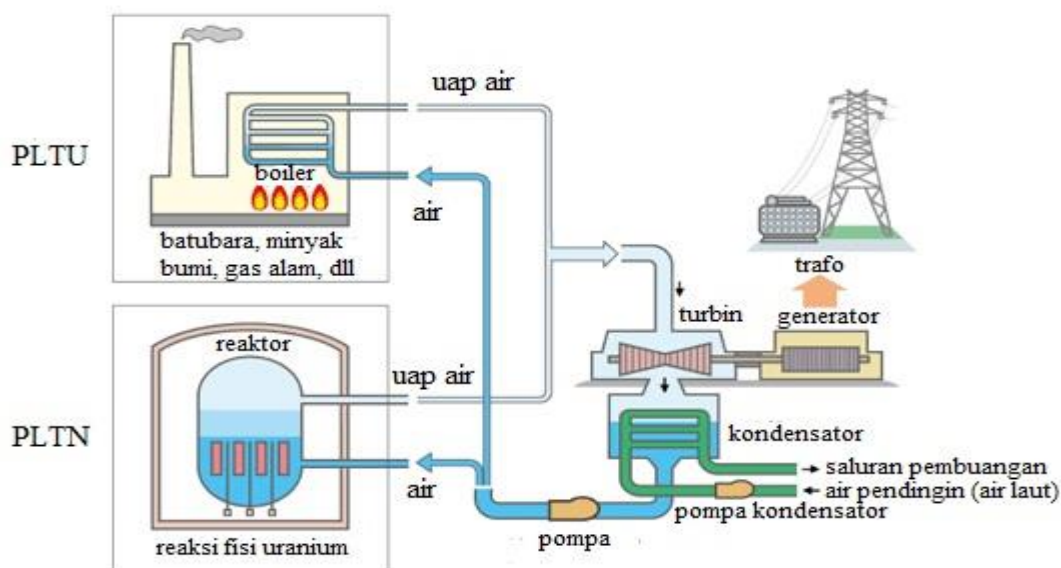


BAB II

TINJAUAN MENGENAI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA NUKLIR

2.1. Prinsip Kerja Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir

Pembangkit listrik pada dasarnya adalah tempat untuk mengubah energi yang dikandung oleh bahan bakar menjadi energi listrik. PLTN sendiri adalah termasuk dalam pembangkit listrik thermal. PLTN juga termasuk dalam pembangkit daya beban dasar (base load), yang dapat bekerja dengan baik ketika daya keluarannya konstan. Kerja dari PLTN memiliki kemiripan dengan prinsip kerja pada PLTU. Karena panas yang dihasilkan digunakan untuk membangkitkan listrik. Perbedaan keduanya adalah pada bahan bakar yang digunakan. Pada PLTU biasanya digunakan bahan bakar batu bara dan minyak bumi. Sedangkan PLTN menggunakan tenaga nuklir dalam membangkitkan energi listrik. Perbedaan lain dari kedua pembangkit ini adalah mesin pembangkit uapnya, PLTU menggunakan ketel uap dan PLTN menggunakan reaktor nuklir. Dalam reaktor nuklir PLTN, reaksi fisi berantai dipertahankan kontinuitasnya dalam bahan bakar sehingga bahan bakar menjadi panas. Karena memanfaatkan panas dari hasil reaksi fisi maka reaktor nuklir dirancang berdaya thermal tinggi. Panas yang dibangkitkan tadi ditransfer ke pendingin reaktor untuk dididihkan dalam bejana reaktor yang kemudian secara langsung membangkitkan uap. Uap ini kemudian secara langsung dialirkan ke turbin yang memutar generator listrik. Setelah uap air menggerakkan turbin, uap disalurkan ke kondenser dan diubah menjadi air kembali. Dengan pompa utama, air kemudian dikembalikan ke bejana reaktor.

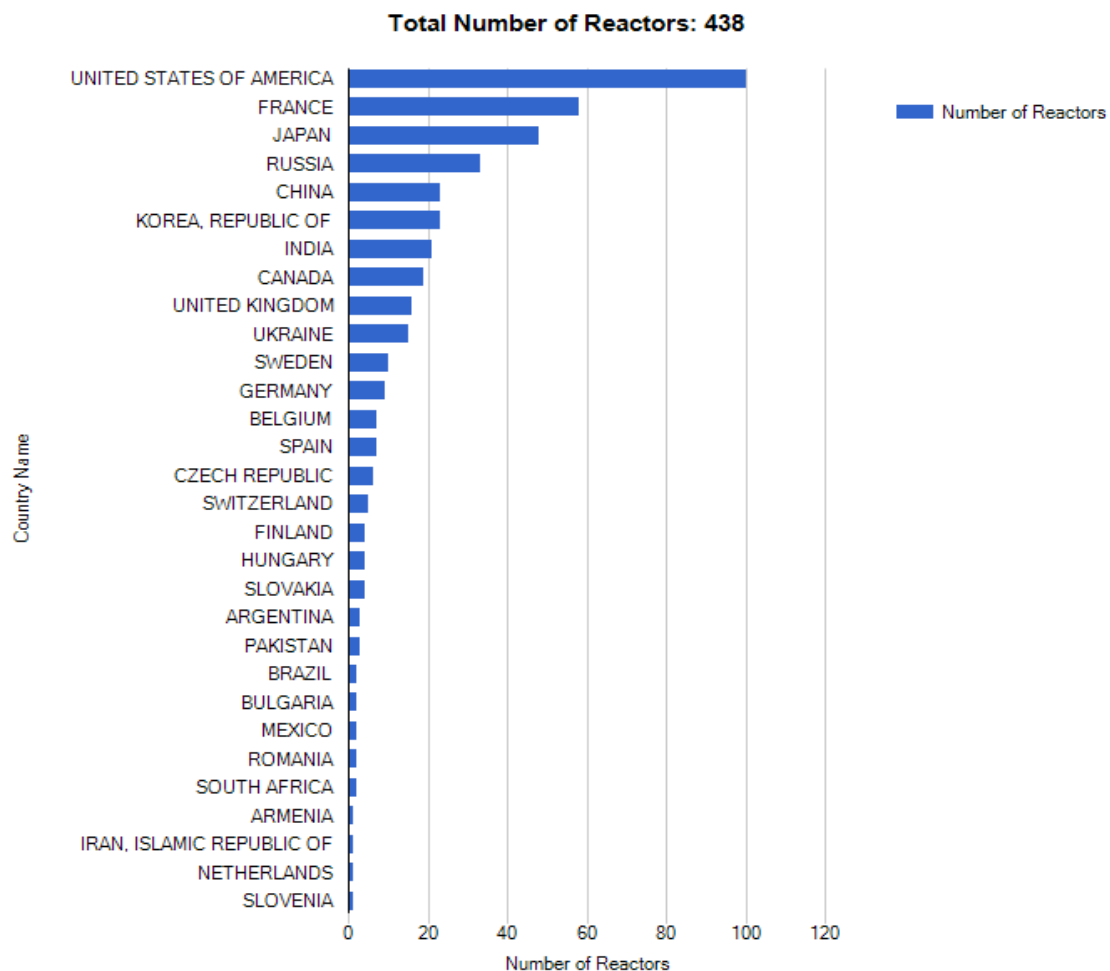


Gambar 2.1 : Skema Perbedaan Prinsip Kerja PLTU dan PLTN

2.2. Kondisi PLTN di Berbagai Negara Dan Tipe PLTN Yang Ada di Berbagai Negara

Akhir-akhir ini beberapa negara mulai memikirkan kembali pemanfaatan energi nuklir. Hal ini disebabkan oleh tingginya harga minyak bumi, keinginan untuk mengurangi emisi gas rumah kaca yang berakibat pada laju pemanasan global, dan mengurangi ketergantungan pada pasokan migas dan batubara dari luar negeri. Berdasarkan data yang diperoleh dari IAEA tahun 2014 (Gambar 2.12) dunia saat ini mengoperasikan 438 PLTN atau sekitar 375504 MW yang tersebar di 30 negara. negara Amerika Serikat (AS) menjadi negara dengan pengoperasian PLTN terbanyak dengan jumlah 100 PLTN diikuti oleh negara-negara Eropa dan Asia yang menggunakan PLTN sebagai sumber energi listriknya, jumlah ini menyumbang sekitar 15% listrik dunia. Akibat pemanasan global, jumlah ini akan semakin bertambah, karena masih ada sekitar 47 unit PLTN yang sedang dalam masa konstruksi, dan masih ada 133 unit PLTN yang sedang dalam proses perencanaan. Sebagian besar dari PLTN yang sedang dibangun dan direncanakan berada di

