desain untuk jangka-panjang adalah reaktor cepat yang menggunakan spektrum neutron cepat (tenaga tinggi) yang dapat menjadi reaktor pembiak (*breeder*) bahan bakar (Pu-239 dari U-238 atau U-233 dari Th-232). Keuntungan lain dari penggunaan neutron cepat adalah transmudasi aktinida dari hasil belah U, sehingga mengurangi aktivitas limbah radioaktifnya. Reaktor cepat menggunakan pendingin logam cair (Na, Pb, Bi-Pb) atau gas (He atau CO<sub>2</sub>) dengan suhu operasi yang tinggi.<sup>[2]</sup> Lebih lanjut sistem reaktor dapat dibuat subkritis sehingga lebih aman, dengan sumber neutron dari reaksi spalasi berkas proton energi tinggi (1 GeV) yang dibangkitkan oleh suatu akselerator (linear atau siklotron). Sistem ini disebut ADS (*Accelerator Driven System*) atau EA (*Energy Amplifier*) karena energi akselerator diperkuat oleh reaksi nuklir yang dibangkitkan oleh neutron spalasi yang dihasilkan (Gambar 5). Sistem ini sekaligus sebagai pembakar limbah radioaktif maupun Pu-239 yang merupakan bahan subyek non-proliferasi (Gambar 6) [3,4].

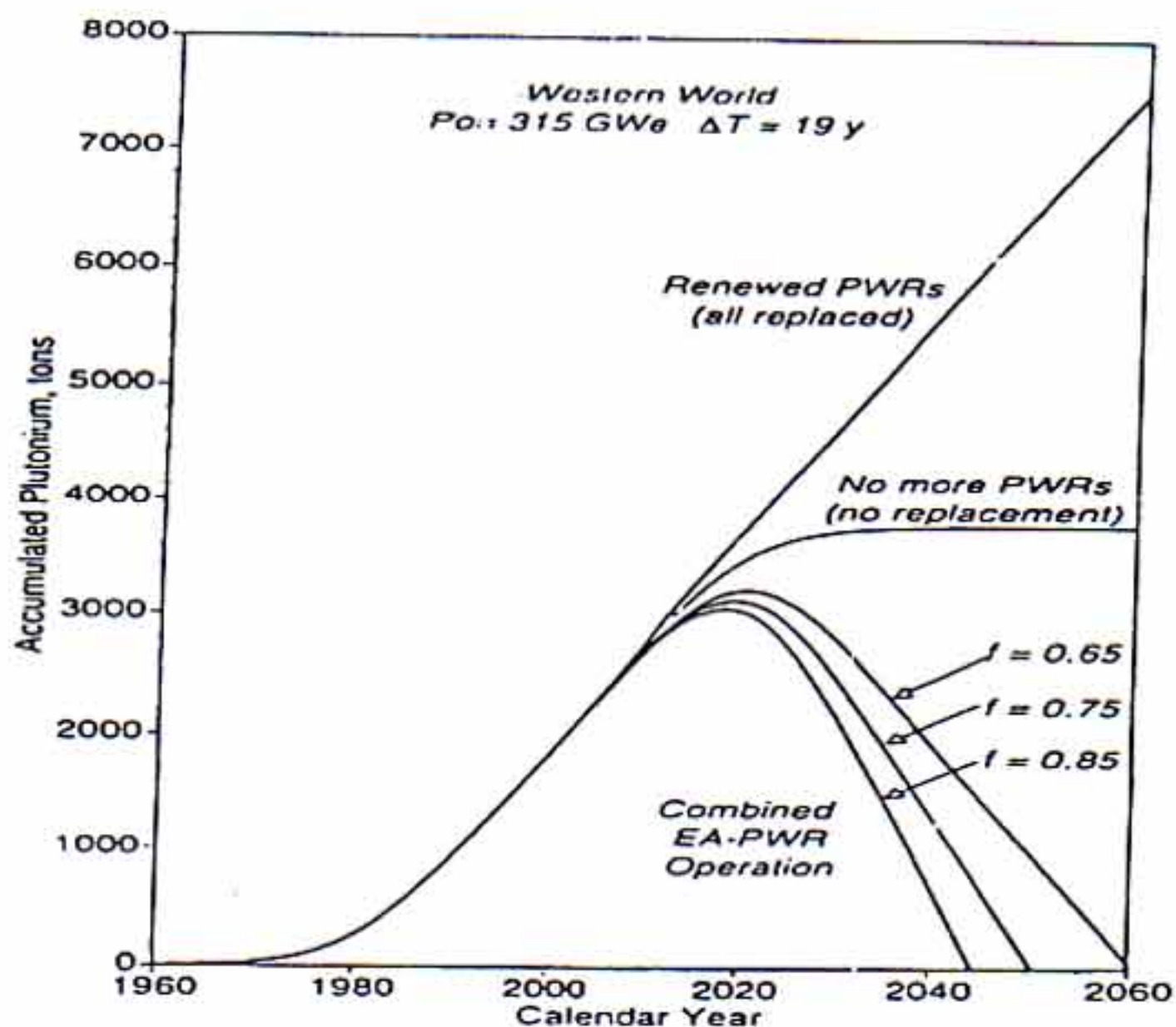


Gambar 4. Keselamatan industri nuklir, per 1.000.000 jam-orang.





