

**Pengembangan Sistem Pembuangan Decay Heat  
Untuk PLTN Generasi Mendatang - Potensi dan Kendalanya**

Priyanto Mudo Joyosukarto \*  
Rr. Arum Puni Rijanti \*\*

**Abstrak**

Sistem keselamatan PLTN sangat diperlukan agar peristiwa kecelakaan seperti yang dialami oleh PLTN TMI-2 (Three Mills Island 2) tahun 1979 dapat dihindarkan. Pembuangan *decay heat*, merupakan salah satu aspek penting dalam keselamatan PLTN. *Decay heat* adalah proses peluruhan panas yang dihasilkan dari pelepasan energi radiasi dengan cara membuang *decay heat* dari reaktor nuklir ke atmosfer yang bertindak sebagai *ultimate heat sink*. Sistem DHR (Decay heat Removal) yang bertumpu pada mekanisme kerja pasif, yang selain diharapkan dapat menyederhanakan konfigurasi dan mekanisme kerja, sekaligus juga meningkatkan keandalan sistem keselamatan. Sistem DHR yang terpasang ini dapat digunakan untuk PLTN generasi sekarang maupun PLTN generasi maju. Sistem DHR pada PLTN generasi sekarang biasanya merupakan bagian dari sistem pendingin teras darurat (*Emergency Core Cooling system*, ECCS) untuk level tekanan rendah (sekitar 28 atm. Setpoint). Udara berguna untuk membuang *sensible heat* dari dinding baja bejana reaktor ke atmosfer dan berfungsi sebagai pendingin karena memiliki keunggulan yaitu availabilitas dan mobilitas yang tinggi, yang dapat bergerak secara pasif karena beda tekanan. Aplikasi sistem berpendingin udara untuk sistem DHR ini masih relatif baru sehingga masih perlu dilakukan riset dan pengembangan lebih lanjut untuk memahami karakteristik dasar sistem sehingga diperoleh kepastian mengenai keandalan untuk aplikasi pada PLTN generasi mendatang.

**Abstract**

Nuclear power plant safety system is necessary such that an accident occurred at Three Mile Island 2 in 1979 can be avoided. Decay heat removal is one of the important aspects in nuclear power plant safety. Decay heat is the removal of the radiation energy emitted by removing the decay heat from the nuclear reactor to the atmosphere which acts as an ultimate heat sink. Decay Heat Removal System (DHRS) relies on passive working mechanism, which applied not only to simplify configuration and work mechanism, but also to increase the performance of the safety system. DHRS can be applied to the current or the advanced generation of nuclear power plants. The current DHRS design frequently act as a part of Emergency Core Cooling System for low pressure level (approximately 28 atm. Setpoint). Air is used to remove the *sensible heat* from the steel reactor vessel to the atmosphere and it functions as coolant because of its high availability and mobility, which can passively moved by pressure difference. Air cooling system application for DHRS is relatively new, therefore research and development to understand the basic characteristic of the system should be performed to obtain the confidence on the performance which can be applied to the future generation of nuclear power plant.

---

\* Staf Bidang Pengkajian Program Industri Nuklir  
\*\* Staf Bidang Pengkajian Program Industri Nuklir

## I. Latar belakang

Ada dua penyebab utama kecelakaan pada PLTN TMI-2 tahun 1979, yaitu **kesalahan operator (*human error*)** dan **kegagalan komponen.**<sup>1)</sup> Pada kecelakaan yang dapat dikategorikan sebagai *station blackout* dan kehilangan pendingin (*Loss of Coolant Accident, LOCA*) ini, sistem keselamatan bekerja dengan baik menyemburkan air pendingin ke dalam teras mengikuti *trip* reaktor. Akan tetapi, operator salah menginterpretasikan informasi kontradiktif mengenai turunnya tekanan dan naiknya level air di dalam *pressurizer*. Suatu kondisi yang sekilas bertentangan dengan teori dasar sifat air. Tanpa mengindahkan kenyataan bahwa saat itu *pressurizer relief valve* dalam keadaan *stuck-open*, operator mematikan kerja sistem pendingin teras darurat (*Emergency Core Cooling System, ECCS*) sehingga level air di dalam bejana reaktor terus menurun. Sampai pada tahap ini sebenarnya tidak ada yang perlu dikhawatirkan. Akan tetapi, kondisi ini terus diperburuk oleh gagalnya *depressurizer* menurunkan tekanan sistem primer menjadi 28 atmosfer, yaitu *setpoint* bekerjanya *Decay Heat Removal System (Sistem DHR)*, yang tak lain adalah bagian ECCS untuk level tekanan rendah, yang sekaligus merupakan benteng pertahanan terakhir untuk mencegah melelehnya teras reaktor. Sebagai akibatnya, seluruh air pendingin menguap habis, teras reaktor meleleh dan produksi listrik TMI-2 berhenti selamanya.

Kegagalan Sistem DHR yang bertumpu pada sistem dan mekanisme aktif ini sempat menjadi isu utama keselamatan PLTN pasca kecelakaan TMI-2 sehingga timbul suara-suara sumbang dari masyarakat, terutama kalangan Akademisi, yang menyangsikan keandalan sistem keselamatan PLTN. Selain dibenahinya manajemen industri nuklir, mereka menuntut ditingkatkannya keandalan sistem keselamatan PLTN.

Menanggapi berbagai keinginan yang berkembang di tengah masyarakat tersebut, pada 1 Mei 1986, US NRC mengeluarkan sebuah Pernyataan Kebijakan yang disebut sebagai "**Regulation on Advanced Nuclear Power Plants; Statement of Policy**", yang salah satu isinya merekomendasikan pentingnya peningkatan margin keselamatan PLTN dengan mendayagunakan karakteristik *inherent*, pasif maupun karakteristik inovatif yang lain.<sup>2)</sup> Pihak Industri Nuklir menginterpretasikan rekomendasi NRC ini sebagai mandat untuk mendayagunakan tenaga dasar alam seperti gravitasi, konveksi, penguapan, pengembunan, maupun tenaga tersimpan (*stored energy*) sebagai tenaga penggerak (*motive power*) sistem keselamatan Reaktor

Generasi Maju (**Advanced Reactor**) dalam rangka meningkatkan keandalan sistem, sekaligus mengurangi kemungkinan terjadinya *human error*.

