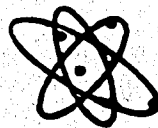


PPGM - R 93 - 76

107700068.

**PERKEMBANGAN TEKNOLOGI PLTN
JENIS PWR, BWR DAN HWR
SISTEM PENDINGINAN DARURAT**

Mursid Djokolelono



**BADAN TENAGA ATOM NASIONAL
PUSAT PENELITIAN TENAGA ATOM GAMA
YOGYAKARTA — INDONESIA**

We regret that some of the pages in the microfiche
copy of this report may not be up to the proper
legibility standards, even though the best possible
copy was used for preparing the master fiche.

Komponen dan perlengkapan reaktor

E 22

PFGM - R 93 - 76

PERKEMBANGAN TEKNOLOGI PLTN
JENIS PWR, BWR DAN HWR
SISTEM PENDINGINAN DARURAT

Mursid Djokolelono

1976

Badan Tenaga Atom Nasional
PUSAT PENELITIAN TENAGA ATOM GAMA
Jl. Babarsari Kotakpos 8, Tilpon 3661
Yogyakarta - Indonesia

A B S T R A K

Sistem Pendinginan Darurat

Dibicarakan Sistem Pendinginan Darurat pada PLTN jenis PWR, BWR dan HWR-CANDU. Pada PWR dan BWR pendinginan dilakukan oleh sistem aktif bertekanan tinggi, sistem aktif bertekanan rendah dan sistem yang pasif sifatnya. PWR memanfaatkan komponen dari sistem pendinginan pada keadaan reaktor padam, sedang BWR memanfaatkan komponen lingkup supresi-tekanan. HWR-CANDU menggunakan sistem pendinginan pada keadaan reaktor padam, seperti PWR, hanya berbeda karena penggunaan air - berat yang mahal dan pemisahan moderator dari pendingin.

A B S T R A C T

Emergency Core Cooling System

Emergency Core Cooling Systems in the PWR, BWR and HWR - CANDU type Nuclear Power Plants are reviewed. In PWR and BWR the emergency cooling can be categorized as active high-pressure, active low pressure and passive ones. The PWR uses components of the shutdown cooling system, as the BWR uses components of the pressure suppression containment. HWR-CANDU uses also the shutdown cooling system similar to the PWR, except some details coming out from moderator-coolant separation and expensive cost of heavy water.

I. PENDAHULUAN

Dari ketiga jenis PLTN yang sudah beroperasi, yang sedang di bangun dan telah dipesan maka urutan terbanyak adalah PWR, BWR dan HWR. Untuk jenis PWR yang paling banyak adalah yang dijual oleh Westinghouse Corp., BWR oleh General Electric Company, sedang HWR oleh Atomic Energy of Canada Ltd.

Satu diantara topik gawat yang dihadapi oleh pembuat reaktor dalam mencari izin konstruksi adalah disain dari sistem pendingin teras pada keadaan darurat (Emergency Core Cooling System, ECCS). Di Amerika ECCS ini telah menjadi tema perdebatan sengit dalam masyarakat nuklir, dari keluarnya Interim Acceptance Criteria oleh Komisi Tenaga Atom Amerika (USAEC) di bulan Juni 1971. Beberapa pihak berpendapat bahwa Criteria ini terlalu lunak dan dilaksanakan tidak cukup ketat oleh USAEC. Suatu "hearing" untuk memperbaiki peraturan ECCS telah dilaksanakan, dimulai bulan Januari 1972 dan diakhiri bulan Juli 1973. Suatu Acceptance Criteria baru telah diterbitkan di bulan Desember 1973 ternyata lebih konservatif dari yang sebelumnya. Namun demikian masih banyak pihak yang belum puas, termasuk Friend of the Earth dan Ralph Nader yang telah mengajukan tuntutan terhadap USAEC untuk menutup 20 PLTN di negeri itu.

Hasilnya perusahaan pembuat reaktor telah melakukan perubahan dalam disain untuk menyesuaikan dengan aturan yang baru. Misalnya Combustion Engineering Corp. telah merubah perangkat bahan bakar 16 x 16 batang menjadi 14 x 14 batang tiap perangkat, dengan daya linier 17 Kwt/ft menjadi 12,5 Kwt/ft. Westinghouse juga dengan perangkat 17 x 17

batang menjadi 15 x 15, dengan menurunkan daya linier maximum dari 16,9 Kwt/ft menjadi 13,0 Kwt/ft. Mengingat pentingnya topik ini, di dalam tulisan berikut akan dibicarakan serba singkat disain terakhir dari ECCS pada PWR, BWR dan HWR khususnya yang ditawarkan oleh pembuat reaktor Westinghouse, General Electric dan Atomic Energy of Canada Ltd.

Westinghouse saat ini menawarkan disain terakhir yang terdiri dari 4 loop atau 2 loop, dengan daya termal masing - masing sekitar 3300, 2500 atau 1700 Mwt, atau daya listrik sekitar 1000 Mwe, 800 Mwe atau 600 Mwe. Reaktor 2 loop maksudnya satu reaktor didinginkan dengan 2 daur sirkulasi pendingin, berarti 1 reaktor memiliki 2 pompa utama dan 2 pembangkit uap. Sedang General Electric menawarkan produk terakhir yang mereka sebut BWR-6 dengan unit-unit daya yang lebih banyak. Unit-unit yang ditawarkan adalah sekitar 3800, 3600, 2800, 2400, 1900 Mwt atau 1300, 1200, 1000, 850, 690 Mwe. Berbeda dengan Westinghouse, daya lebih besar berarti loop bertambah maka untuk BWR General Electric dari semua daya hanya menggunakan 2 loop resirkulasi saja. Sedangkan Atomic Energy of Canada Ltd. menawarkan satu macam saja, yaitu unit daya 600 Mwe sebagai patokan.

Catatan : Naskah disiapkan pada akhir Maret 75.

II. ECCS PADA REAKTOR AIR

Dulu suatu reaktor hanya dilengkapi dengan sistem yang menambah air pendingin bila terjadi kekurangan air akibat kebocoran kecil atau terbuangnya air pada operasi normal. Juga ada sistem pendinginan yang mengurus agar bahan bakar yang meluruh dijaga tetap dingin. Sebelum tahun 1966 ini, suatu kebocoran besar pada pipa primer yang bisa mengakibatkan tidak tersedianya pendinginan ke dalam reaktor (Loss of Coolant Accident, LOCA) tidak dianggap riil untuk dibuatkan disain sistem tambahan pendingin tersendiri. Namun demikian kejadian seperti LOCA ini dijawab dalam disain dari lingkup reaktor (containment). Pada reaktor PWR dan HWR, lingkup ini merupakan suatu gedung besar yang rapat dan kuat dan melingkupi reaktor dan seluruh sistem primer. Pada reaktor BWR, lingkup ini melingkupi reaktor dan sistem moderasi. Disini lingkup harus memiliki integritas tinggi, kecepatan bocor yang rendah, terdapat peralatan penindas tekanan dan pemindahan panas-peluruhan keluar lingkup tersebut. Tetapi kemudian dengan bertambahnya daya unit reaktor, dianggap perlu untuk menyediakan suatu sistem yang tugasnya khusus memberi air pendingin dan menjamin pendinginan teras bila terjadi keadaan darurat (ECCS).

Sejak tahun 1966 disain dari ECCS mulai mendapat perhatian penting dalam hal ini yang dinilai adalah :

- Tingkat kebocoran yang dipostulatkan
- Jumlah dan kecepatan air pendingin yang harus tersedia
- Tindakan lain untuk mencegah kerusakan teras akibat pecahnya pipa/kebocoran.