Gambar 5. Sistem *Energy Amplifier* (EA) untuk pembangkit energi, pembiak bahan bakar, dan pembakar limbah radioaktif (aktinida)[5].



Gambar 6. Akumulasi Pu-239 jika semua PWR tetap beroperasi, semua berhenti beroperasi, dan kombinasi operasi PWR dan EA [6].



## **REAKTOR RISET [2]**

Jumlah reaktor riset di dunia sebanyak 277 yang beroperasi dan 17 direncanakan atau dalam konstruksi. Jumlah reaktor riset yang beroperasi di negara maju terbanyak pada tahun 1975 yaitu 328, dan sekarang tinggal 192. Jumlah reaktor riset yang beroperasi di negara berkembang terus meningkat dan sekarang berjumlah 85.

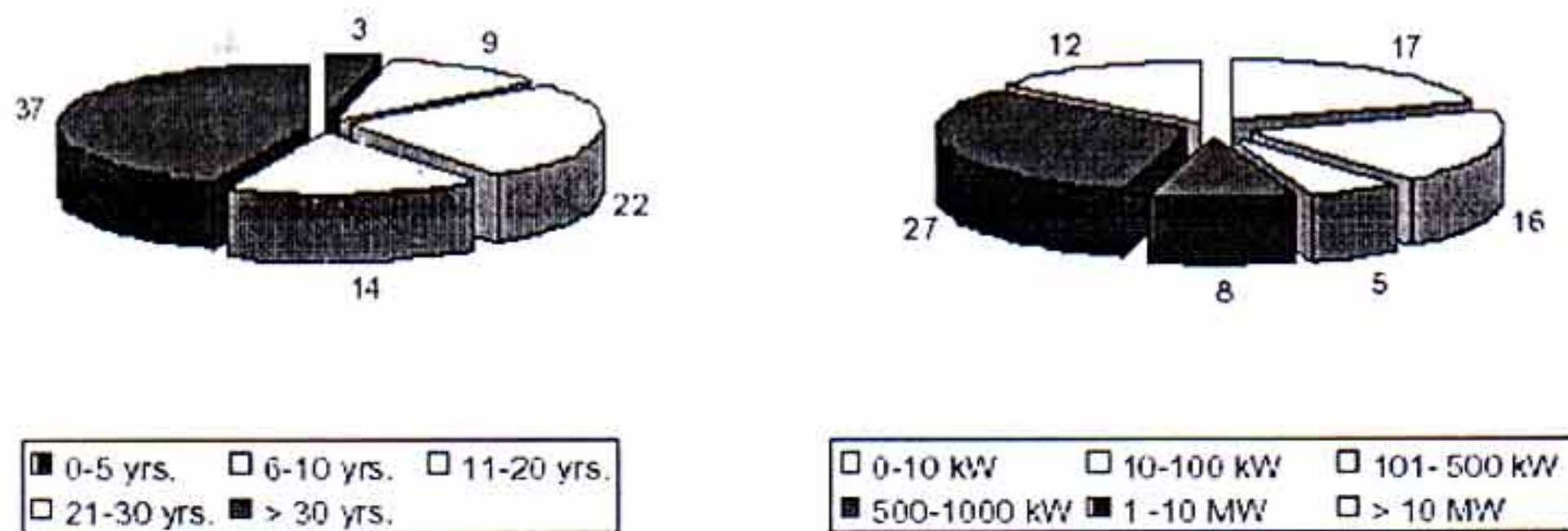
Pola penggunaan reaktor riset telah bergeser dari memberikan informasi penting di bidang fisika nuklir dan mendukung pengembangan reaktor daya pada 3 dekade pertama, sekarang untuk pendidikan, penelitian pengembangan material, dan produksi radioisotop. Karena menurunnya permintaan untuk penelitian nuklir, sejumlah besar riset reaktor yang beroperasi menjadi fasilitas-dengan-biaya untuk produksi radioisotop, radiografi, doping semikonduktor, dan analisis aktivasi neutron untuk berbagai pengguna. Peran reaktor riset untuk pendidikan dan latihan masih bertahan.