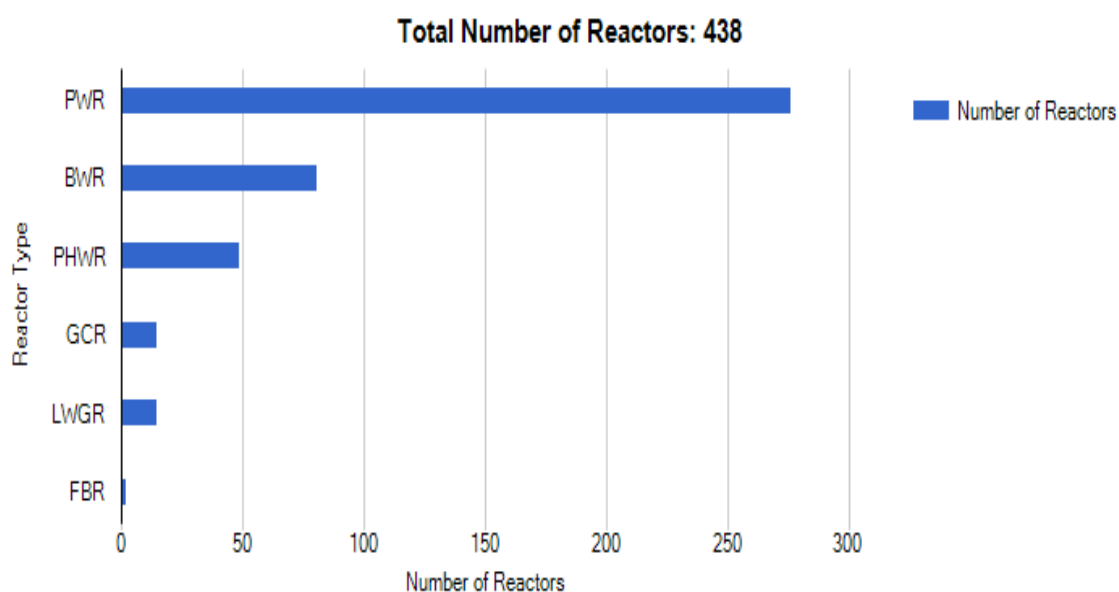
kawasan Asia, yaitu di China, India, Korea, Taiwan dan Jepang, yang merupakan negara dengan tingkat ekonomi yang kuat dan dengan pertumbuhan ekonomi yang tinggi.



Gambar 2.2: Jumlah Unit PLTN di Berbagai Negara 2014

Dalam perkembangan, muncul sekitar tujuh tipe PLTN, yaitu Reaktor Air Mendidih (BWR), Reaktor Air Bertekanan (PWR), Reaktor Air Berat Bertekanan (*Pressurized Heavy Water Reactor/PHWR*), Reaktor Grafit Berpendingin Air (*Light Water Graphite Reactor/LWGR*), Reaktor Pembiak Cepat (*Fast Breeder Reactor/FBR*), dan *Pebble Bed Reactor* (PBR).

Sedangkan tipe PLTN yang digunakan berdasarkan data statistik tahun 2014 (Gambar 2.13) yang diperoleh dari IAEA menunjukkan bahwa PLTN yang masih beroperasi di dunia didominasi oleh PLTN tipe PWR berjumlah 276 unit dan BWR berjumlah 81 unit dilanjutkan dengan reaktor tipe PHWR dengan jumlah 49 unit, reaktor dengan tipe GCR dan LWGR masing - masing berjumlah 15 unit, reaktor yang paling sedikit digunakan adalah reaktor tipe FBR berjumlah 2 unit.

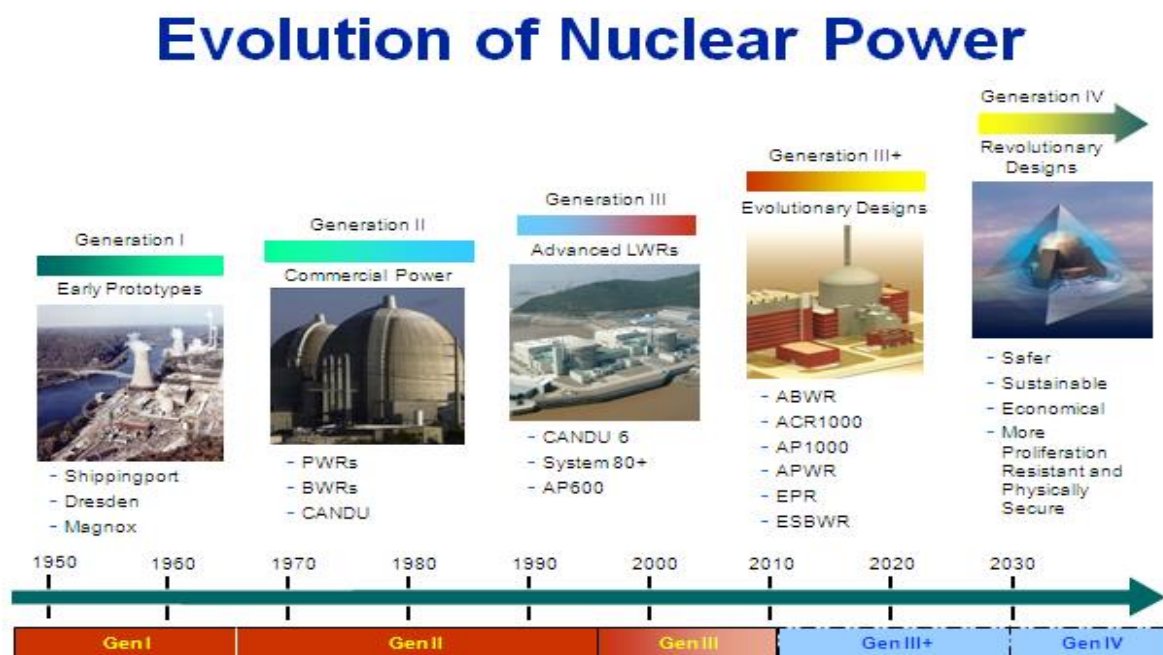


Gambar 2.3: *Jumlah Tipe PLTN di Berbagai Negara 2014*

Data statistik ini membuktikan bahwa PLTN tipe PWR & BWR masih menjadi pilihan utama diberbagai negara dikarenakan reaktor tipe tersebut mampu merespon gempa kuat dengan mematikan secara otomatis reaksi fisi didalamnya, adapun kejadian kebocoran pada PLTN di Fukushima Daiichi menggunakan BWR generasi kedua yang mulai beroperasi tahun 1970-an dimana PLTN tersebut sudah tergolong usang.

2.3. Evolusi Economic Simplified Boiling Water Reactor (ESBWR)

Generasi awal PLTN umumnya memiliki umur operasi sekitar 30 tahun. Generasi yang lebih baru dirancang untuk bisa dioperasikan selama 40 - 60 tahun. Dua tipe reaktor itu terus mengalami pengembangan terutama peningkatan pada sistem keamanannya. Kini, reaktor BWR telah lahir tiga sampai empat generasi baru (Gambar 2.4).