Dalam implementasinya, pendayagunaan karakteristik pasif ini mempunyai dua **area aplikasi**, yaitu untuk memberikan kemampuan stabilisasi proses fisi nuklir dan kemampuan *shutdown* secara pasif, serta untuk menjamin kelancaran pembuangan *decay heat* dari teras reaktor menuju ke **ultimate heat sink** (pembenam-panas purna, P3).<sup>3)</sup> Tujuan pertama terkait dengan aspek neutronik, sedangkan yang ke dua terkait dengan aspek perpindahan panas di dalam reaktor. Dari sudut pandang perpindahan panas ini, keselamatan reaktor akan terjamin bila dipenuhi tiga kondisi, yaitu **tersedia pendingin yang cukup di dalam sistem primer, tersedia heat sink, dan tersedia mekanisme yang cukup mumpuni (adequate) untuk membuang decay heat dari teras ke heat sink**. Pada kondisi pasca *shutdown*, sistem keselamatan reaktor harus melakukan dua macam fungsi, yang pertama adalah membuang *decay heat* keluar reaktor, dan yang ke dua adalah mencatu pendingin bilamana terjadi kebocoran. Bila fungsi ke dua ini gagal maka keutuhan reaktor masih bisa diselamatkan oleh fungsi pertama sebagai pertahanan terakhir. Disinilah pentingnya keandalan dan availabilitas yang tinggi dari Sistem DHR.

Tulisan berikut akan membahas tentang status dan kecenderungan pengembangan Sistem DHR pada Reaktor Generasi Maju yang diproyeksikan untuk beroperasi pada dekade mendatang. Pembahasan diawali dengan penjelasan sekilas tentang pengertian *decay heat* dan sistem pembuangannya pada reaktor nuklir generasi sekarang. Selanjutnya dibahas tentang beberapa konsep desain Sistem DHR yang saat ini tengah dikembangkan, dan diakhiri dengan pembahasan tentang konsep rekayasa Sistem DHR dengan fluida kerja udara yang saat ini tengah menjadi mode yang meluas.

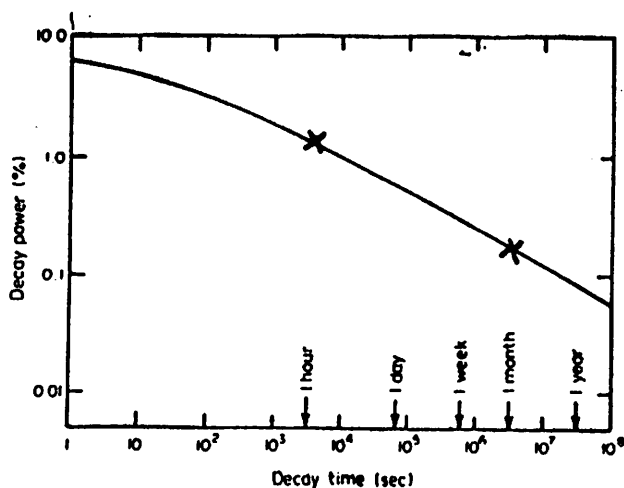
## **II. Pengertian Decay Heat**

Di dalam teras reaktor daya (PLTN) terdapat bahan bakar Uranium yang setiap fisinya menghasilkan energi sekitar 200 Mev. Jumlah fisi per satuan waktu tergantung daya terpasang PLTN. Sebagai contoh, untuk menghasilkan energi sebesar 1 Watt-panas diperlukan sebanyak  $3,2 \times 10^{10}$  fisi per detik. Sekitar 7% energi fisi ini keluar dalam bentuk radiasi atom-atom hasil fisi. Meskipun operasi reaktor telah berhenti, pelepasan energi radiasi dalam bentuk panas masih terus berlangsung melalui proses peluruhan (**decay**) atom-atom hasil fisi, dan proses ini tidak bisa dihentikan dengan cara apapun. Yang bisa dilakukan adalah membuang panas yang dihasilkannya ke **ultimate heat**

*sink*, panas ini disebut sebagai *decay heat*. Beberapa literatur menyebut *decay heat* ini sebagai *after-heat* maupun *residual heat*. Tetapi menurut hemat Penulis, pengertian residual heat ini lebih luas, yang bisa mencakup *decay heat*, panas tersimpan di dalam struktur teras (*stored heat*), dan panas hasil reaksi Zirkonium dengan air pada saat teras kekurangan pendingin. Jadi tergantung kondisi pasca *shutdown*, pengertian *residual heat* bisa berbeda, tetapi tidak demikian halnya dengan *decay heat*.

Untuk reaktor berbahan bakar Uranium yang telah menjalani operasi daya penuh selama waktu  $T$  detik, besarnya *decay heat* ( $P_d$ ) yang dihasilkan  $t$  detik setelah *shutdown* (*decay time* / *cooling time*) dinyatakan dengan persamaan (1) berikut :<sup>1)</sup>

$$P_d ( t + T ) = 0.622 P_o \{ t^{-0.2} - (T + t)^{-0.2} \} \dots\dots\dots (1)$$