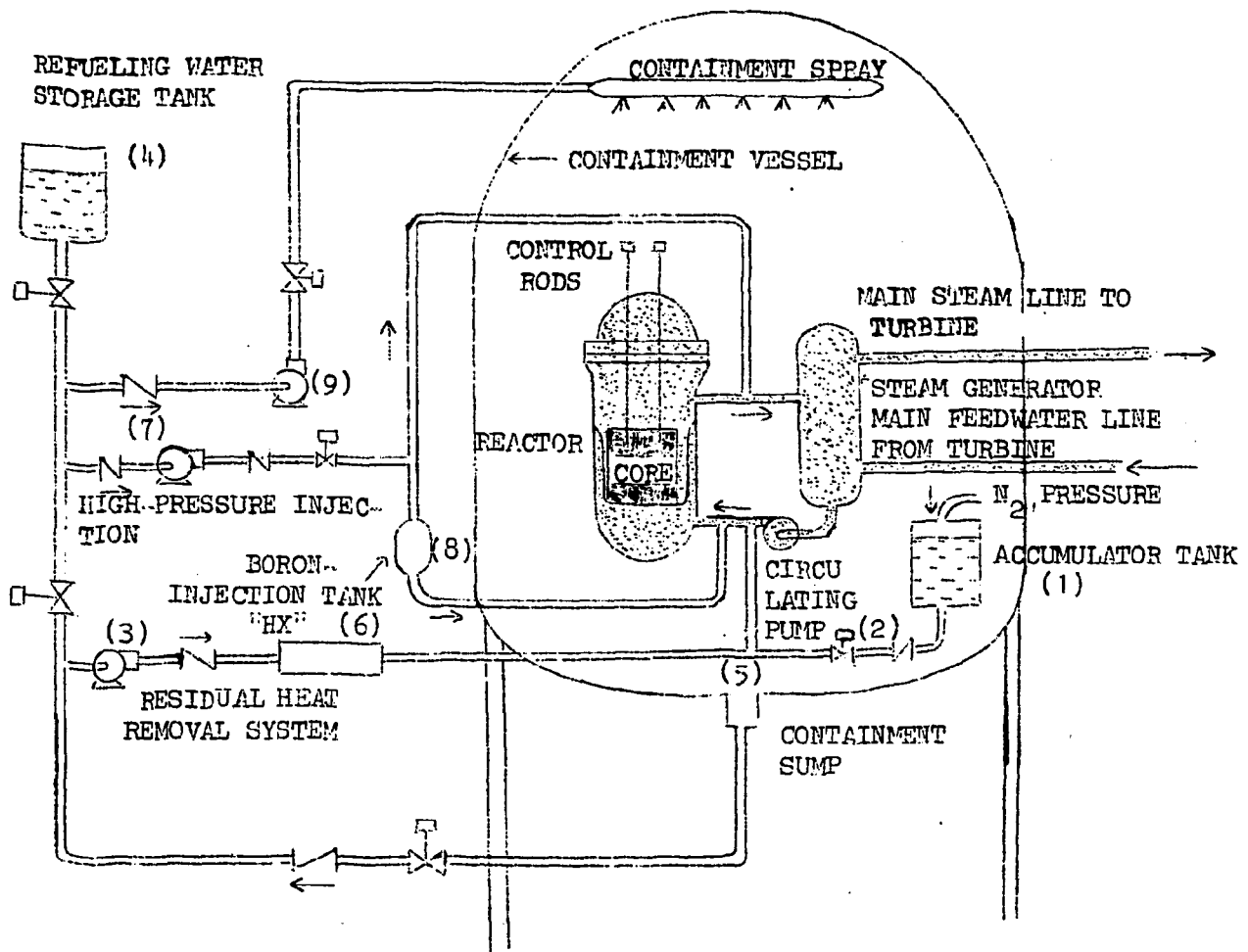
- Sumber tenaga listrik untuk menggerakkan ECCS yang dapat diandalkan
- Komponen dan instrumentasi ECCS yang cukup dan dapat diandalkan untuk melakukan pendingin darurat pada waktunya.

Untuk bisa seragam dalam penilaian, maka oleh USAEC beberapa kriteria telah didefinisikan, misalnya bahwa suhu kelongsong tidak boleh lebih dari 1205°C (2200°F). Oksidasi kelongsong tidak boleh lebih 0.17 dari tebalnya. Hidrogen yang timbul dalam reaksi air dengan kelongsong tidak boleh lebih dari 1% dan seterusnya. Begitu pula telah didefinisikan tentang kegagalan yang harus diasumsikan, seperti tertera dalam Acceptance Criteria.

A. PADA PWR

Cara pendinginan teras pada saat darurat dilakukan oleh lebih dari satu sistem/subsistem yang masing-masing takgayut (independent) dengan penggerak listrik dari sumber dari dalam PLTN atau dari luar PLTN (unit disel, sumber DC atau jaringan listrik luar). Digunakan beberapa subsistem akan menjamin keandalannya bila salah satu gagal melakukan tugasnya. Pada gambar 1 tertera ECCS pada PWR secara skema.

Pertama adalah tanki akumulator air-boron (1). Ia bertekanan 14 - 44 atf dengan bantuan tekanan gas N_2 di atas cairan. Bila terjadi kebocoran pada sistem primer, sehingga tekanan sistem primer turun sampai dibawah tekanan N_2 ini, maka katub (2) akan membuka. Air yang mengandung penyerap netron ini akan memadamkan reaksi dan sekaligus mendinginkan reaktor. Sudah tentu pemadaman reaktor dengan cara ini me



Gambar 1 : ECCS pada PWR.

lengkap/mendobal sistem kendali reaktor yang sudah ada. Sistem ini dapat disebut sistem pasif, karena menunggu turunnya tekanan.

Kedua adalah sistem darurat tekanan rendah. Begitu terjadi kebocoran besar, tekanan pendingin dengan cepat menurun. Sistem inilah yang akan memberikan aliran pendingin pada kejadian darurat. Aliran digerakkan oleh pompa (3) dengan mengambil air dari tanki dan selanjutnya dari tadahan (5) lewat alat tukar panas (6). Sistem ini akan mendinginkan pula panas peluruhan dari bahan bakar.

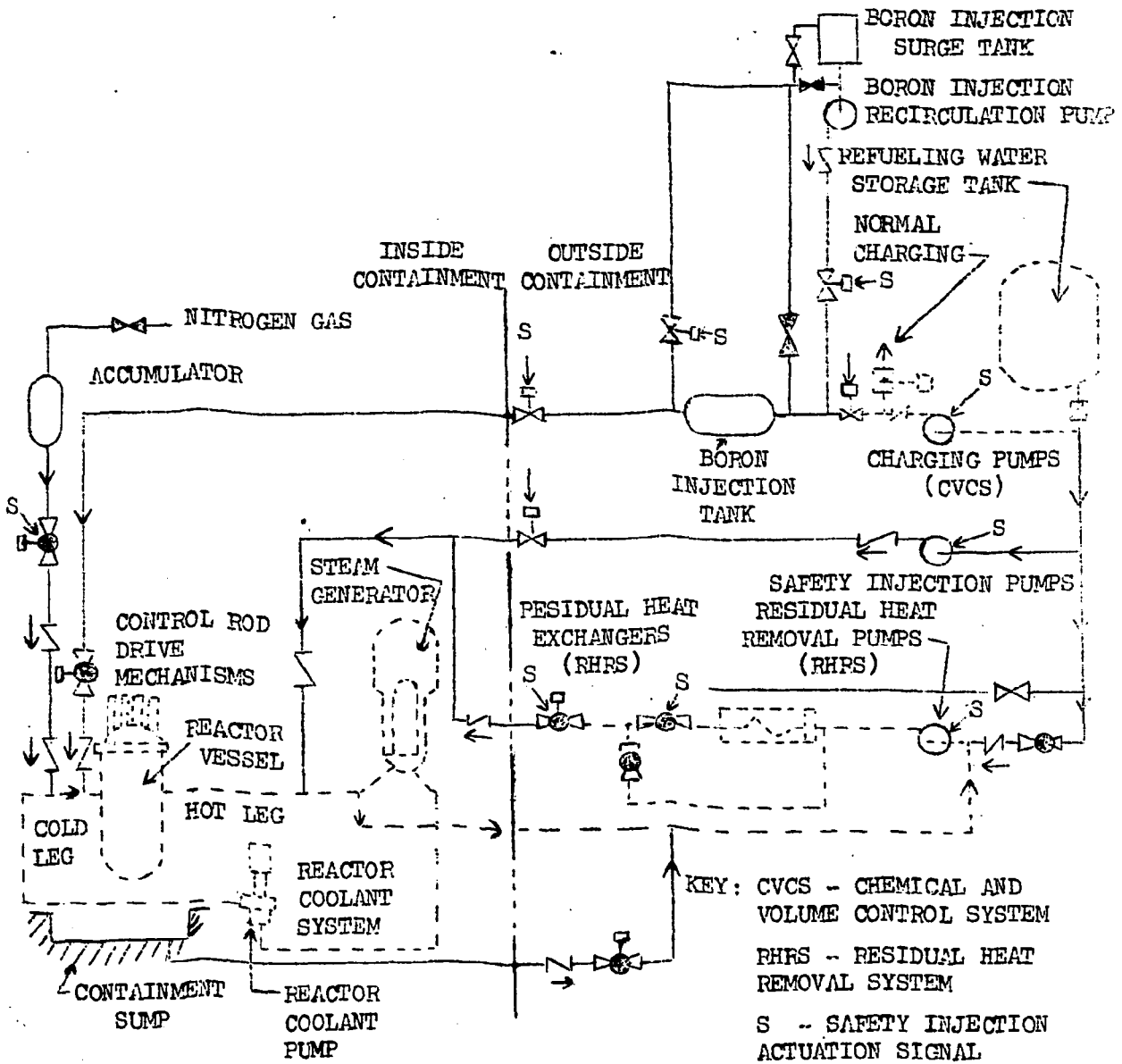
Ketiga adalah sistem darurat tekanan tinggi. Pada kebocoran kecil tekanan air pendingin masih bisa dipertahankan tinggi. Oleh karena itu untuk pendinginan darurat perlu diberikan aliran pendingin bertekanan tinggi ke teras reaktor. Air diambil dari tanki (4) pula dan digerakkan oleh pompa (7) langsung ke reaktor dan secara paralel mendesak aliran air-boron dari tanki (8). Selanjutnya bila air dalam tanki 4 habis, maka air dapat diperoleh dari tadahan (5). Dalam skema tersebut tertera pula penabur air untuk menindas tekanan dan suhu dalam lingkup reaktor. Sistem ini digerakkan oleh pompa (9).