Gambar 2.4 : Pengembangan PLTN Generasi I Sampai Generasi IV

PLTN tipe reaktor air didih (Boiling Water Reactor, BWR) dan reaktor air tekan (Pressurized Water Reactor, PWR) memiliki persamaan dalam sejarahnya yang berawal dari teknologi yang dikembangkan pada tahun 1950 untuk program kapal selam nuklir angkatan laut Amerika Serikat (AS). PLTN tipe BWR pertama yang dibangun adalah PLTN Vallecitos (1957) yang terletak di San Jose, California berkapasitas 5 MW. Sedangkan PLTN tipe BWR berskala besar pertama adalah PLTN Dresden 1 (1960). Desain BWR telah mengalami serangkaian perubahan

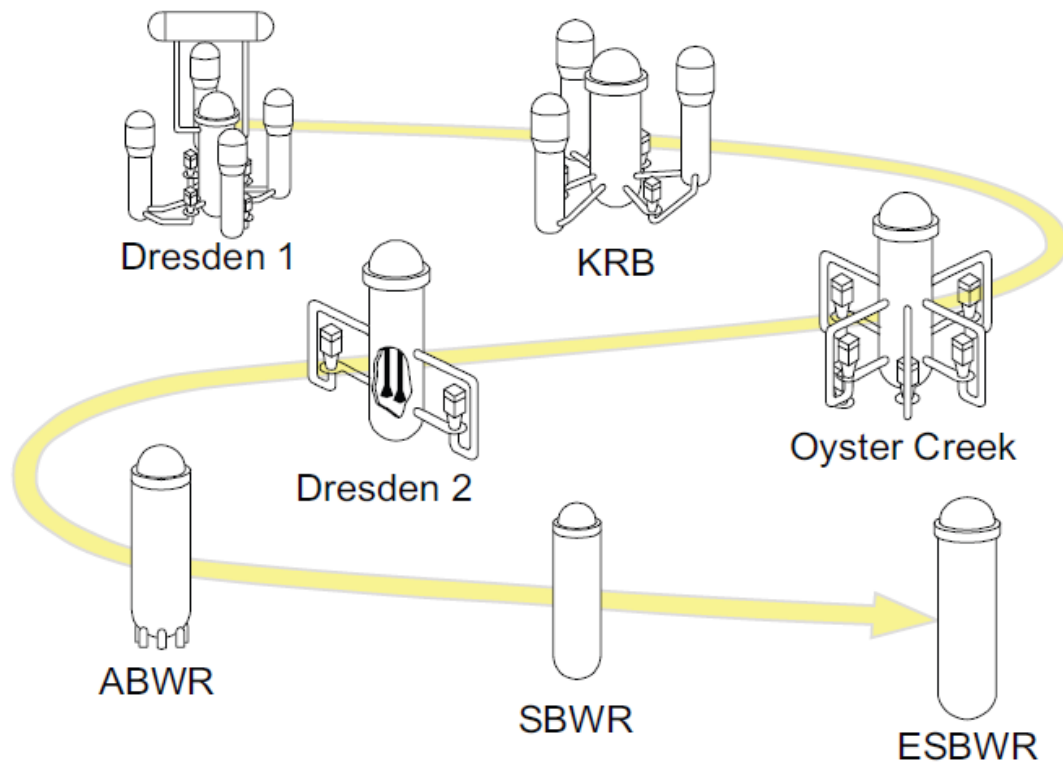
evolusioner dengan satu tujuan pemikiran yaitu penyederhanaan PLTN. Desain BWR telah disederhanakan dalam 2 area utama yaitu pada sistem reaktor dan pada desain keamanannya, tabel 2.1 menceritakan perkembangan dari PLTN tipe BWR tersebut.

Dresden 1 didasarkan pada siklus uap ganda, bukan pada siklus uap langsung yang saat ini menjadi ciri khas BWR, uap yang dihasilkan dalam reaktor kemudian mengalir ke *elevated steam drum* menuju *steam generator* sekunder sebelum memutar turbin. Langkah awal menuju sistem yang lebih sederhana yang pada akhirnya mengarah ke ESBWR adalah dengan dilakukannya penghapusan *steam drum external* dan memperkenalkan dua inovasi terbaru yaitu dengan adanya *steam separator* dan *steam dryer* (KRB,1962). Sedangkan BWR dengan memakai siklus langsung mulai dioperasikan pada pertengahan 1960 yaitu PLTN Oyster Creek dan ditandai dengan penghapusan *steam generator* dan penggunaan lima loop resirkulasi eksternal, yang kemudian disederhanakan dengan pengenalan pompa jet internal. Pompa ini cukup mendorong aliran resirkulasi sehingga hanya dua loop resirkulasi eksternal saja yang diperlukan, perubahan ini pertama kali ada pada PLTN Dresden 2.

Product Line	First Commercial Operation Date	Representative Plant/ Characteristics
BWR/1	1960	Dresden 1 Initial commercial-size BWR
BWR/2	1969	Oyster Creek Plants purchased solely on economics Large direct cycle
BWR/3	1971	Dresden 2 First jet pump application Improved ECCS: spray and flood capability
BWR/4	1972	Vermont Yankee Increased power density (20%)
BWR/5	1977	Tokai 2 Improved ECCS Valve flow control
BWR/6	1978	Clinton Compact control room Solid-state nuclear system protection system
ABWR	1996	Kashiwazaki-Kariwa 6 Reactor internal pumps Fine-motion control rod drives Advanced control room, digital and fiber optic technology Improved ECCS: high/low pressure flooders
ESBWR	-	Natural circulation Passive ECCS

Tabel 2.1: Pengembangan PLTN Tipe BWR

Langkah lain dalam penyederhanaan sistem reaktor adalah dengan digunakannya pompa internal pada desain (*Advance Boiling Water Reactor*) ABWR, penggunaan pompa terpasang langsung didalam bejana reaktor tersebut, pompa jet dan sistem resirkulasi eksternal, serta semua pompa, katup, pipa dan snubbers telah dihilangkan pada ESBWR dan pendahulunya Simplified Boiling Water Reactor (SBWR), desain ESBWR ini memiliki sistem yang lebih sederhana bila dibandingkan dengan generasi BWR sebelumnya dikarenakan mempunyai bejana reaktor yang lebih tinggi dan teras yang lebih pendek untuk mencapai resirkulasi alami tanpa menggunakan setiap pompa, Berikut gambar 2.5 menggambarkan evolusi desain sistem reaktor.



Gambar 2.5: *Evolusi Desain Sistem Reaktor*

Setelah terjadinya kecelakaan pada PLTN Three Mile Island pada tahun 1970, para ahli PLTN banyak yang berminat untuk mengembangkan reaktor dengan digunakannya sistem keselamatan pasif dan mengurangi ketergantungan pada operator, perusahaan - perusahaan pembangkit listrik juga mengambil kesempatan ini untuk meminta agar dioperasikannya reaktor dengan sistem yang sederhana, memiliki komponen yang tidak terlalu banyak dan tidak mempergunakan generator untuk tindakan keamanan dalam sebuah PLTN. Berdasarkan prinsip-prinsip tersebut *General Electric* (GE) memulai studi internal konsep baru BWR dengan direalisasikannya *Simplified Boiling Water Reactor* (SBWR) di awal 1980-an, konsep ini mendapat dukungan dari Departemen Energi AS (DOE), *Electric Power Research Institute* (EPRI) dan sejumlah perusahaan pembangkit listrik AS. Pada saat itu fitur utama terbaru seperti *Gravity Driven Core Cooling System* (GDCCS),

Depressurization Valves (DPV), and *drywell vacuum breakers* sedang dalam pengujian. Program desain sertifikasi mulai diadakan pada akhir 1980-an dengan tujuan memperoleh standarisasi dari sebuah reaktor, dan ABWR menjadi standarisasi sebuah reaktor pada waktu itu. Namun seiring berjalannya waktu banyak desain reaktor yang terkenal, semakin jelas bahwa SBWR yang menghasilkan daya 670 MW itu terlalu kecil untuk berkompetisi secara ekonomi dengan perusahaan pembangkit listrik lainnya. Program sertifikasi dihentikan, tetapi GE terus mengembangkan penelitiannya untuk membuat SBWR menarik untuk dijadikan pembangkit listrik. Dengan dukungan perusahaan pembangkit listrik di Eropa, SBWR secara bertahap menaikkan kualitasnya dari segi tingkat dayanya menjadi 1.520 MW. Hal ini memungkinkan dengan tetap menggunakan *Reactor Pressure Vessel (RPV)* sebagai batas ukur yang ditetapkan oleh ABWR, dan dengan mengambil keuntungan dari pendekatan modular untuk keselamatan pasif yang diberikan oleh *Isolation Condensers (IC)* and *Passive Containment Cooling System (PCCS)*.