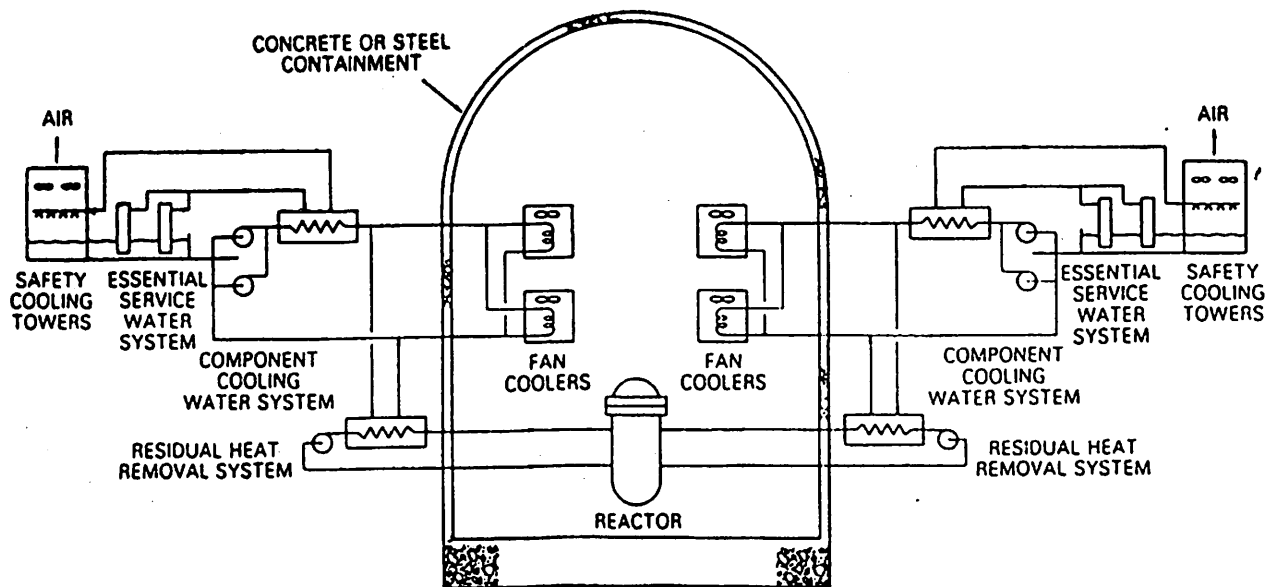
Gambar 1. Produksi *decay heat* sebagai fungsi waktu pada reaktor berbahan bakar Uranium <sup>1)</sup>

Persamaan (1) menunjukkan bahwa produksi *decay heat* berbanding langsung dengan tingkat daya reaktor dan lamanya waktu beroperasi pada daya penuh, tetapi berbanding terbalik terhadap selang waktu pasca *shutdown*. Gambar 1 menunjukkan bentuk kualitatif produksi *decay heat* sebagai fungsi waktu setelah *shutdown*. Terlihat jelas bahwa satu jam pasca *shutdown* di dalam teras reaktor masih tersimpan panas sebesar sekitar 1% daya awal. Persentase ini relatif kecil akan tetapi secara nominal dapat bernilai besar sekali. Pada kasus TMI-2 misalnya, dengan daya awal sekitar 2900 MWt dan waktu operasi daya penuh sekitar 3 bulan maka pada saat seluruh pendingin

diperkirakan menguap habis (104 menit setelah *shutdown*) masih tersimpan *decay heat* di dalam teras reaktor sebesar 64 MWt. Angka ini belum memperhitungkan panas hasil reaksi Zirkonium dengan air pendingin. Jadi dapat dibayangkan betapa hebatnya teras reaktor terpanggang saat itu.

### III. Sistem Pembuangan *Decay Heat* (DHR) pada PLTN generasi sekarang.

Sistem DHR pada PLTN generasi sekarang, biasanya merupakan bagian dari Sistem Pendingin Teras Darurat (ECCS) untuk level tekanan rendah (sekitar 28 atm. *setpoint*). Sistem yang pelaksanaan kerjanya mengharuskan pengaliran air pendingin ke dalam teras reaktor ini biasanya terdiri beberapa loop pertukaran panas, yang tersusun dari sejumlah besar komponen seperti *Heat Exchanger* (HE), pompa, perpipaan, katup dan sistem catu daya<sup>4)</sup>. Gambar 2 menunjukkan contoh bagan sistem DHR ini untuk PLTN PWR. Sistem sejenis ini juga digunakan pada PLTN



Gambar 2. Skema sistem pembuangan *decay heat* (sistem DHR) pada PLTN PWR generasi sekarang<sup>4)</sup>

TMI-2. Dari segi mekanisme kerja, sistem ini juga cukup representatif untuk jenis PLTN yang lain.

Pada sistem konvensional ini, proses inisiasi dilakukan secara aktif dengan menurunkan tekanan sistem primer (*depressurizing*) sampai pada *setpoint*. *Decay heat* dipindahkan keluar teras dalam bentuk *sensible heat* yang tersimpan di dalam air panas. Secara berurutan, pendingin dipompa menuju

teras untuk mengambil *decay heat*, keluar teras dalam keadaan panas menuju serangkaian pipa-pipa HE untuk memindahkan *sensible heat* ke pendingin yang mengalir di dalam HE. Pada akhirnya, *sensible heat* ini dibuang ke atmosfer dengan mengabutkan air panas ini di dalam menara pendingin ataupun di atas kolam pendingin. Pada sistem seperti ini, atmosfer bertindak sebagai *ultimate heat sink*. Proses inisiasi dan mekanisme kerja Sistem DHR konvensional ini terlampaui kompleks dan sangat rentan terhadap kegagalan komponen dan kesalahan operator, sebagaimana terbukti pada kecelakaan TMI-2 tahun 1979.