Tentu saja skema detail dari ECCS setiap PLTN itu tidak sama, mestinya semakin diperbaiki pada disain yang semakin baru. Contoh yang lebih detail diperlihatkan pada gambar 2 untuk jenis reaktor jenis PWR yang ditawarkan oleh Westinghouse [2]. Sistem yang sifat bekerjanya pasif, yang mereka namakan passive accumulator injection, memiliki tanki boron dengan gas nitrogen bertekanan 44 atl. Jumlah tanki ini untuk setiap loop adalah satu, jadi untuk reaktor daya 600 Mwe banyaknya dua. Pada bekerjanya sistem ini air boron masuk ke dalam reaktor

lewat saluran masuk (inlet, cold leg). Sistem ini seluruhnya terletak di dalam lingkup reaktor.

Sistem yang bekerjanya aktif, disebut active safety injection, ada dua macam, yaitu tekanan rendah dan tekanan tinggi. Keduanya terletak di luar gedung lingkup. Sistem aktif tekanan rendah menggunakan air-boron yang tersimpan dalam tanki, digerakkan oleh pompa melewati alat tukar panas masuk ke dalam reaktor lewat saluran keluar (hot leg). Terlihat di sini bahwa sistem ini "meminjam" pompa dan alat tukar-panas dari sistem untuk mendinginkan reaktor waktu shutdown (residual heat removal system), sedang air-boron diambil dari cadangan air-boron untuk membanjiri reaktor pada waktu penggantian bahan bakar (refueling water storage tank). Sistem aktif tekanan tinggi di sini menggunakan dua subsistem secara berurutan. Mula-mula diinjeksikan air-boron dengan konsentrasi tinggi ke dalam reaktor lewat saluran masuk, kemudian dengan subsistem lainnya, memasukkan air-boron konsentrasi rendah (seperti pada sistem tekanan rendah) ke dalam reaktor lewat saluran-ke luar. Di sini sistem tekanan tinggi meminjam pula pompa pengisian dari sistem pengatur volume dan kadar kimia (chemical and volume control system, CVCS). Untuk menjaga air-boron yang konsentrasinya 12% dari kristalisasi dan supaya selalu bercampur merata, maka disini dilengkapi dengan resirkulasi cairan tersebut. Tanda S pada komponen menunjukkan bahwa komponen tersebut bekerja atas isyarat keadaan darurat. Sistem pendingin darurat yang aktif ini bekerja bila :

- a. tekanan pada pembangkit tekanan (pressurizer) turun dan berbarengan turunnya permukaan air di dalam alat tersebut, atau



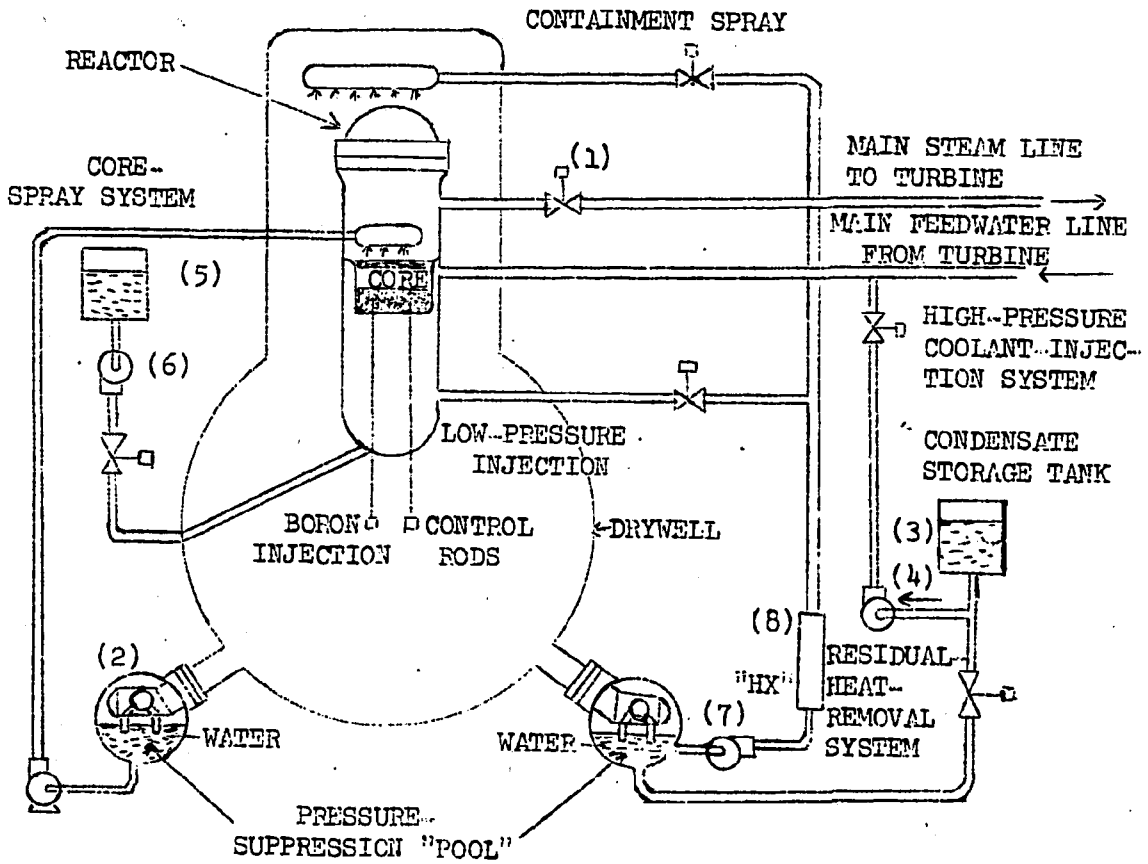
Gambar 2 : ECCS pada PWR dari Westinghouse.