ESBWR telah mencapai penyederhanaan sebuah pembangkit dasar dengan melakukan perubahan inovatif sistem operasi pembangkit, diantaranya dengan menggabungkan *shutdown cooling* dan sistem pembersihan air reaktor, dan menggabungkan berbagai tempat pendinginan dan sistem pembersihan. Selain itu , ada beberapa sistem yang dihilangkan diantaranya, *standby gas treatment* and *flammability control*.

ESBWR merupakan teknologi yang kaya akan desain, pengembangan, dan kerja analisis yang dikembangkan dari SBWR dan program ABWR. Beberapa sistem diperlukan untuk bekerja lebih atau menaikkan rating ukuran untuk menyesuaikan

diri dengan tingkat daya yang lebih besar. Pembangkit listrik ESBWR ini (meskipun secara signifikan disederhanakan), air pendingin dan sistem siklus panas masih memiliki manfaat yang luar biasa ketika sedang beroperasi.

2.4. Komponen Dan Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir ESBWR

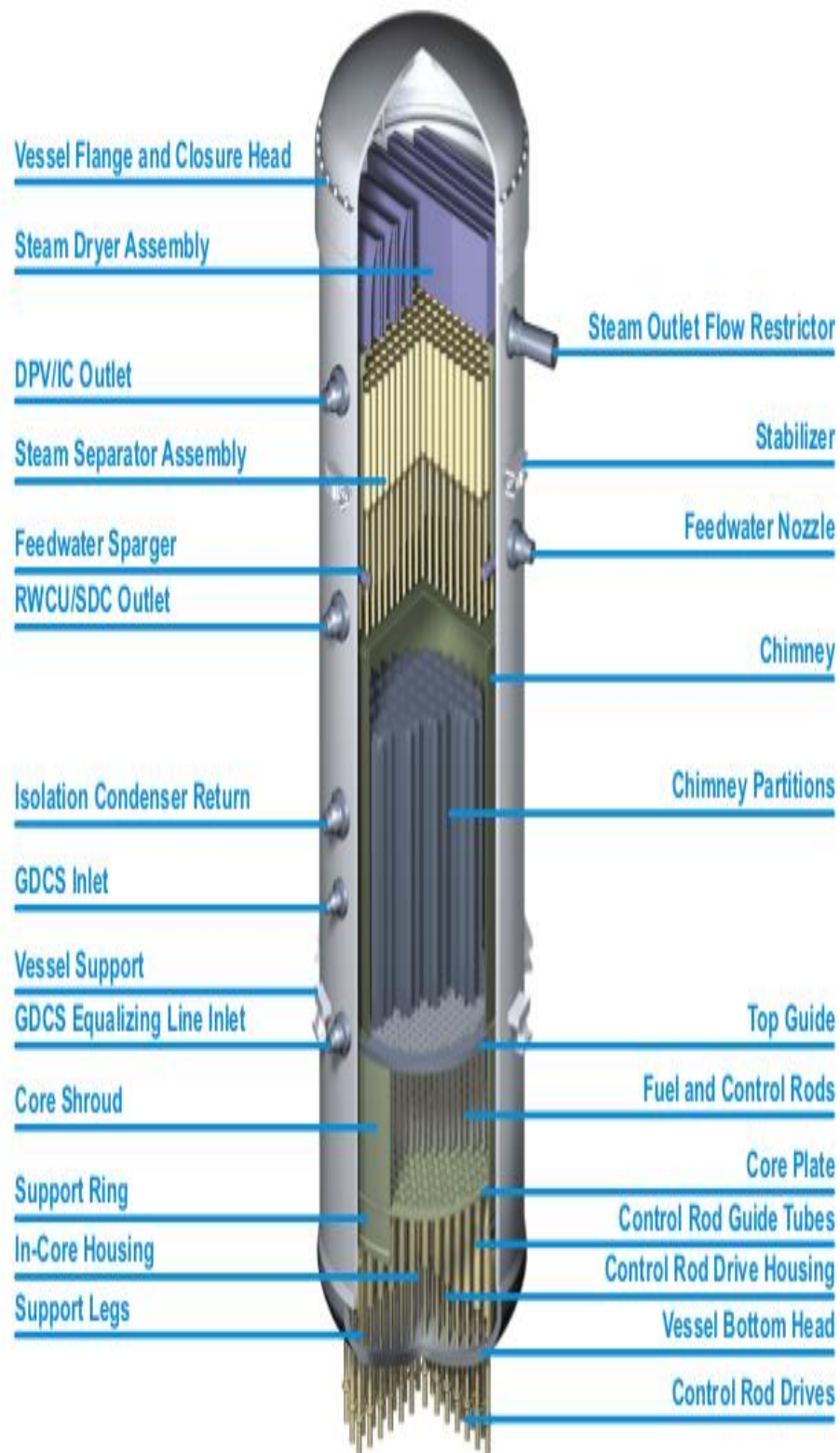
2.4.1. Bejana Tekan Reaktor (*Reactor Pressure Vessel*)

Bejana reaktor adalah rumah dari teras reaktor yang merupakan sumber panas untuk menghasilkan uap. Bejana yang didalamnya memiliki temperatur yang panas ini menghasilkan uap dalam batas-batasnya dan berfungsi sebagai salah satu tempat untuk mengamankan reaksi fisi selama operasi normal, gambar 2.6 menunjukkan bejana reaktor PLTN tipe ESBWR. Diameter dari RPV sama seperti ukuran RPV ABWR yaitu sekitar 27,6 m untuk tingginya dan 7,1 untuk diameternya.

Desain RPV didasarkan pada teknologi BWR. Sebuah fitur penting adalah tidak adanya saluran besar dibawah elevasi puncak teras. Konfigurasi saluran RPV ini mencegah pecah pada pipa besar dibawah ketinggian teras. Ini merupakan factor kunci dalam kemampuan sistem keselamatan ESBWR untuk menjaga teras dan terus membajiri seluruh bagian dasar dari terjadinya kehilangan air pendingin (Loss of Coolant Accidents, LOCA).

Bejana memiliki struktur penopang teras yang dibuat memanjang hingga puncak teras. Keberadaan volume uap dan air yang besar menghasilkan 2 (dua) karakteristik yang menguntungkan dan sangat penting. Pertama, karakteristik tersebut menyediakan cadangan air di atas teras, yang secara langsung menjadikan waktu tersedia yang lebih panjang sebelum teras uncover dapat terjadi yang diakibatkan dari gangguan feed flow atau LOCA. Akibatnya, hal ini memberikan

jangka waktu selama sistem otomatis atau operator pembangkit dapat menyusun ulang kontrol inventori reaktor dengan menggunakan sistem normal yang cocok dan tidak terkait sisi keamanan apapun dalam memasukan air ke dalam reaktor. Start-up (permulaan / penyalaan) yang tepat waktu dari sistem-sistem ini didesain untuk menghalangi start-up dari peralatan pengaman bahaya. Ini memudahkan reaksi yang dikontrol untuk menghilangkan "asupan air" normal sebagai keuntungan operasi yang signifikan. Kedua, volume RPV yang lebih besar memungkinkan mengurangi kenaikan tekanan ESBWR yang akan terjadi setelah mempercepat isolasi pada reaktor dari penurunan panas yang normal.