Reaktor riset dibuat dengan desain yang berbeda-beda menggunakan berbagai jenis bahan bakar. Sebagian besar reaktor riset yang beroperasi sekarang memiliki daya termal maksimum 100 kW atau kurang. Di negara-negara berkembang 33 dari 85 pada katagori ini, seperti terlihat pada Gambar 7. Pada gambar tersebut juga ditunjukkan distribusi usia reaktor riset di negara-negara berkembang. Reaktor kecil tidak sering memerlukan penggantian bahan bakar, sehingga masalah bahan bakar bekas tidak begitu penting. Untuk mengurangi, dan akhirnya mengakhiri, perdagangan uranium dengan pengayaan tinggi untuk reaktor riset, AS telah menyelenggarakan Reduced Enrichment for Research and Test Reactors Programme yang didukung oleh IAEA dan Federasi Rusia.

Isotop terutama diproduksi pada reaktor dengan daya 1 MW atau lebih. Sekarang ada 73 reaktor memproduksi isotop, 6 dengan fluks tinggi ( $> 5 \times 10^{14}$  n/cm<sup>2</sup>/detik). Beberapa reaktor daya juga digunakan (terutama untuk produksi Co-60).



Sekitar 50% reaktor riset untuk produksi isotop mempunyai daya 5-30 MW dan berusia lebih dari 35 tahun, tetapi sekitar 30% sudah di-upgrade/refurbished. Dua reaktor di Australia dan Perancis akan ditutup dan diganti dengan yang baru. Di Kanada, direncanakan pembuatan reaktor riset dengan fluks tinggi ( $3 \times 10^{15}$  n/cm<sup>2</sup>/detik) dengan perkiraan biaya \$466 juta, untuk studi material.



Gambar 7. Distribusi usia dan daya reaktor riset di negara-negara berkembang.

Penggunaan reaktor riset dengan kualitas tinggi akan berlanjut dengan kompetisi di antara peneliti untuk dapat menggunakan *beam line* dengan berkas neutron tertinggi dan sumber neutron dingin. Banyak reaktor dengan kemampuan unjuk kerja menengah juga akan tetap berkembang untuk aplikasi seperti doping semikonduktor, *test loop* untuk simulasi kondisi reaktor daya, produksi isotop, dan analisis aktivasi neutron. Banyak reaktor riset akan tetap berperan dalam pelatihan untuk pengembangan energi nuklir. Reaktor yang sudah tua dan tidak banyak dimanfaatkan mungkin harus didekomisioning meskipun memerlukan biaya yang besar (sekitar \$1-2 juta untuk reaktor jenis TRIGA 1 MW). Saat ini 9 reaktor riset baru



sedang dibangun dan 8 lagi sedang direncanakan, termasuk reaktor serbaguna di Australia dan FRM II di Jerman untuk penelitian berkas neutron. Reaktor Maple di Kanada akan digunakan terutama untuk produksi isotop secara komersial, khususnya Mo-99.

## KESIMPULAN

Untuk tenaga nuklir, inovasi yang berkelanjutan akan merupakan faktor kunci dalam mendekati perbedaan proyeksi (*projection gap*) antara skenario jangka panjang energi dunia dengan perkembangan tenaga nuklir secara nyata, dan skenario jangka-pendek dengan sedikit perkembangan atau bahkan penurunan. Hal yang pertama mengandaikan bahwa teknologi nuklir, seperti halnya teknologi yang lain, tidak statik. Keduanya berkembang secara evolusi maupun inovasi, tetapi inovasi teknologi kurang berperan untuk skenario jangka pendek. Perkembangan yang diandaikan pada skenario jangka panjang konsisten dengan kecenderungan sejarah, tetapi tidak akan terjadi dengan sendirinya. Untuk ini diperlukan kehendak dan tindakan untuk memelihara dan mengembangkan “budaya inovasi” dalam industri nuklir dan masyarakat yang mengaturnya. Ini semua merupakan hal yang penting untuk dilakukan untuk pemberdayaan reaktor nuklir pada abad ke-21.

## DAFTAR PUSTAKA

1. "Nuclear Technology Review 2002," IAEA General Conference Document GC(46)/INF/5, 16 July 2002.
2. LAKE, J.A., BENNET, R.G., dan KOTEK, J.F., "Next-Generation Nuclear Power," *Scientific American*, January 2002, 70-79.
3. PRAMUDITA, A., dan SYARIF, "Penguat Tenaga (*Energy Amplifier*) Sebagai Alternatif Sumber Tenaga Nuklir dengan Tingkat Keselamatan Tinggi, Ekonomis, dan Dampak Lingkungan Minimal," Proceedings of XVI National Symposium on