- b. tekanan di dalam lingkup naik, atau
- c. terjadi perbedaan tekanan yang besar pada ujung dan pangkal pipa saluran uap, atau
- d. terjadi tiga keadaan berbarengan yaitu
 1. ada debit besar pada pipa saluran uap,
 2. ada tekanan uap rendah di dalam alat pembangkit uap,
 3. ada suhu rendah pada pemunjukan T_{avg} (suhu rata-rata dari air pendingin masuk dan keluar bejana reaktor).

Kejadian a, berarti tekanan sistem primer turun tetapi volume airnya berkurang pula. Pada b terjadi pembentukan uap banyak di dalam lingkup reaktor ini berarti uap atau air panas sudah menyebar keluar dari sistem primer. Isarat pada c berarti terjadi halangan atau pecahnya pipa saluran uap. Ini berarti bahwa gangguan terjadi pada sistem sekunder. Sedang pada kejadian d uap mengalir dengan debit besar, dari pembangkit uap tetapi tekanannya rendah karena terjadi kebocoran besar. Ini diyakinkan dengan menurunnya T_{avg} akibat pendinginan yang lebih besar.

B. PADA BWR

Di sini pula digunakan perlengkapan yang rangkap, untuk menjamin keandalan kerjanya bila ada yang macet. ECCS terdiri dari sistem-sistem yang bisa digolongkan pasif, aktif tekanan tinggi dan aktif tekanan rendah. Perbedaan utama dengan PWR terutama pada perbedaan jenis lingkup. Pada BWR digunakan lingkup supresi, dimana tersedia kolam air dalam volum besar (suppression pool) untuk menindas tekanan uap bila terjadi pembebasan uap panas dalam ruang-reaktor (dry-well). Kedua adalah dalam operasi normalpun di dalam bejana reaktor BWR terda-

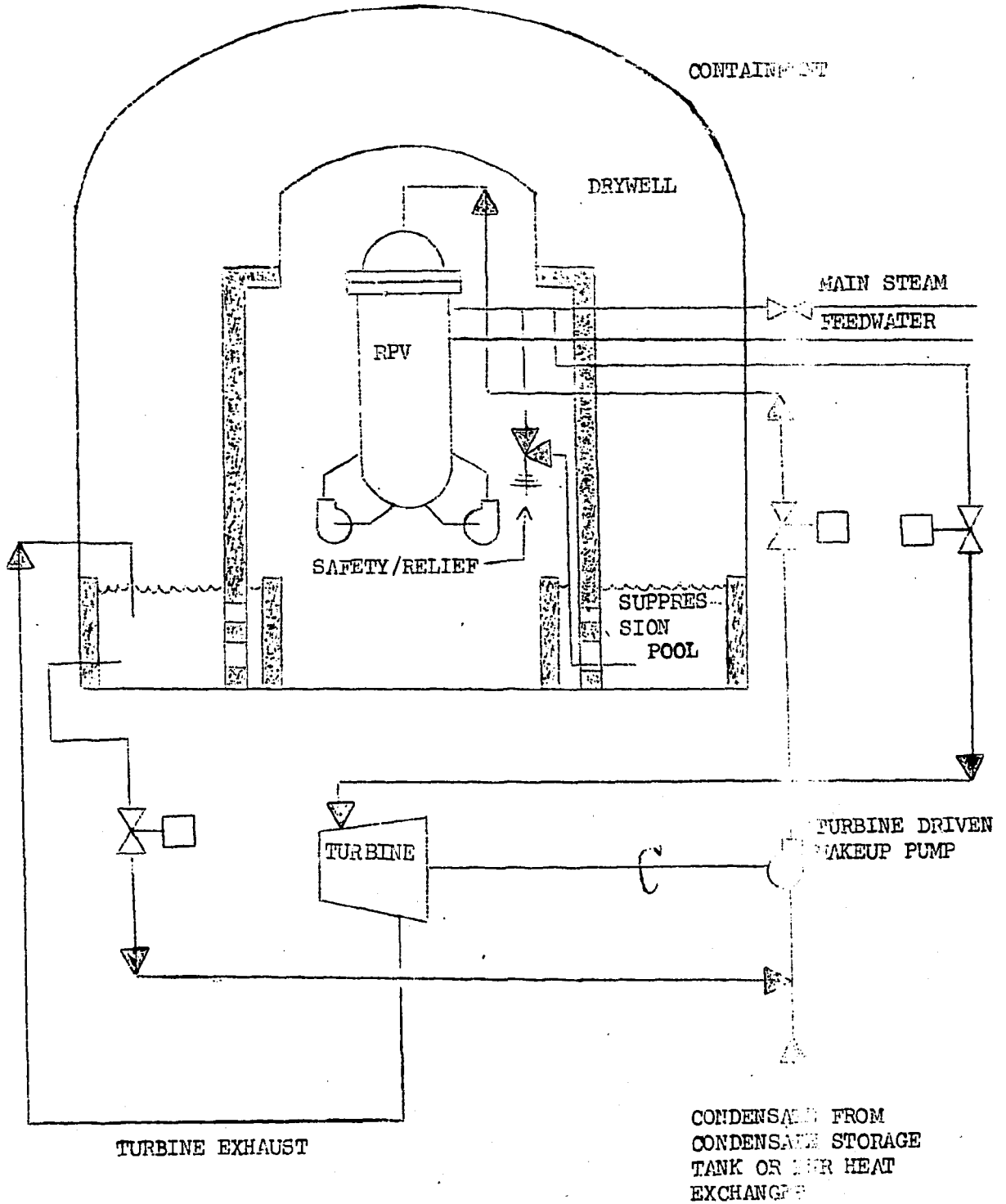


Gambar 3 : ECCS pada BWR.

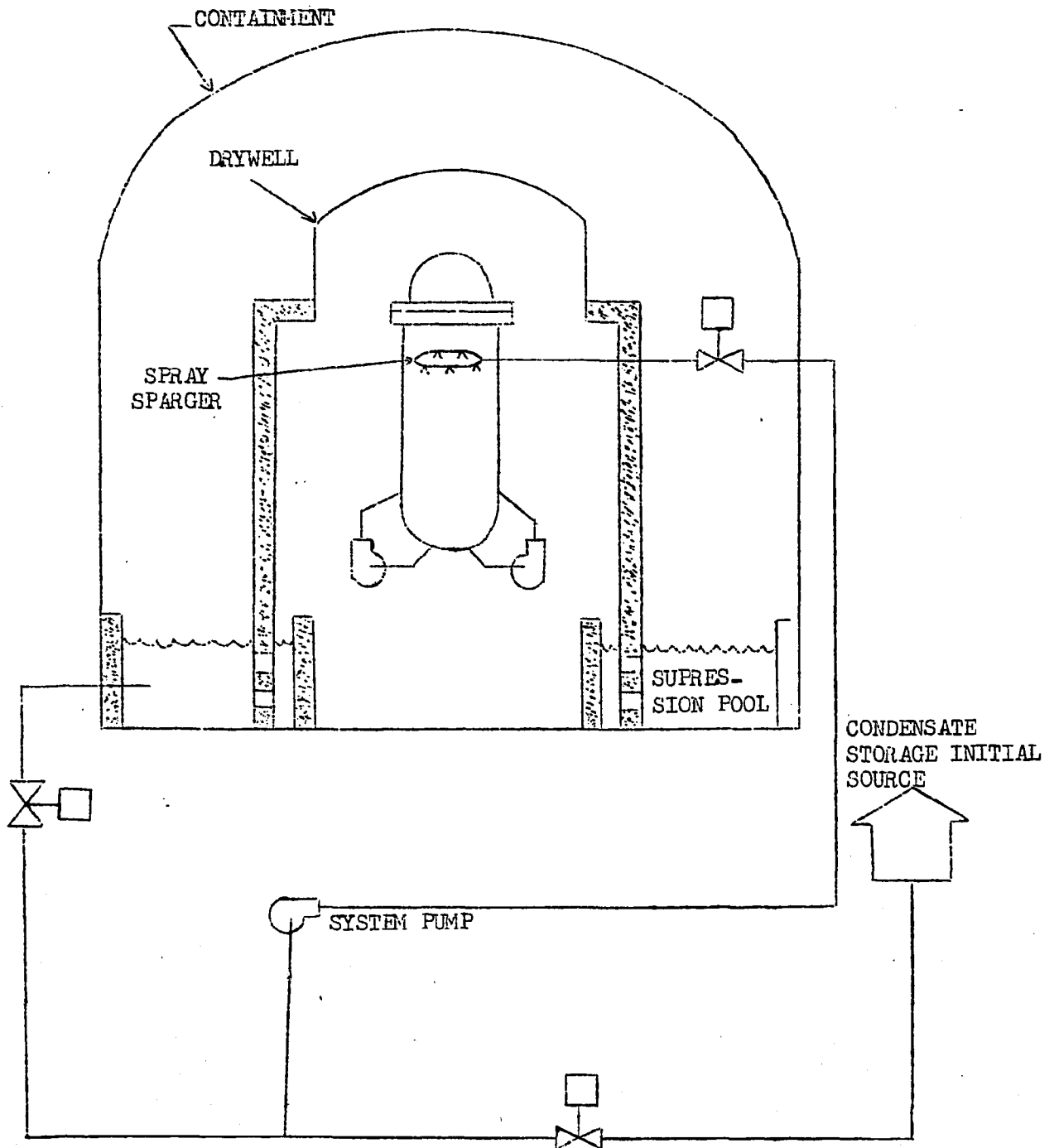
pat batas permukaan air, sedang pada bejana tersebut ada tembusan pipa berukuran besar (pipa resirkulasi) yang terletak di bawah ketinggian teras reaktor. Dengan demikian menjamin teras reaktor selalu terbenam air relatif lebih sukar. Skema ECCS pada BWR tertera dalam gambar 3. Perlengkapannya terdiri dari :