G

Gambar 2.6 : Bejana Tekan Reaktor

Berikut ini memberikan uraian lebih lanjut mengenai RPV pada ESBWR dan bagian dalamnya :

1. RPV Closure Head

RPV closure head berbentuk elips dan dibuat dari baja paduan rendah, per ASME SA-508, tingkat 3, kelas . RPV closure head diamankan dengan 84 set baut

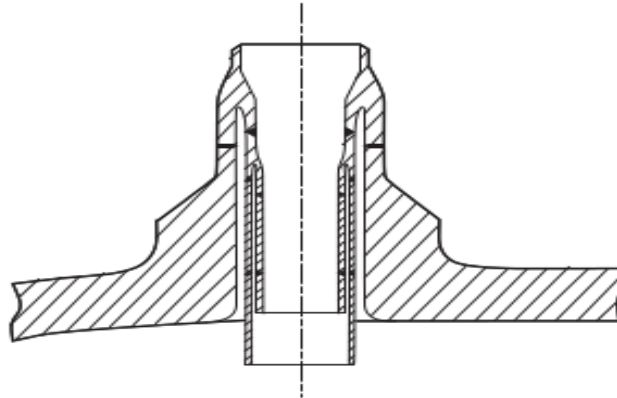
2. Steam nozzle dengan flow restrictor

ESBWR RPV memiliki aliran pembatas venture terletak di steam outlet nozzles, steam outlet nozzles berfungsi untuk :

- a. Mendeteksi uap yang lolos dengan mengukur aliran uap untuk mengetahui adanya uap yang terlolos dari katup isolasi.
- b. Pengukuran aliran uap untuk input menuju feedwater control system.
- c. Flow-choking device untuk mengatasi blowdown dan kejadian kebocoran uap.

3. Feedwater Nozzle Thermal Sleeve

Terdapat 3 feedwater nozzles, masing-masing terdiri dari 2 feedwater line yang menggunakan double thermal sleeves yang dipasang ke nozzle. Double feedwater nozzle thermal sleeves melindungi bagian dalam vessel nozzle dari siklus termal berfrekuensi tinggi. Berikut adalah gambar 2.7 skematik feedwater nozzle.



Gambar 2.7 : Feedwater Nozzle

4. Feedwater Spargers

Feedwater spargers merupakan header stainless steel yang terletak di plenum mixing diatas downcomer annulus. Sparger terpisah dalam dua bagian yang dipasang ke setiap feedwater nozzle dengan tee dan dibentuk agar sesuai dengan kurva dari dinding bejana. Sparger tee inlet terhubung dengan susunan selongsong thermal. Aliran feedwater masuk ke dalam pusat spargers dan dibuang ke dalam radial untuk mencampur feedwater pendingin dengan aliran downcomer dari pemisah uap dan pengering uap

5. Vessel support

Bergeometri jenis blok dan ditempatkan disejumlah posisi disekitar pinggiran vessel. Dalam penempatannya dibutuhkan:

- a. Ruang untuk reaktor internal pump (RIP) heat exchanger.
- b. Akses untuk in-service inspection (ISI) bagian bawah head weld.

6. Reactor Vessel Bottom Head

Reactor vessel bottom head memiliki ketebalan mendekati 260 mm, desainnya dispesifikasikan dari ASME. keunggulannya menggunakan

bottom head ini adalah mengeliminasi pengelasan semua RPV yang berefek pada pengurangan in-service inspection (ISI) di waktu kemudian.

7. Stabilizers

Stabilizers berada di sekitar pinggir luar RPV, Hal ini bertujuan memberikan poin reaksi untuk menahan beban horizontal dan menekan gerakan RPV jika terjadi gempa bumi

8. Core Shroud

Shroud merupakan stainless steel silinder yang menyediakan partisi untuk memisahkan aliran atas pendingin melalui inti dari aliran pendatang annulus down. Shroud dibatasi dibagian bawah dengan core plate.

9. Support Legs

Support legs yang dipasang ke dalam vessel sebagai penopang steam separators, chimney, top guide, shroud, core plate, support ring dan peripheral fuel bundles

10. Core Plate

Pelat inti terdiri dari pelat melingkar dengan bukaan bulat. Pelat inti memberikan penopang lateral untuk batang kendali, in-core flux monitor guide tubes, peripheral fuel supports, and startup neutron sources. Pelat inti juga membentuk partisi dalam shroud yang menyebabkan aliran resirkulasi masuk ke dalam pendukung bahan bakar orificed melalui perangkat bahan bakar.

11. Pengatur Atas (Top Guide)

Pengatur atas terdiri dari kotak sebagai penopang sisi bagian atas perangkat bahan bakar. Setiap lubang memberikan penopang sisi dan pembatas untuk empat perangkat bahan bakar, lubang ditempatkan di

bawah perpotongan penopang sisi untuk jangkar di monitor fluks inti pengaktifan sumber neutron

12. Penopang Bahan Bakar

Penopang bahan bakar terdiri dari dua tipe dasar yaitu penopang bahan bakar peripheral dan penopang bahan bakar utama. Tiga sampai empat penopang bahan bakar peripheral terletak di tepi luar dari inti aktif dan tidak berdekatan dengan batang kendali. Setiap penopang bahan bakar peripheral menopang satu perangkat bahan bakar dan berisi sebuah lubang yang dirancang untuk menjamin aliran pendingin yang tepat untuk perangkat bahan bakar peripheral. Setiap penopang bahan bakar utama menopang empat perangkat bahan bakar vertikal ke atas dan horizontal dilengkapi dengan lubang untuk menjamin distribusi aliran pendingin yang tepat untuk masing-masing bundel bahan bakar. Penopang bahan bakar utama berada diatas tabung pengatur batang kendali, yang membawa batang bahan bakar turun ke bawah RPV tersebut. Batang kendali melewati bukaan silang di tengah penopang bahan bakar utama.

13. Rumah Penggerak Batang Kendali (Control Rod Drive Housing)

Kontrol rumah penggerak batang kendali menyediakan perluasan dari RPV untuk instalasi kontrol penggerak batang dan keterikatan jalur CRD, juga menopang berat batang kendali, kontrol penggerak batang, kontrol tabung pengatur batang penopang bahan bakar utama dan empat perangkat bahan bakar.

14. Tabung Pengatur Batang Kendali (Control Rod Guide Tubes)

Tabung pengatur batang kendali memiliki panjang dari atas rumah penggerak batang kendali sampau melalui lubang di pelat inti. Setiap

pengatur tabung dirancang sebagai pengatur pada ujung bawah dari batang kendalidan sebagai penopang pada penopang bahan bakar utama. Juga menempatkan empat perangkat bahan bakar di sekitar batang kendali, dimana pada akhirnya mentransmisikan berat pengatur tabung, penopang bahan bakar, dan perangkat bahan bakar ke reactor vessel bottom. Tabung pengatur batang kendali juga terdapat lubang di dekat bagian atas tabung pengatur batang kendali dan dibawah pelat inti aliran pendingin ke penopang bahan bakar orificed. Selain itu, pengatur tabung menyediakan koneksi ke Fine Motion Control Rod Drive (FMCRD) untuk menahan ejection bawah hipotesis dari FMCRD dalam memberitahukan kasus kegagalan las RPV.

15. In-Core Housing

In-Core Housing dalam menyediakan perluasan dari RPV di kepala bawah untuk koneksi ke berbagai inti dalam perangkat sensor pemantauan fluks, yang merupakan komponen dari sistem pemantauan neutron, juga penopang berat sensor pemantauan fluks perangkat inti dalam, tabung pengatur inti dalam, dan bagian dari tabung pengatur inti dalam perangkat stabilizer.