#### IV. Sistem DHR pada PLTN Generasi Maju.

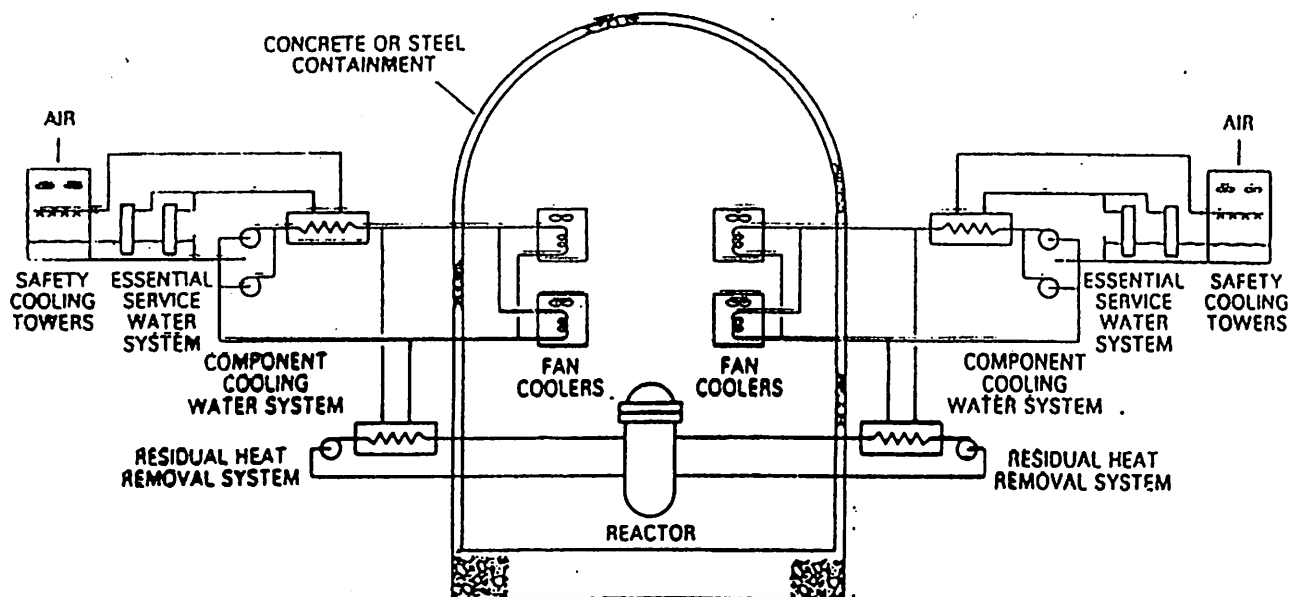
Sebagai tanggapan terhadap Pernyataan Kebijakan US NRC 1986, beberapa pabrik PLTN telah mengembangkan PLTN Generasi Maju untuk dioperasikan pada awal tahun 2000-an. Salah satu yang menonjol dari desain ini adalah Sistem DHR baru yang bertumpu pada mekanisme kerja pasif, yang selain diharapkan dapat menyederhanakan konfigurasi dan mekanisme kerja, sekaligus juga meningkatkan keandalan sistem keselamatan. Beberapa desain PLTN yang mengaplikasikan konsep pasif ini antara lain, untuk ALMR (*Advanced Liquid Metal Reactor*) terdapat desain PRISM (*Passive Inherently Safe Module*) 138 MWe, SAFR (*Sodium Advanced Fast Reactor*) 350 MWe. Untuk ALWR (*Advanced Light Water Reactor*) terdapat AP600, ASPWR (*Advanced Simplified Pressurized Water Reactor*) 600 MWe dan SBWR (*Simplified Boiling Water Reactor*) 600 MWe. Untuk HTR (*High Temperature Reactor*) terdapat MHTGR 450 MWt.

Menurut hemat penulis, pada konsep desain sistem DHR baru ini, perlu dibedakan tiga pengertian untuk memudahkan pembahasan. Pertama, sistem DHR Primer, yaitu sistem DHR yang dirancang untuk operasi normal, yang tentu saja masih membutuhkan tenaga listrik dan perintah operator. Kedua, sistem DHR Sekunder, yaitu sistem DHR yang berfungsi memindahkan *decay heat* dari teras reaktor ke *containment*. Ketiga adalah sistem DHR Purna (final) yang berfungsi membuang *sensible heat* dari *containment* ke *ultimate heat sink*. Tergantung pabriknya, nama sistem DHR mungkin berbeda untuk setiap jenis PLTN. Sesuai dengan topik bahasan, maka hanya sistem DHR Sekunder dan sistem DHR Purna saja yang akan dibahas, dengan asumsi kondisi darurat pasca *shutdown* dan semua sistem listrik mati.

## V. Sistem DHR Sekunder

Beberapa konsep tengah dikembangkan untuk sistem ini, salah satu diantaranya adalah membuang *decay heat* dalam bentuk *latent heat* melalui proses penguapan air dan pengembunan uap suhu tinggi. Konsep ini diterapkan pada SBWR, PIUS (PWR) dan AP600. Pada SBWR, *decay heat* dalam bentuk *latent heat* uap air dipindahkan keluar teras reaktor menuju bundel-bundel *Isolation Condenser* (IC) yang benamkan di dalam kolam atmosferis di luar *containment*. Uap mengembun di dalam IC dan air kondensat secara pasif mengalir dengan tenaga gravitasi kembali turun ke bejana reaktor. Pada akhirnya *latent heat* ini dibuang ke atmosfer melalui pendidihan air kolam IC. Proses ini telah diterapkan pada BWR generasi sekarang untuk mengontrol tekanan sistem primer pada saat *isolation events*. Yang baru dari desain SBWR adalah dimafrkannya teknologi IC teruji ini untuk pembuangan *decay heat* jangka panjang dengan mengalirkan uap panas yang terlepas di dalam ruangan *containment* menuju ke IC untuk dipengembunankan dan mensirkulasikan kondensat yang terjadi ke teras reaktor.<sup>5)</sup> Proses di atas sepenuhnya pasif dan dikendalikan oleh beda berat jenis karena beda suhu (*thermosyphon effect*) akibat pemanasan oleh *decay heat* di dalam teras. Pada desain PIUS, proses pembuangan *decay heat* mirip dengan di atas. *Decay heat* dalam bentuk *latent heat* yang terkandung di dalam uap panas dialirkan keluar reaktor melalui katup pengaman menuju kolam atmosferis. Selanjutnya melalui pengembunan uap, *latent heat* ini digunakan untuk memanaskan air kolam sehingga mendidih. Jadi pada desain SBWR dan PIUS ini Sistem DHR Sekunder sekaligus bertindak sebagai sistem DHR Purna.