1. Pembebas tekanan otomatis (automatic depressurization system). Katup (1) menurunkan tekanan dalam reaktor dengan membebaskan uap kedalam kolom supresi (2). Ini sifatnya pasif.
2. Sistem aktif bertekanan tinggi (high pressure coolant injection system atau high pressure core spray system). Ini dimaksudkan menambah air pendingin dan mendinginkan teras reaktor bila kebocoran masih kecil sehingga pengurangan tekanan hanya lambat saja, atau bila umpan air ke dalam reaktor terganggu akibat macetnya pompa umpan sehingga muka air dalam reaktor menurun. Sistem injeksi bertekanan tinggi mengambil air dari tanki kondensat (3) oleh pompa (4) masuk ke dalam reaktor lewat saluran masuk. Variasi lain adalah sistem penyiram bertekanan tinggi, ia mengambil air dari tanki kondensat (3) menyiram teras reaktor lewat saluran tersendiri dengan penabur di atas teras reaktor. Bila air dalam tanki kondensat sudah tidak mencukupi lalu berpindah dari kolom supresi. Disamping itu larutan boron bertekanan tinggi dimasukkan ke dalam reaktor dari tanki (5) oleh pompa (6) lewat saluran masuk tersendiri, untuk memadamkan reaktor dan sekaligus mendinginkan.
3. Sistem penyiram bertekanan rendah bekerja setelah tekanan berkurang biasanya terdiri dari dua sistem yang takguyut satu sama lain. Sis-

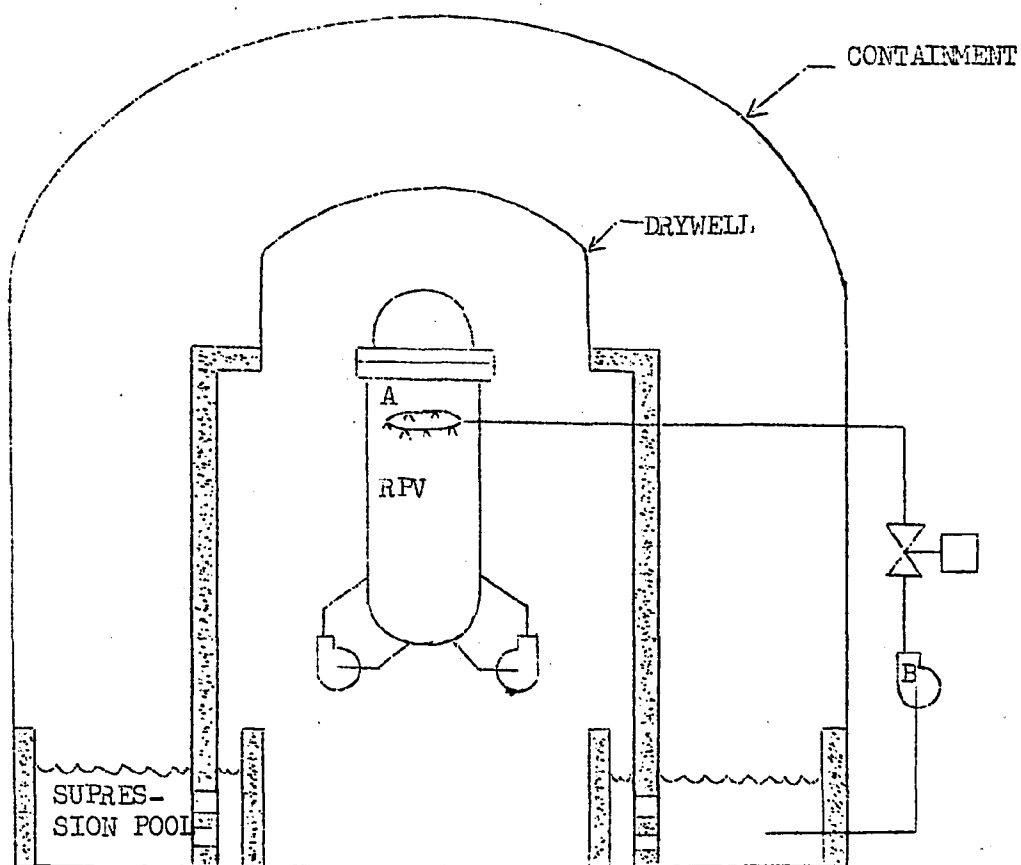
tem injeksi bertekanan rendah atau sistem penbenam reaktor (low pressure coolant injection atau core flooding system) mengambil air dari kolom supresi (2) dengan bantuan pompa (7) lewat alat tukar panas (8) masuk ke dalam reaktor lewat pipa saluran tersendiri. Sistem ini bekerja sesudah tekanan dalam reaktor turun atau setelah sistem pasif bekerja (depressurization). Disamping itu masih ada penabur air ke dalam lingkup untuk menindas tekanan di dalam ruang tersebut. Berikut adalah skema ECCS pada BWR-6, yaitu jenis terakhir yang ditawarkan oleh General Electric [3].



Gambar 4 : BWR-6, Reactor Core Isolation Cooling System.



Gambar 5. BWR-6, Sistem Penyiraman Bertekanan Tinggi.



A SPRAY SPARGER

B SYSTEM PUMP

Gambar 6 : EWR-6, Sistem Penyiraman Bertekanan Rendah.

Katup pembebas (safety/relief valve) merupakan pengaman otomatis dan termasuk sarana ECCS yang pasif sifatnya. Dalam operasi normal katup pembebas termasuk sistem pendinginan pada keadaan reaktor terisolasi dari turbin dan kondensor (reactor core isolation cooling system, RCIC). Pada keadaan darurat (LOCA) reaktor diisolasi pula dari turbo generator, tetapi pendinginan dari panas peluruhan tidak bisa dilakukan oleh RCIC. Ini disebabkan karena uap dari reaktor harus terisolasi dalam gedung lingkup reaktor. Katup pembebas ini dipasang pada pipa yang menghubungkan saluran uap (main steam) dengan bawah permukaan air pada kolam supresi (gambar 4). Jadi panas yang terbawa uap diserap dalam air pada kolam ini. Pada gilirannya air di dalam kolam didinginkan. Katup pembebas dapat terbuka secara otomatis, oleh isyarat permukaan air reaktor yang terlalu rendah yang berbarengan dengan tekanan dalam bejana reaktor yang tinggi. Ada waktu tenggang selama 2 menit untuk memberi kesempatan kepada operator untuk mengoreksi (mem-bypass), apabila isyarat itu salah.