16. Chimney

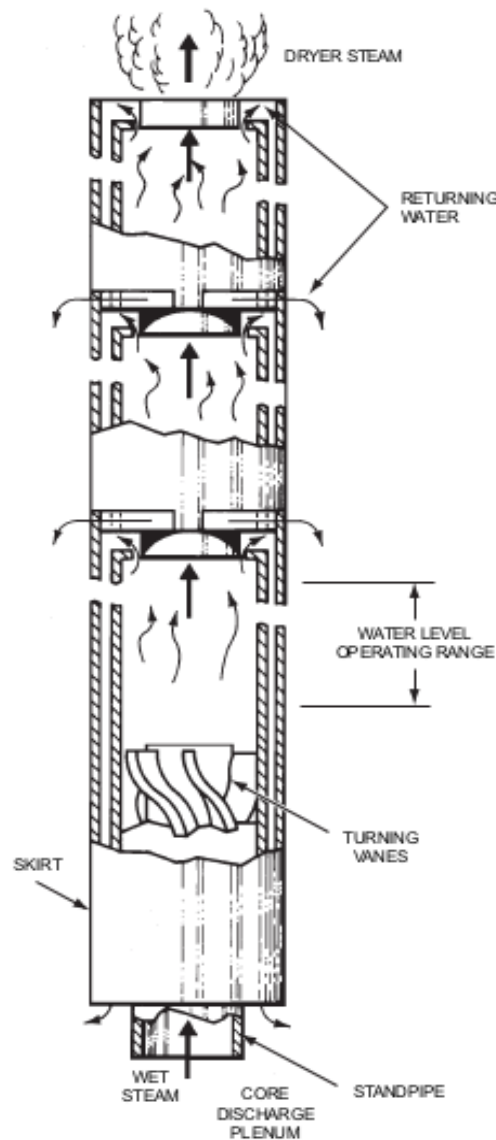
Chimney merupakan silinder stainless steel panjang yang menopang pemisah uap dan melesat ke pengatur atas. Chimney menyediakan pengatur head yang diperlukan untuk menciptakan dan mempertahankan aliran sirkulasi alam.

17. Chimney Partitions

Partitions terletak di dalam chimney yang memisahkan grup hingga 16 bundel bahan bakar. Partitions ini berfungsi untuk menyalurkan uap dan aliran air campuran keluar inti menuju bagian chimney berukuran kecil untuk membatasi lintas aliran dan memperkecil potensi pusaran sirkulasi yang bisa diakibatkan oleh chimney terbuka jauh lebih besar.

18. Perangkat Pemisah Uap (Steam Separator Assembly)

Perangkat pemisah uap terdiri dari flat dasar di atas yang di las serangkaian standpipes dengan pemisah uap tiga tingkat yang terletak di bagian atas setiap pipa tegak. Pemisah uap bertumpu pada flange yang berada diatas chimney dan membentuk penutup inti daerah pelepasan plenum. Jenis aliran aksial tetap pada pemisah uap memiliki bagian yang bergerak dan terbuat dari stainless steel. Dalam setiap pemisah, campuran uap air naik melalui standpipe impinges pada baling-baling yang membuat campuran tersebut berputar untuk membentuk pusaran dimana gaya sentrifugal memisahkan air dari uap. Uap meninggalkan pemisah dibagian atas dan masuk ke dalam pleno steam basah dibawah pengering (Gambar 2.8). Cairan yang terpisah keluar dari ujung bawah dari setiap tahap pemisah dan memasuki kolam yang mengelilingi standpipes untuk bercampur dengan aliran downcomer annulus.

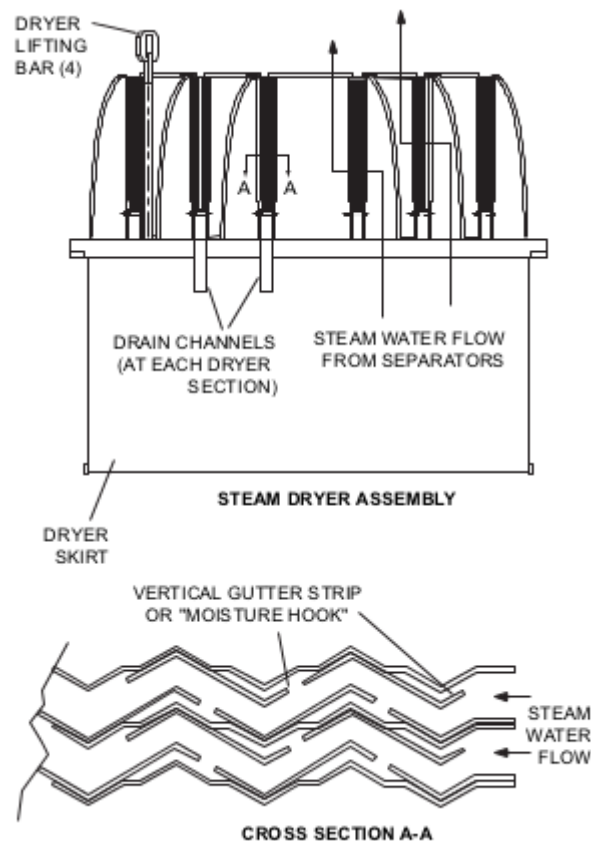


Gambar 2.8 : Skema Aliran Uap Melalui Sparator

19. Perangkat Pengering Uap (Steam Dryer Assembly)

Uap yang berasal dari pemisah uap mengalir ke atas menuju ke pengering uap dan melalui baling-baling uap luar (Gambar 2.9). Baling-baling ini melekat pada penopang atas dan bawah membentuk kaku, unit integral. Uap yang telah dihilangkan kelembabannya dibawa oleh system of troughs dan saluran air ke kolam sekitar pemisah dan kemudian menuju downcomer annulus antara chimney dan reactor vessel wall. Gerakan

radial dari pengering dikendalikan blowdown dan beban seismic dibatasi oleh penopang bracket pada bejana dan hold down bracket berada di dalam closure head RPV.



Gambar 2.9 : Skema Aliran Uap Melalui Pengering

20. DPV/IC Outlet and IC Return

Ada empat saluran berdiameter 450 mm di sekitar RPV untuk koneksi ke masing-masing empat Isolation Condenser (IC) subsistem dan delapan Depressurization Valves (DPV). IC nozel berdiameter 200 mm.

21. Gravity Driven Cooling System (GDCS) Inlet

Ada delapan saluran berdiameter 150 mm di sekitar RPV untuk dihubungkan ke masing-masing empat GDCS di jalur jection. Selain itu,

pembatas arus dengan bentuk venture dirancang dalam setiap nozzle untuk membatasi aliran dalam hal memberitahukan jalur GDCS break.

22. GDCS Equalizing Line Inlet

Ada empat saluran berdiameter 150 mm di sekitar RPV untuk dihubungkan ke masing-masing empat GDCS di jalur injection. Selain itu, pembatas arus dengan bentuk venture dirancang dalam setiap nozzle untuk membatasi aliran dalam hal memberitahukan jalur GDCS break.

23. Reactor Water Cleanup/Shutdown Cooling (RWCU/SDC)

Ada dua saluran berdiameter 300 mm disediakan untuk dihubungkan ke masing-masing dari Reactor Water Cleanup/Shutdown Cooling (RWCU/SDC) system.

2.4.2. Sistem Kontrol Batang Kendali (*Control Rod Drive System*)

Sistem control batang kendali mengubah reaktivitas teras selama proses operasi daya dengan mengubah-ubah posisi batang kendali penyerap neutron pada teras dengan kenaikan yang sesuai. Sistem CRD memberikan respon yang cepat kepada batang kendali dalam menerima sinyal manual atau otomatis dari *Reactor Protection System* (RPS). Gambar 2.10 menunjukkan konfigurasi sistem dasar dan ruang lingkup. Ketika scram diinisiasi oleh RPS, sistem CRD memasukkan reaktivitas negative yang digunakan untuk menutup reaktor. Setiap batang kendali biasanya dikendalikan oleh unit motor listrik. Ketika sinyal scram diterima, air tekanan tinggi yang disimpan di dalam nitrogen dipakai oleh akumulator untuk menggerakkan batang kendali ke teras. Bersamaan dengan itu, control batang kendali dimasukkan melalui motor listrik. Dengan demikian, tindakan scram hidrolik sebagai back up untuk memberikan energi listrik ke batang kendali.

sebuah HCU. Sebuah HCU dibutuhkan scram untuk dua FMCRD. HCU juga dibutuhkan untuk pembersihan jalur aliran yang berhubungan dengan drive selama operasi normal. Sedangkan CRDHS memiliki persediaan air bertekanan yang dibutuhkan untuk pengisian akumulator scram HCU dan membersihkan dengan FMCRD. Persediaan air tekanan tinggi yang dimiliki CRDHS akan digunakan RPV pada saat transient tertentu.