Proses penguapan air dan pengembunan uap suhu tinggi juga digunakan sebagai mode pembuangan *decay heat* pada AP600 seperti ditunjukkan pada gambar 3.4) Disini digunakan sebuah tangki besar (*In-containment Refueling Water Storage Tank*, IRWST) yang dipasang pada ketinggian di atas bejana reaktor sedemikian rupa sehingga selisih *head* antara dua ketinggian ini mampu berfungsi sebagai tenaga penggerak aliran air secara pasif. Bekerjanya proses ini diinisiasi oleh turunnya level/tekanan air bejana reaktor di bawah *setpoint*. Setelah menyerap panas, air pendingin bergerak ke atas secara konveksi alami menuju kedua buah *Passive Residual Heat Removal Heat Exchanger* (PRHR HX) yang benamkan di dalam IRWST, memindahkan panas ke air pembenam yang berfungsi sebagai *heat sink*, menjadi dingin dan akhirnya secara pasif bersirkulasi menuju bejana reaktor untuk melanjutkan proses pembuangan *decay heat*. Pemindahan panas secara kontinyu



Gambar 3. Konsep Sistem DHR Sekunder dan Sistem DHR Purna pada AP600 <sup>4)</sup>

menyebabkan air di dalam IRWST menguap. Uap ini bergerak ke atas dan memenuhi ruangan bagian atas di dalam bejana baja *containment*, sebelum akhirnya mengembun dan memindahkan panasnya secara konduksi ke dinding dalam *containment*, berubah menjadi air kondensat dan kembali jatuh ke bawah menuju IRWST. *Sensible heat* pada dinding *containment* ini akhirnya dikonduksikan ke arah luar. Proses selanjutnya dilakukan oleh sistem DHR Purna. Cadangan air di dalam IRWST ini cukup untuk 10 jam pasca *shutdown*. Bila masih diperlukan, operator masih harus mengisinya lagi.

Penguapan dan pengembunan memang merupakan mode perpindahan panas yang sangat efektif, akan tetapi untuk kedua proses ini masih diperlukan tersedianya air yang cukup untuk menggenangi teras, sebuah tugas yang kompleks untuk dilaksanakan pada kondisi kecelakaan. Disamping itu, pada operasi normalpun, penyediaan air siap pakai di dalam *containment* juga mensyaratkan konfigurasi sistem yang kompleks.

Kendala teknis tersebut disadari sepenuhnya oleh para insinyur di General Atomic Technology yang saat ini tengah mengembangkan Sistem DHR Sekunder dengan konsep desain yang sama sekali berbeda untuk MHTGR 450 MWt. Pada konsep ini, *decay heat* dipindahkan keluar teras reaktor dengan cara yang sepenuhnya pasif dengan memanfaatkan secara serentak ketiga mode perpindahan panas, yaitu konduksi, konveksi dan radiasi. Struktur teras reaktor yang sekaligus berfungsi sebagai media pemindah panas, bahan bakar

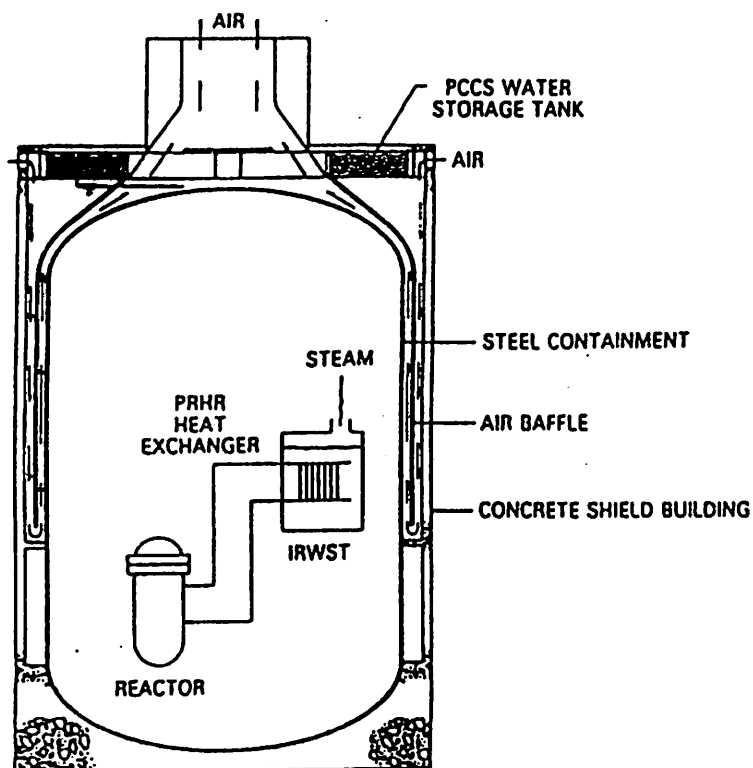


TRISO tahan suhu tinggi (1600°C), pendingin Helium inert, moderator grafit dengan kapasitas dan konduktivitas panas tinggi, bejana-baja reaktor tak-terisolasi sebagai media kerja pemindah panas, merupakan penunjang keunggulan desain sistem DHR ini. Dengan konfigurasi ini, maka kemampuan pembuangan *decay heat* menjadi *built-in* di dalam sistem. 6)

## VI. Sistem DHR Purna

Untuk sistem DHR Purna ini, terdapat kecenderungan yang meluas untuk memanfaatkan udara sebagai fluida kerja pembuangan *decay heat*, sekaligus memanfaatkan atmosfer bumi yang berkapasitas panas hampir tak-terbatas, sebagai *ultimate heat sink*. Perlu diketahui bahwa, pada sistem konvensional telah dimanfaatkan atmosfer bumi sebagai *ultimate heat sink*, akan tetapi pada sistem ini digunakan air sebagai fluida kerja.