Sistem penyiram bertekanan tinggi (gambar 5) memiliki sumber listrik disel sendiri disamping sumber DC dan sumber AC dari luar PLTN. Sistem ini menyiram air pendingin pada penabur di atas teras reaktor, di dalam keranjang teras. Air diambil dari tanki kondensat, kemudian bila air tanki ini telah habis maka akan pindah ambil dari kolam supresi. Isyarat yang menggerakkan sistem ini adalah permukaan air dalam reaktor yang terlalu rendah atau tekanan dalam bejana reaktor yang terlalu tinggi, disamping isyarat manual untuk test. Sistem injeksi tekanan rendah mengalirkan pendingin ke teras reaktor dan membenami keranjang reaktor sampai minimum dua pertiga tinggi teras.

Sistem penyiram teras bertekanan rendah (gambar 6) mengalirkan pendingin ke dalam reaktor lewat penabur di atas teras, di dalam keranjang teras. Ia bekerja setelah tekanan berkurang, setelah katup pembebas atau setelah penyiram tekanan tinggi bekerja. Sumber listrik tersedia dari disel atau DC atau dari luar PLTN.

Menurut perhitungan mereka, katup pembebas secara otomatis akan bekerja bila terjadi kebocoran seluas sampai $0,6 \text{ ft}^2$ (557 cm^2) baik pada saluran air maupun saluran uap. Karena lebih dari itu tekanan sudah terlalu rendah sehingga pendinginan dengan sistem penyiram tekanan rendah sudah bisa dijalankan. Penyiram tekanan rendah sudah bisa mulai bekerja bila tekanan telah turun ekuivalen dengan pecahnya saluran uap sebesar $0,25 \text{ ft}^2$ (232 cm^2) atau pada saluran air $0,3 \text{ ft}^2$ (299 cm^2). Sedang pembenaman bisa mulai dilakukan setelah turun tekanan ekuivalen dengan pecahnya saluran uap $0,3 \text{ ft}^2$ (299 cm^2) atau saluran air $0,5 \text{ ft}^2$ (465 cm^2).

C. PADA HWR

Pendingin teras reaktor di sini adalah air berat yang harganya sangat mahal, oleh karena itu suatu kebocoran pada sistem pendingin, biarpun tidak sampai menyebarkan radioaktivitas, akan mengancam kerugian materi yang besar. Dengan alasan yang sama, ECCS tidak menggunakan air pendingin dari air berat, tetapi air biasa. Sehingga pada keadaan darurat air biasa dicampurkan ke dalam sistem air berat. Seperti pada PWR, maka ECCS memanfaatkan sistem pendinginan untuk keadaan reaktor padam (shut down cooling system) yaitu komponen pompa dan alat tukar panas.

Agar supaya komponen ECCS bisa di-test tanpa terjadi banyak mencampur air biasa ke dalam air berat, maka ditambahkan katup di muka katup yang memisahkan H_2O dengan D_2O . Ciri umum lainnya adalah pada HWR ini tekanan air pendingin lebih rendah daripada PWR.

Pada jenis HWR yang menggunakan bejana token, ECCS memiliki komponen yang sama dengan PWR dengan tambahan seperti diterangkan di atas. Sedang untuk HWR-CANDU terdapat pemisahan antara D_2O sebagai pendingin dan D_2O sebagai moderator. Oleh karena itu pada air pendingin ECCS tidak perlu ditambahkan boron. Dalam hal ini air-boron diinjeksikan ke dalam calandria secara takgayut dengan bekerjanya ECCS.

Berikut adalah uraian tentang sistem darurat ini yang terdapat pada PHWR-CANDU yang ditawarkan terakhir oleh Atomic Energy Canada Limited [4]. Gambar 7 menunjukkan penampang lingkup reaktor, dimana di bagian atas terdapat tanki air (H_2O) sebagai cadangan untuk dua maksud. Pertama untuk keperluan ECCS, kedua untuk menyiram ruang di dalam lingkup reaktor untuk menindas tekanan uap bila terjadi pembobasan uap akibat pecahnya sistem primer (LOCA). Dalam gambar tertentu juga pompa pengambilan air dari tadahan di bawah alas lingkup. Tiga katup terpasang pada batas sistem $H_2O - D_2O$. Pada operasi normal satu katup depan (1) selalu terbuka, dua katup paralel (2) dan (3) selalu tertutup. Untuk keperluan test saja katup (1) ini ditutup, dimana terjadi pencampuran H_2O-D_2O di dalam ruang antar katup. Cara membuangnya bisa dilihat pada gambar 9 dengan meletakkan bagian tersebut pada ketinggian yang rendah dan dekat drain.

Pada gambar 8 tertentu skema sistem pendingin pada reaktor

padam yang bisa "dipinjamkan" untuk sistem ECCS. Sistem ini pokoknya terdiri dari pompa dan alat tukar panas yang berhubungan pada inlet header dan outlet header dari sistem primer. Pada PHWR-CANDU sistem primer terdiri dari dua sirkuit, dan masing-masing sirkuit memiliki 2 pompa dan 2 alat pindah panas yang terpasang berlawanan sehingga header seluruhnya 4 buah disetiap pihak. Di sini untuk setiap pihak di layani oleh satu pompa dan satu alat tukar-panas.

D. SUHU KELONGSONG

Yang menjadi tujuan utama dalam keadaan darurat adalah membatasi suhu kelongsong bahan bakar untuk tidak lebih dari batas yang diperkenankan. Batas ini telah diambil 2200°F atau 1205°C. Seperti diketahui untuk kelongsong zirkaloy mulai suhu 1000°F (538°C) sifat ke-dap mulai berkurang (cladding venting) pada suhu sekitar 950°C mulai terjadi perubahan eutektik (eutectic melting), mulai suhu 1100°C terjadi reaksi logam dengan air dan logam mencair pada suhu sekitar 1800°C.

Untuk menaksir suhu kelongsong ini dibuatlah suatu model analitik dari peristiwa tidak terdinginkannya bahan bakar/kelongsong dengan semestinya ini. Misalnya dengan menyelesaikan bentuk-persamaan differential berikut :

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[k_{ij}(\bar{r}, T) \frac{\partial T(\bar{r}, T)}{\partial x_j} \right] + Q(\bar{r}, t) = \rho(\bar{r}, T, t) C_p(\bar{r}, T, t) \times \frac{\partial T(\bar{r}, t)}{\partial t}$$

Suku pertama berarti panas konduksi, suku kedua adalah sumber panas fisi, suku ketiga adalah panas menurut kenaikan suhunya. Ini adalah