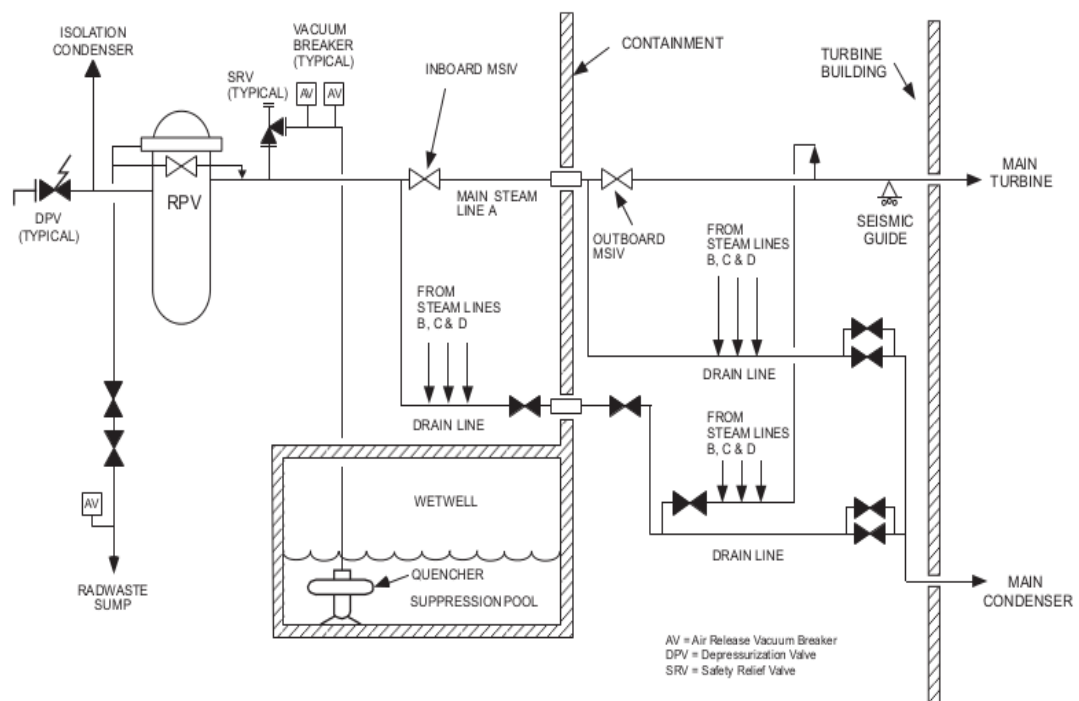
2.4.3. Nuclear Boiler System (NBS)

NBS berfungsi untuk memindahkan aliran uap dari *steam nozzle outlet* RPV ke turbin utama, memindahkan *preheated feedwater* dari kondensat dan sistem feedwater kembali ke RPV, memberikan perlindungan *overpressure* pada *Reactor Coolant Pressure Boundary* (RCPB), dan menyediakan instrumentasi boiler nuklir (tingkat, tekanan, suhu dan aliran) sinyal ke sistem komputer proses pembangkit. Sebuah pembatas aliran pipa uap utama disediakan di setiap *steam outlet nozzle*. Hal tersebut dirancang untuk membatasi laju aliran dalam hal memberitahukan pipa uap break.

1. Main Steam Subsystem (MS)

Dalam desain ESBWR, memiliki empat *steam lines* dengan diameter 750 mm untuk mengangkut uap dari *steam outlet nozzle* pada RPV melalui *Reinforced Concrete Containment Vessel* (RCCV) penetrasi dan kemudian melalui terowongan uap ke turbin. *Main Steam Isolation Valves* (MSIV) dipasang di setiap *papan steam line* dan di luar RCCV penetrasi. Ada sepuluh *Safety/Relief Valves* (SRV) dipasang secara vertikal pada *main steam line*. Katup ini menyediakan *Automatic Depressurization System* (ADS) yang berfungsi dalam kondisi kecelakaan, dan *discharge* dari setiap SRV disalurkan melalui jalur yang terkait dengan *discharge*

SRV menuju pemadam yang terletak di kolam supresi. Sedangkan delapan *Safety Valves* (SV) adalah semi otomatis hanya untuk memberikan perlindungan *overpressure* dalam kejadian *Anticipated Transient Without Scram* (ATWS). *Discharge* dari masing-masing katup tersebut disalurkan menuju tumpukan, *discharge* diorientasikan secara vertikal yang terletak di *drywell* dan dilengkapi dengan rupture disk di ujungnya. Selain itu, MS ini dilengkapi dengan delapan *Depressurization Valves* (DPV). Katup ini akan bergerak selama terjadi LOCA dan *discharge* secara langsung ke *drywell* tersebut. Dua katup yang terletak dimasing-masing empat *stub tubes*, yang juga menyediakan uap untuk empat IC. Gambar 2.11 adalah skema diagram pipa sederhana dari MS.



Gambar 2.11: Skema Diagram Pipa Main Steam Subsystem

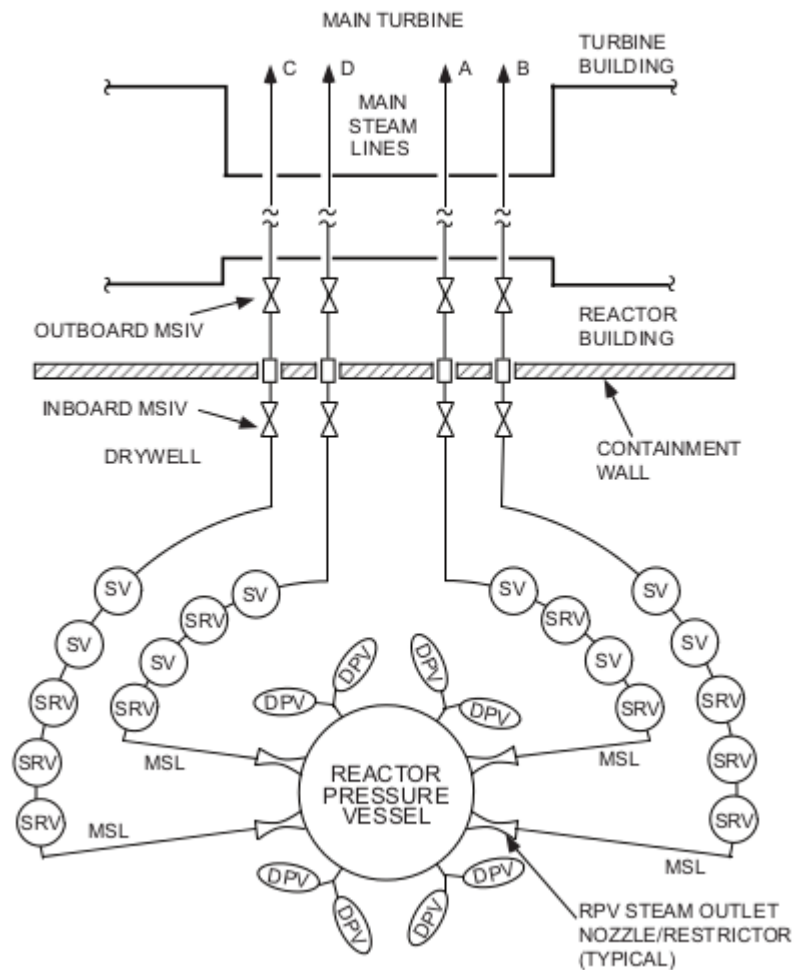
2. *Main Steam Isolation Valve (MSIV)*

Katup isolasi uap utama adalah (MSIV) adalah sistem yang mengindikasikan gagal-aman yang mengisolasi jalur uap utama selama dalam kondisi normal, tidak normal, dan kecelakaan pada berbagai tekanan reaktor dan kondisi aliran. Sistem ini terdiri dari delapan MSIV, empat pasang bersamaan di main steam line dengan satu katup terpasang didalam bejana dari containment, dan satu katup lagi terpasang di bagian luar dari containment. MSIV memberikan isolasi pada *main steam line* untuk energy besar line break, untuk penahanan isolasi, dan diperlukan selama kondisi pembangkit dalam keadaan mati. MSIV dirancang untuk melewati tingkat aliran steam dalam rancangan penurunan tekanan, dan membatasi jalur uap LOCA inflow untuk melindungi containment sampai katup tertutup. Sistem ini secara skematis diperlihatkan pada gambar 2.11.