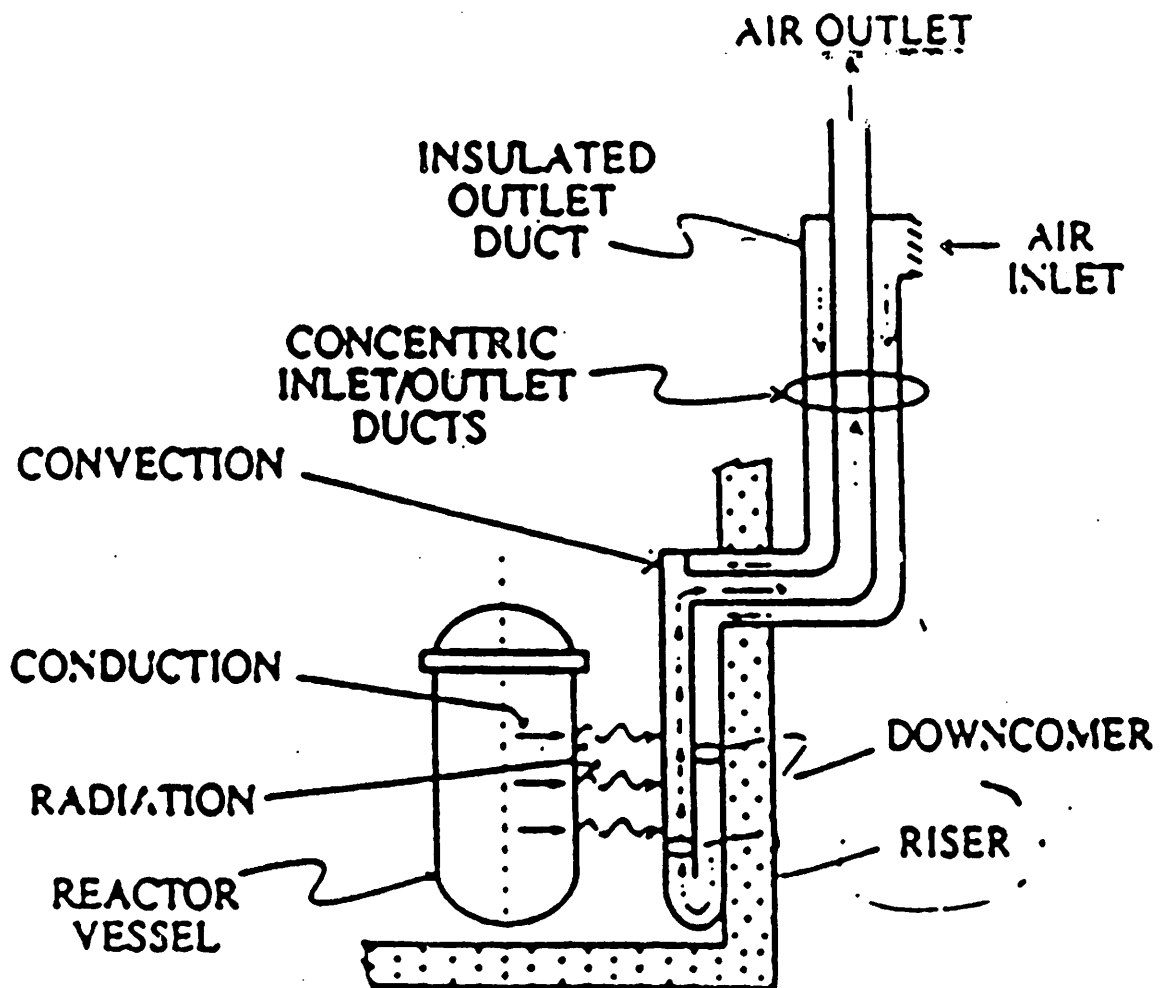
Secara prinsip konsep desain berbagai sistem DHR Purna pada umumnya sama, yaitu mendayagunakan konveksi alami udara untuk membuang *sensible heat* dari permukaan luar bejana baja reaktor dan atau *containment* menuju ke udara bebas. Desain reaktor generasi maju yang menerapkan konsep ini antara lain AP600, ASPWR, MHTGR, PRISM dan SAFR.



Gambar 4. Sistem DHR Purna pada PLTN AP600 yang disebut sebagai *Passive Containment Cooling System*.<sup>4)</sup>

Gambar 4 menunjukkan Sistem DHR Purna untuk AP600 yang disebut sebagai *Passive Containment Cooling System (PCCS)*. Sistem yang terdiri dari bejana baja *containment*, tangki air, dan *baffle* pengarah aliran ini hanya bekerja pada kondisi darurat untuk membuang *sensible heat* dari dinding baja *containment* ke aliran udara secara konveksi alami yang dibantu dengan penguapan lapisan air (*water film*) yang diguyurkan dari bagian atas *containment*.<sup>4)</sup>

Berbeda dengan AP600, Sistem DHR Purna MHTGR yang disebut sebagai *Reactor Cavity Cooling System (RCCS)*, justru tidak memanfaatkan air karena masih diyakini adanya ketidakpastian kemampuan perpindahan panas dalam kaitan dengan watak aliran dua-fase akibat penguapan lapisan air.<sup>7)</sup> Seperti ditunjukkan pada gambar 5, disini sepenuhnya digunakan udara untuk membuang *sensible heat* dari dinding baja bejana reaktor ke atmosfer. Sistem yang sepenuhnya pasif dalam menanggapi setiap tingkat kenaikan suhu dinding



Gambar 5. Sistem DHR Purna MHTGR berfluida kerja udara yang disebut sebagai *Reactor Cavity Cooling System (RCCS)*.<sup>7)</sup>

bejana reaktor ini terdiri dari dinding baja bejana reaktor beremisivitas panas tinggi, jajaran panel pendingin (*riser*) terbuat dari baja karbon yang melingkupi bejana reaktor, *plenum* atas (*hot plenum*), *plenum* bawah (*cold plenum*), *baffle* pengarah aliran, dan saluran masukan (*cold duct*) yang terbungkus saluran keluaran (*hot duct*) yang menjulang setinggi 22 m di atas tanah. Julangan ini bertindak sebagai *stack* yang dimaksudkan untuk melipatgandakan aliran udara (*Chimney effect*). RCCS ini juga berfungsi mencegah pemanasan berlebih terhadap struktur beton bawah tanah yang melingkupi bangunan reaktor. Mekanisme kerja RCCS adalah sebagai berikut : *decay heat* yang telah dipindahkan dari teras dengan cara konveksi, konduksi, dan radiasi diterima dinding bejana reaktor sebagai *sensible heat*, yang selanjutnya diradiasikan radial ke arah jajaran tabung-tabung *riser* yang melingkupi dinding bejana dan yang sekaligus bertindak sebagai *radiation cavities* dengan kemampuan memperangkap radiasi panas setara benda hitam. Di dalam *riser*, *sensible heat* ini dikonveksikan ke aliran sirkulasi udara yang masuk ke *riser* melalui bagian bawah *reactor cavity*. Udara mencapai bagian bawah *cavity* melalui *downcomer* yang terbentuk oleh dinding *cavity* dengan dinding beton bawah tanah. Sirkulasi udara ini berjalan kontinyu dan pasif selama suhu dinding bejana reaktor melebihi suhu lingkungan. Operasi kontinyu RCCS ini mengakibatkan *parasitic heat loss* sebesar 1,1 MWt (0,24%) untuk desain MHTGR 450 MWt.