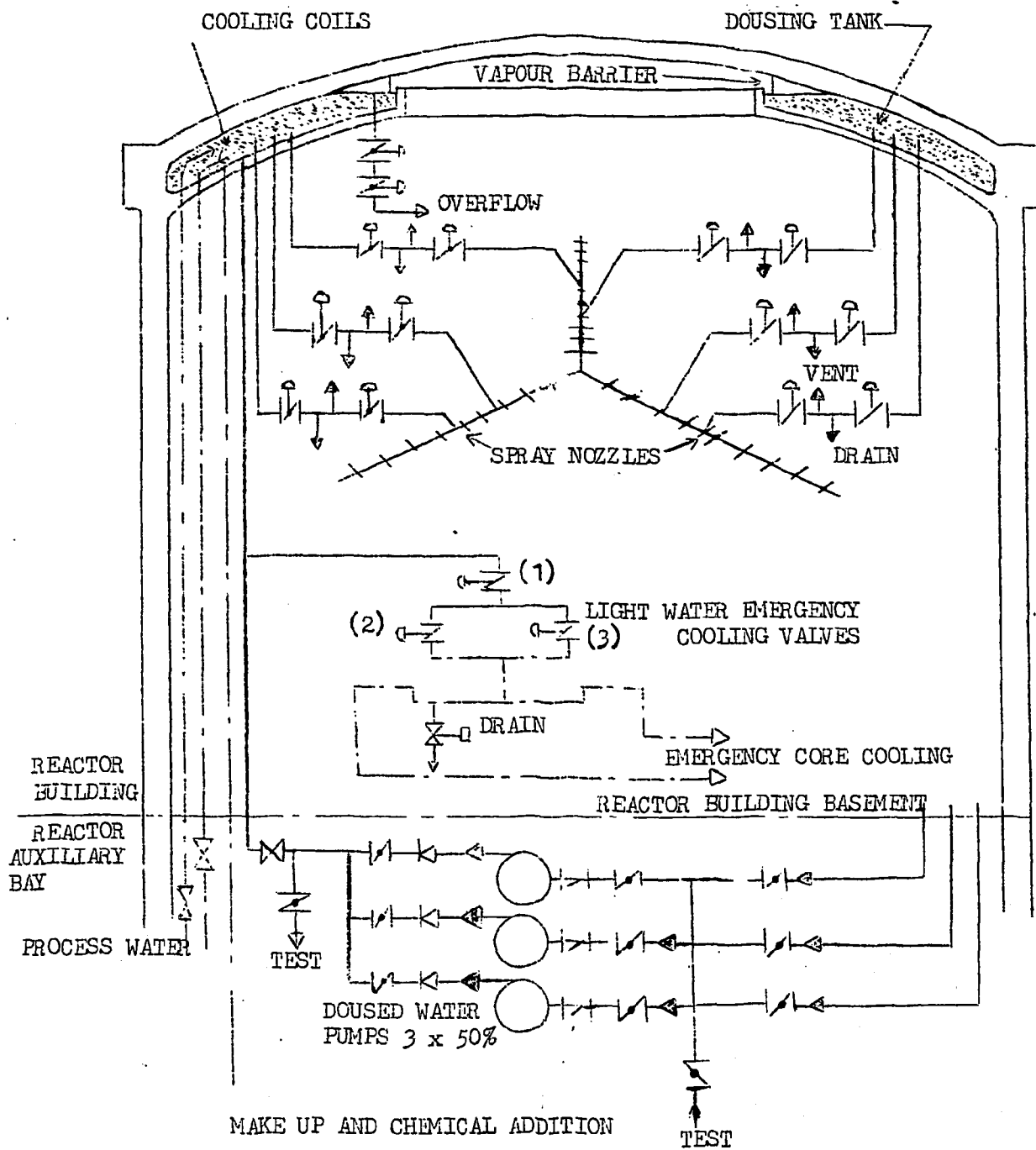
persamaan differensial untuk distribusi suhu dalam bahan bakar menurut waktu. Untuk kelongsong dan sela gas suhu ke dua akan sama dengan nol. Sedang permukaan luar kelongsong dimana terjadi pendinginan konveksi adalah :

$$-n_j \left(k_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right)_S = h(\bar{r}, T, T^*, t) \left[T_S(t) - T_j^*(s, t) \right]$$

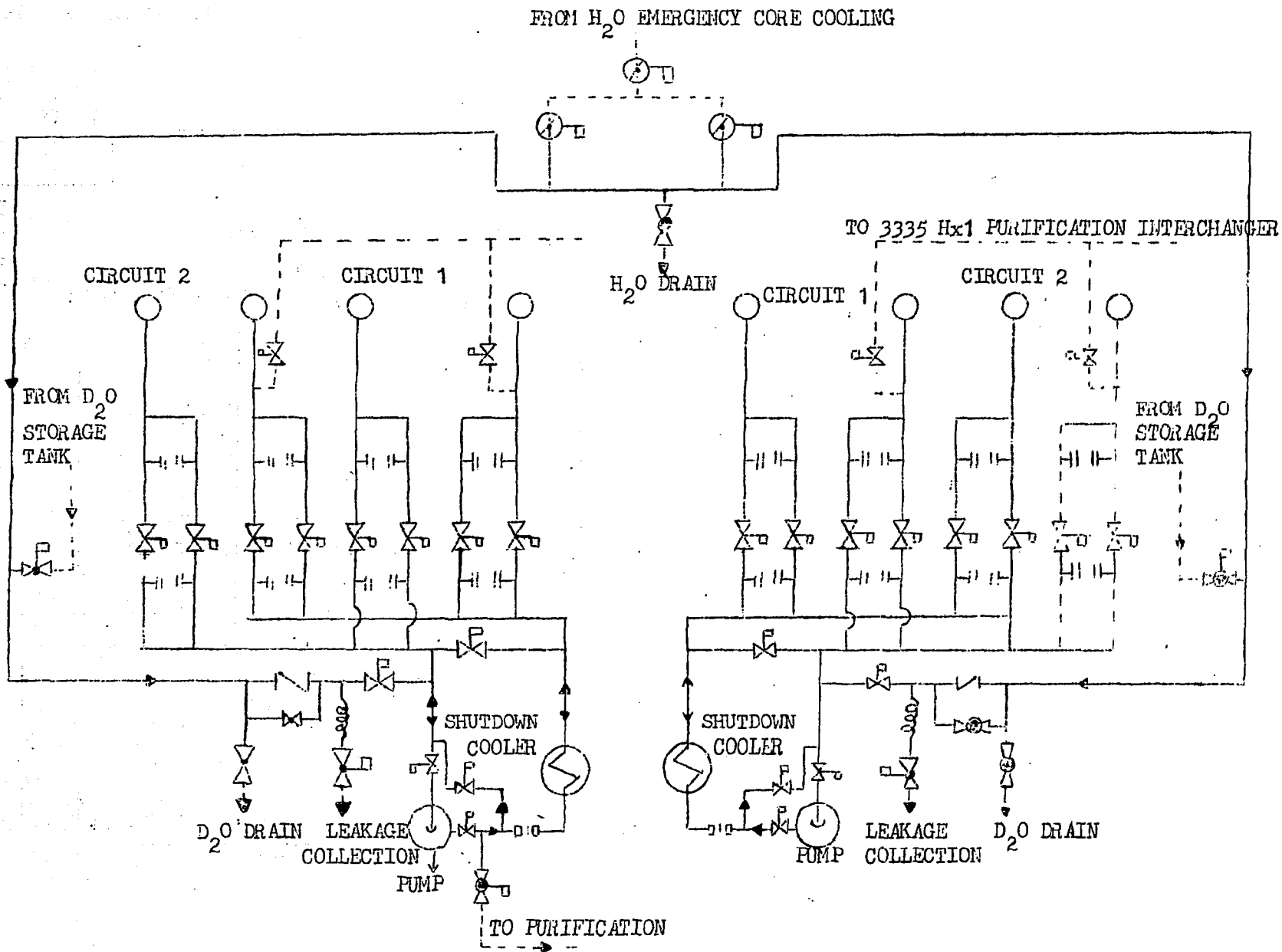
Suhu di sebelah kiri adalah panas yang berpindahkan dari kelongsong, suhu kanan adalah panas berpindahkan secara konveksi ke dalam air.

Syarat batas dan syarat awal diambil dari koefisien tukar panas, kontinuitas suhu yang disesuaikan dengan geometri dan kondisi kanal yang ditinjau. Contoh distribusi suhu pada bahan bakar-kelongsong-air terbuka dalam gambar 9. Suhu pada keadaan normal sekitar 700°F pada kelongsong menanjak dengan cepat sekitar 2000°F setelah 10 detik dan sekitar 100°F sekitar 3000°F, bila tidak ada pendinginan darurat sama sekali.