## **VII. Konsep Rekayasa Sistem DHR Dengan Konveksi Alami Udara**

Dalam sejarah perkembangan teknologi PLTN, aplikasi sistem pembuangan *decay heat* dengan konveksi alami udara ini masih relatif baru sehingga masih banyak hal belum dipahami sepenuhnya. Kualifikasi keselamatan dan mode operasi kontinyu mensyaratkan perhatian detail terhadap desain sistem ini dalam kaitan dengan segi rekayasa, perpindahan panas maupun aliran udara untuk menghadapi segala kondisi operasi yang mungkin.

### **VII.1. Efektivitas Pendinginan**

Sebagai pendingin, udara memiliki keunggulan terhadap air dalam dua hal, yaitu ketersediaannya dan mobilitasnya yang tinggi, yang dapat bergerak secara pasif karena beda tekanan. Sebaliknya, kemampuan udara dalam memindahkan panas sangat rendah, yang untuk konveksi alami hanya sekitar 5 W/m<sup>2</sup> °C, jauh di bawah kemampuan air yang sebesar 440 W/m<sup>2</sup> °C (pada plat vertikal setinggi 0,25 m dengan suhu udara 25 °C).<sup>8)</sup> Karena koefisien perpindahan panas ini sangat penting dalam desain sistem pendingin maka

harus dilakukan upaya untuk meningkatkannya. Koefisien perpindahan panas ini dipengaruhi oleh suhu udara luar, *mass flow rate*, dan turbulensi aliran. Makin rendah suhu udara luar makin besar kemampuan pemindahan panasnya. *Mass flow rate* yang tinggi juga akan menghasilkan kemampuan pemindahan panas yang tinggi pula. Peningkatan *mass flow rate* bisa dilakukan dengan cara mengoptimalkan lebar lintasan udara (*gap*) atau dengan memperbesar *buoyancy driving force* dengan pemasangan *stack* di bagian atas sistem. Sedangkan untuk membangkitkan turbulensi aliran, bentuk permukaan dinding pemindah panas (*guide wall*) perlu dirancang sedemikian rupa sehingga menimbulkan efek perintang agar menimbulkan turbulensi aliran. Untuk sistem pendingin pada RCCS MHTGR sebagaimana ditampilkan pada gambar 5 maka besarnya *pumping power* dapat diturunkan dari persamaan (2) berikut.<sup>10)</sup>

$$\Delta P = - \frac{2Gr(L/D)^2}{Re^3Pr} + \frac{0.158(L/D)}{Re^{1/4}} \dots\dots\dots(2)$$

Bila sistem ini diperkuat (dipompa) dengan *stack* pada bagian atasnya maka persamaan (2) menjadi:

$$\Delta P = P_{in} - P_{out}$$

$$0 = - \frac{2Gr}{Re^3Pr} \left( \frac{L}{D} \right) \left( \frac{L+2Lc}{D} \right) + \frac{0.158}{Re^{1/4}} \left( \frac{L+Lc+Lu}{D} \right) \dots\dots(3)$$

dimana:

- $\Delta P$  = pumping power
- $P_{in}$  = tekanan udara masuk sistem pendingin
- $P_{out}$  = tekanan udara keluar *stack*
- $Gr$  = angka Grashof
- $Re$  = angka Reynold
- $Pr$  = angka Prandtl
- $L$  = panjang bagian riser (yang terpanasi)
- $Lc$  = panjang total *stack*
- $Lu$  = panjang bagian *stack* yang tak terpanasi (*unheated*)
- $D$  = diameter *stack*

## VII.2. Kualitas Sistem

Dari Seri kualitas sistem, untuk sistem dengan kualitas keselamatan (*safety-grade*), maka desain sistem ini harus dilengkapi dengan *redundancy* bagian masukan dan keluaran, serta dilengkapi dengan *plenum* atas dan *plenum* bawah untuk mencegah terjadinya *blockage* aliran. Karena bagian masukan sistem (*inlet port*) ini berhubungan langsung dengan lingkungan luar, maka kemungkinan terjadinya *blockage* karena faktor luar seperti debu, misil,

kawanan serangga dan lapisan es sangat besar sehingga harus diperhitungkan di dalam desain. *Blockage* semacam ini bisa mengurangi atau bahkan meniadakan pasokan udara yang pada akhirnya mengurangi kemampuan pendinginan sistem. Kondisi ini dapat diperhitungkan sebagai *Loss of Fluid Flow Accident (LOFA)* dan harus diperhitungkan sebagai *Design Basis Accident (DBA)* untuk sistem ini seperti halnya LOCA pada LWR. Kaitan antara tingkat *blockage* dengan menurunnya *mass flow rate* pada sistem konveksi alami udara dijabarkan pada putaka 9.

### **VII.3. Temuan Fenomena Baru**

Dalam kaitan dengan kecelakaan kekurangan pendingin (*blockage*) ini, Penulis telah melakukan eksperimen dengan menggunakan model RCCS sederhana yang terdiri dari bagian masukan, plenum bawah, bagian penghasil panas, bagian *plenum* atas, dan dilengkapi dengan satu, dua, atau empat buah *stack* pada bagian atasnya.<sup>9)</sup> Eksperimen yang dilakukan pada tahun 1994 ini merupakan proyek kerja sama antara Japan Atomic Power Company (JAPCO) dengan Tokai University dalam bidang keselamatan PLTN maju. Pada eksperimen ini telah diketemukan beberapa fenomena baru yang berkaitan dengan watak khusus pendingin udara. Dibanding dengan pendingin air, udara memiliki karakteristik unggul dalam menghadapi *Loss of Fluid Flow*, sebab bilamana jumlah *mass flow rate* masuk ke sistem berkurang karena *blockage* maka *buoyancy driving force* di dalam sistem akan meningkat, *pumping power* pada bagian masukan meningkat, yang pada akhirnya akan meningkatkan jumlah udara yang terhisap masuk ke dalam sistem (*self-compensating effect*). Bila *blockage* terjadi sedemikian parahnya (melebihi 95% penampang masukan) maka *mass flow rate* akan turun sampai pada harga kritis yang disebut sebagai *Joyosukarto Number*. Karena pada saat bersamaan *buoyancy force* di dalam sistem meningkat tajam maka pada titik tertentu di dalam sistem akan timbul ketidak-kontinyuan *mass flow rate*, yang pada akhirnya menimbulkan *tekanan minimum*. Sesuai watak udara, tekanan minimum ini akan memicu aliran masuk udara luar (melalui salah satu *stack* pada bagian atas sistem) yang lebih dingin menuju titik tersebut agar terpenuhi hukum kekekalan *mass flow rate*.

Masuknya udara luar yang relatif dingin ini sudah tentu akan meningkatkan kemampuan pendinginan (*coolability*) sistem pada kondisi tersebut. Fenomena yang disebut sebagai *Abnormal/Reversal Flow Phenomenon* ini terjadi secara pasif dan merupakan upaya regulasi-diri yang

timbul dari karakteristik *pressure-driven flow* yang secara *inherent* ada pada udara. Fenomena ini diyakini akan terjadi pula pada sistem yang sesungguhnya (RCCS, RVACS, RACS atau sistem sejenis yang lain) bilamana dipenuhi kondisi yang sama, yaitu terjadi *blockage* yang parah pada bagian masukan atau terjadi kesalahan desain lebar gap antara *guide wall* dan *baffle*. Karena terjadinya fenomena di atas dapat meningkatkan kemampuan pendinginan sistem pada saat kemampuan tersebut terdegradasi secara substansial maka hal ini dapat diperhitungkan sebagai aspek **Keselamatan Inherent** pada sistem berpendingin udara. Sebuah teori, yang disebut sebagai *Theory of Mismatching Flow* telah dikembangkan untuk menjelaskan terjadinya fenomena ini.<sup>9)</sup> Teori ini telah di validasi melalui eksperimen. Temuan baru mengenai *Reversal Flow* ini sempat menimbulkan ketertarikan pihak General Atomic Technology untuk melihat secara langsung proses terjadinya dan mempertimbangkan kemungkinan terjadinya pada sistem RCCS MHTGR.

### VIII. Penutup

Teknologi PLTN saat ini masih dalam perjalanan menuju kematangan (*maturity*). Masih banyak perbaikan yang harus dilakukan terhadap sistem keselamatannya. Pembuangan *decay heat*, yang merupakan salah satu aspek penting di dalam keselamatan PLTN akan tetap menjadi isu keselamatan utama untuk reaktor generasi mendatang. Sistem DHR untuk reaktor generasi sekarang, yang masih bertumpu pada sistem dan mekanisme aktif masih perlu untuk disederhanakan, disempurnakan, atau diganti sama sekali dengan sistem baru yang lebih andal.

Pengembangan Sistem DHR untuk PLTN generasi mendatang cenderung mendayagunakan sifat **pasif** dan *inherent*, yang selain dimaksudkan untuk menyederhanakan konfigurasi dan mekanisme kerja juga untuk meningkatkan keandalan sistem sekaligus mengurangi beban kerja operator.

Udara memiliki sifat dan kemampuan yang dipersyaratkan untuk fluida kerja pembuang *decay heat* dari reaktor nuklir ke atmosfer yang bertindak sebagai *ultimate heat sink*. Aplikasi sistem berpendingin udara untuk Sistem DHR ini masih relatif baru sehingga masih perlu dilakukan. Riset dan Pengembangan lebih lanjut untuk memahami karakteristik dasar sistem sehingga diperoleh kepastian mengenai keandalannya untuk aplikasi pada **PLTN generasi mendatang**.

**IX. Daftar Pustaka**

- [1] **PERSHAGEN, B., Light Water Reactor Safety, Pergamon Press, plc, Oxford (1989).**
- [2] **US NRC, Regulation on Advanced Nuclear Power Plant; Statement of Policy, Illinois (1986).**
- [3] **HEJZLAR, P., et al., Passive Decay Heat Removal in Advanced LWR Concepts, Nuclear Engineering and Design, Vol. 139, Amsterdam (1993).**
- [4] **BRUSCHI, H.J., AND VIJUK, R.P., Safety : Evolving Technologies for Tomorrow's Power Reactor, Nuclear Technology, Vol. 91, Illinois (1990).**
- [5] **MCCANDLESS, R.J., AND REDDING, J.R., Simplicity:the key to improve safety, performance and economics, Nuclear Engineering International, London (1989).**
- [6] **BERKOE, J.M., MHTGR Inherent Heat Transfer Capability, IECEC, San Diego (1992).**
- [7] **DILLING, D.A., et al., Passive Decay and Residual Heat Removal in the MHTGR, Work sponsored by the U.S DOE under contract No.DE-AC03-89SF1788 (1990).**
- [8] **OZISIK, M.N., Heat Transfer, A Basic Approach, McGraw-Hill International, New York (1985).**
- [9] **PRIYANTO, Studies on the Abnormal Flow Phenomenon Taking Place on the Stacks-enhanced Natural Air Draft Heat Removal System, Master Thesis at the Department of Nuclear Engineering, Tokai University, Tokyo (1995).**
- [10] **FU, G., et al., Heat Transfer and Friction Factor Behaviour in the Mixed Convection Regime for Air Up-Flow in a Heated Vertical Pipe, AIChE Symposium Series, No. 282, Vol. 87, Illinois (1993).**