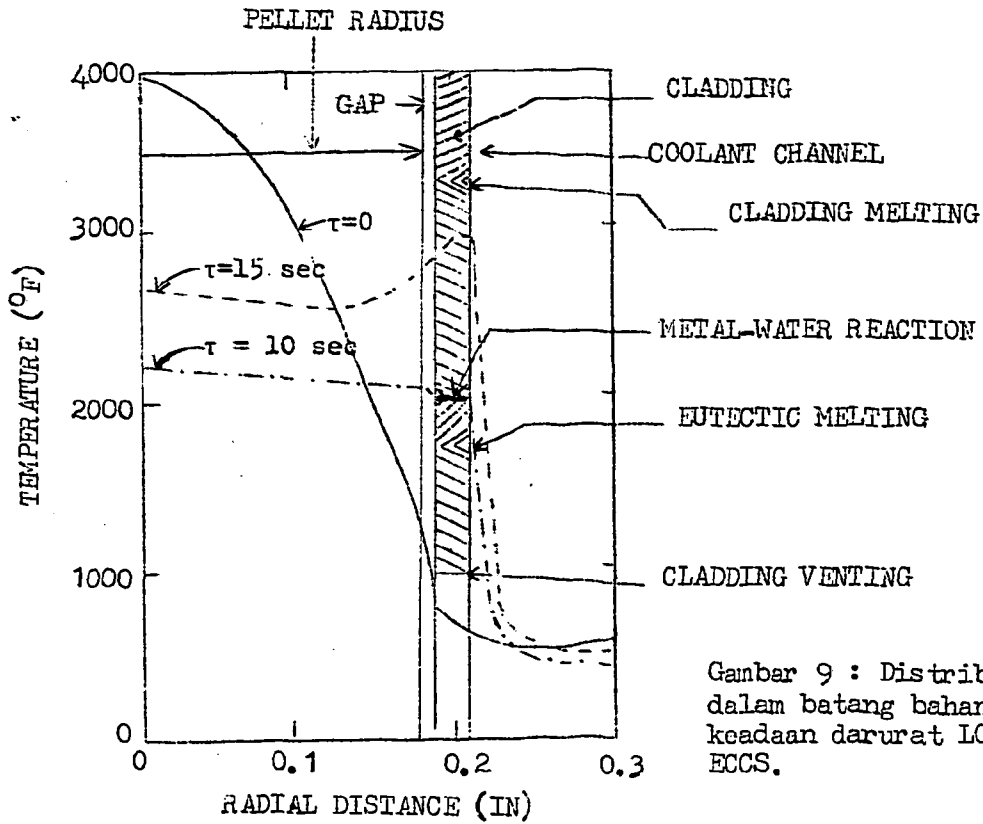
Dengan dilakukannya pendinginan darurat (lihat gambar 10) maka suhu kelongsong dapat dibatasi menjadi hanya 1500°F atau 2300°F tergantung asumsi model analitiknya. Pengertian **realistik** atau konservatif di sini sudah tentu bisa diperdebatkan. Namun realistik diberi arti bahwa komponen ECCS bekerja seperti diharapkan dengan kelambatan yang biasa terjadi. Sedang konservatif menunjuk keadaan tak menguntungkan yang dianggap mungkin terjadi biarpun kecil kebolehjadiannya.



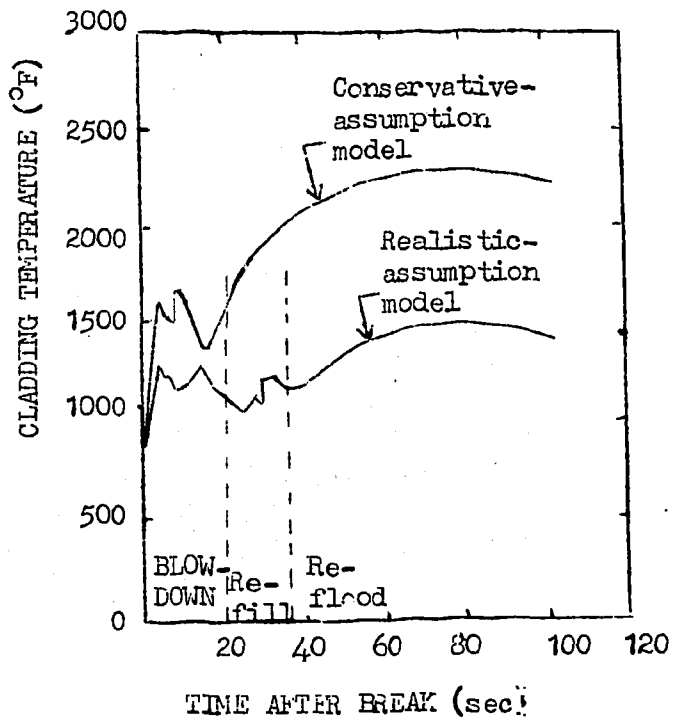
Gambar 7 : HWR-CANDU, Dousing and Emergency Cooling System.



Gambar 8 : Sistem pendingin darurat dan pada waktu padam, pada HWR-CANDU



Gambar 9 : Distribusi suhu dalam batang bahan bakar pada keadaan darurat LOCA tanpa ECCS.



Gambar 10. Suhu Kelongsong pada Keadaan Darurat LOCA dengan bekerjanya ECCS.

III. P E N U T U P

Dalam menilai keberhasilan bekerjanya ECCS ada dua hal yang pokok yang masih dipertanyakan. Pertama, andaikan betul terjadi keadaan darurat yang seperti didefinisikan dalam Acceptance Criteria dan andaikan semua peralatan berjalan sebagai direncanakan, apakah perhitungan perkiraan itu akan cukup teliti? Apakah penyerhanaan dalam model-model analitiknya cukup mendekati kenyataan sebenarnya? Kedua, andaikan terjadi keadaan darurat dan andaikan terjadi transient tekanan dan suhu seperti perhitungan, apakah komponen reaktor (bahan kelong song, pompa, sistem pipa) akan berubah (response) seperti diperkirakan dalam disain? Kenyataan bahwa kegagalan seperti fuel densification justru tidak pernah diperkirakan dan kegagalan akibat defek pembuatan dan kurang ketelitian dalam pemeliharaan tidak tentu terlihat sebelumnya.

Untuk menjawab pertanyaan di atas jelas bahwa eksperimen dan analisa diperlukan dalam mendukung suatu disain ECCS. Ini telah dilakukan oleh beberapa instansi baik swasta maupun pemerintah di negara-negara penjual reaktor. Bagi seorang calon pembeli tentu harus selalu mengikuti laporan hasil-hasil eksperimen dan analisa mereka. Diskripsi dan analisa perhitungan ECCS untuk suatu PLTN tertentu dapat dibaca dalam Final Safety Analysis Report dari PLTN tersebut yang didasarkan juga atas hasil eksperimen dari penelitian yang mendukungnya. Di Amerika informasi ini diterbitkan dalam seri DOCKET dan WASH-1250. [5]

Mengenai tuntutan Ralph Nader dan Friends of the Earth biarpun secara langsung telah ditolak oleh USAEC, tetapi USAEC telah mem-

berikan perintah pembatasan/penurunan daya terhadap 10 PLTN jenis BWR di negeri itu. Alasan pembatasan ini dinyatakan bahwa kesepuluh PLTN itu belum memberikan analisa keselamatan secara detail dengan mengikutsertakan kegagalan fuel densification dalam kejadian darurat [6]. Kenyataan ini dapat diartikan bahwa lembaga yang berwenang dalam menilai keselamatan sebenarnya telah yakin bahwa khususnya ECIS telah cukup memenuhi syarat. Dan selanjutnya suatu tindakan administratif perlu dilakukan untuk meredakan suasana disamping memacu untuk perbaikan usaha keselamatan pada umumnya.

SINGKATAN

atl	-	atmosfir lebih; atmosphere gauge
BWR	-	Boiling Water Reactor
CANDU	-	Canadian Deuterium (natural) Uranium (reactor)
ECCS	-	Emergency Core Cooling System
HWR	-	Heavy Water Reactor
LOCA	-	Loss of Coolant Accident
Mwe	-	Megawatt electric
Mwt	-	Megawatt thermal
PLTN	-	Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir
PWR	-	Pressurized Water Reactor
USAEC	-	United States Atomic Energy Commission

FUSTAKA

1. Cottrell, Wm.B. - "The ECCS Rule - Making Hearing". J. Nuclear Safety Vol. 15 - 1. Jan - Febr. 1974.
2. Masche, G. - "System Summary of a Westinghouse Pressurized Water Reactor Nuclear Power Plant. Westinghouse. 1972.
3. Head, M. A. - "BWR Steam Supply System". 6.E. Tokyo. 1974.
4. Atomic Energy of Canada Limited - "Canada Nuclear Power Station" 1973.
5. "The Safety of Nuclear Power Reactors and Related Facilities". USAEC Report WASH 1250. July 1973.
6. J. Nuclear Safety. Vol. 14 - 6, 679. (1973).