2.4.4. *Safety/Relief Valves (SRV) and Safety Valves (SV)*

Sebuah SRV pada prinsipnya mempunyai fungsi ganda, sebagai katup yang bekerja langsung dan sebagai katup keselamatan. dalam ESBWR terdapat sepuluh katup SRV yang meliputi akumulator dan aktuator pneumatic yang diperlukan sebagai penggerak otomatis atau manual selain untuk pembukaan pada tekanan pegas (fungsi ganda). Delapan katup (SV) tidak termasuk aktuator ekstra dan pembukaan pada tekanan pegas saja (bertindak langsung). SRV dan SV merupakan sebagai bagian dari RCPB karena sisi inlet katup yang terhubung ke jalur uap sebelum ke dalam bagian MSIV (gambar 2.12). ADS-SRV logika dan tiga solenoid juga diklasifikasikan dan memenuhi syarat sebagai keamanan sesuai standar IEEE.

Klasifikasi ini juga diterapkan pada fungsi ADS dan sistem terkait lainnya. Solenoid keempat tergolong nonsafety dan dimulai dari berbagai sistem protection .

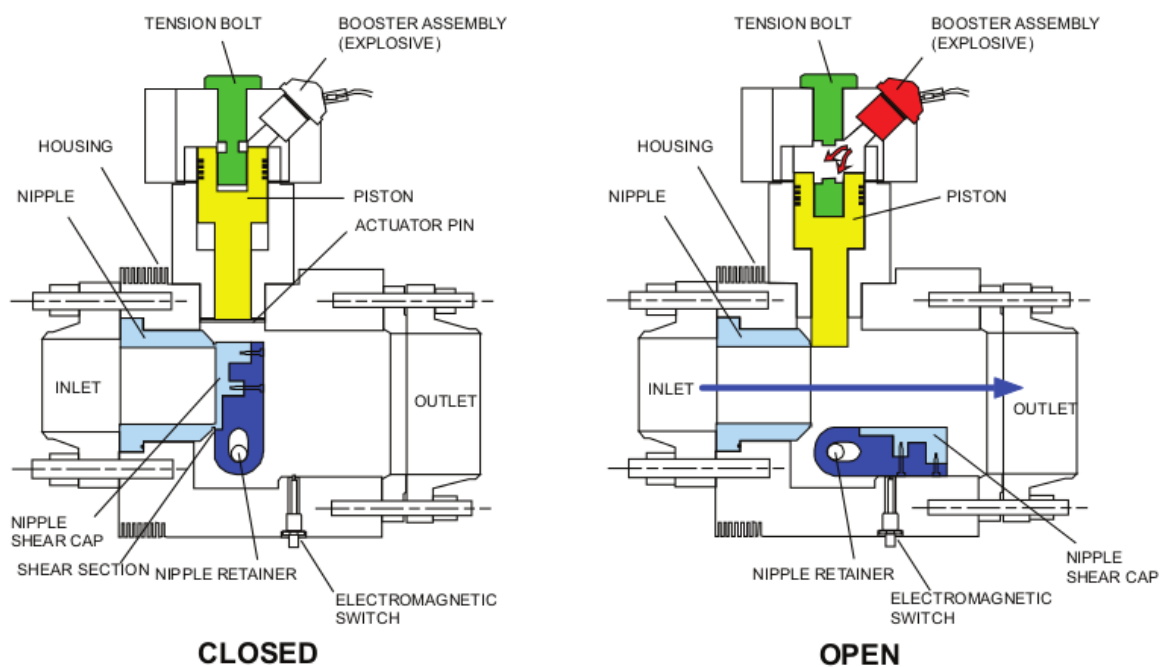


Gambar 2.12 : MSIV, SRV/SV and DPV Configuration

2.4.5. Depressurization Valves (DPV)

Terdapat delapan DPV dalam PLTN tipe ESBWR terletak di jalur perpotongan (Gambar 2.12) yang tujuan utamanya adalah untuk membantu subsistem ADS dalam mengurangi tekanan cepat RCPB selama terjadi LOCA agar tekanan pada ECCS rendah yang bertujuan untuk menambahkan air pada RPV. DPV dirancang untuk anti dari kebocoran, anti didih, dan tidak perlu pemeliharaan (gambar 2.13).

ukuran katup sekitar dua kali dari kapasitas yang dimiliki SRV. Setiap DPV ditutup penutup yang menutupi ruang inlet. Tutup akan tidak bekerja ketika didorong oleh plunger katup yang digerakkan oleh pemicu ledakan. Hal tersebut akan membuka lubang inlet melalui konektor. DPV dirancang agar tidak ada kebocoran dibagian penutup selama katup digunakan.

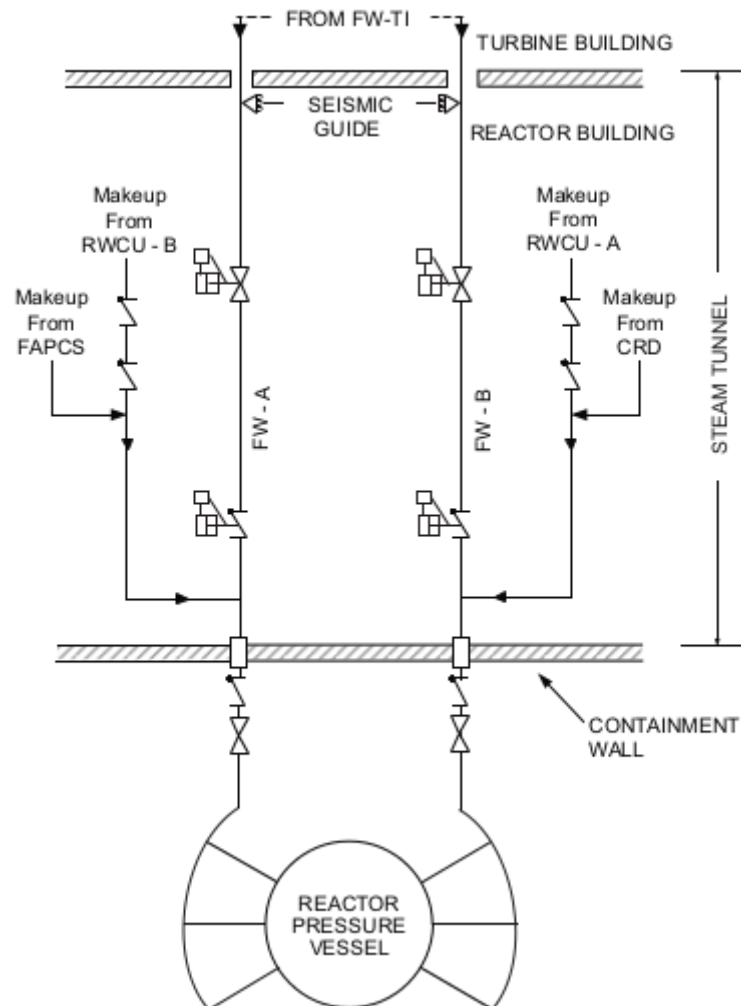


Gambar 2.13: *Depressurization Valve (DPV)*

2.4.6. Feedwater Subsystem (Nuclear Island)

Terdapat 2 pipa feedwater berdiameter 550 mm yang mengangkut feedwater dari pipa feedwater yang ada di terowongan uap melalui RCCV menuju header horizontal di drywell atas, yang memiliki 3 pipa berdiameter 300 mm yang terhubung ke nozzle pada RPV (Gambar 2.14). katup isolasi dipasang diatas dan dibawah dari RCCV, dua katup lainnya dipasang untuk memberikan perlindungan cepat dari feedwater line break untuk membatasi jumlah air tambahan yang ditambahkan ke containment. Gambar 2.14 menunjukkan interkoneksi dari Reactor Water Cleanup /

Shutdown Cooling System (RWCU/SDC), CRD and Fuel and Auxiliary Pools Cooling System (FAPCS).



Gambar 2.14: *Feedwater Configuration (Nuclear Island)*

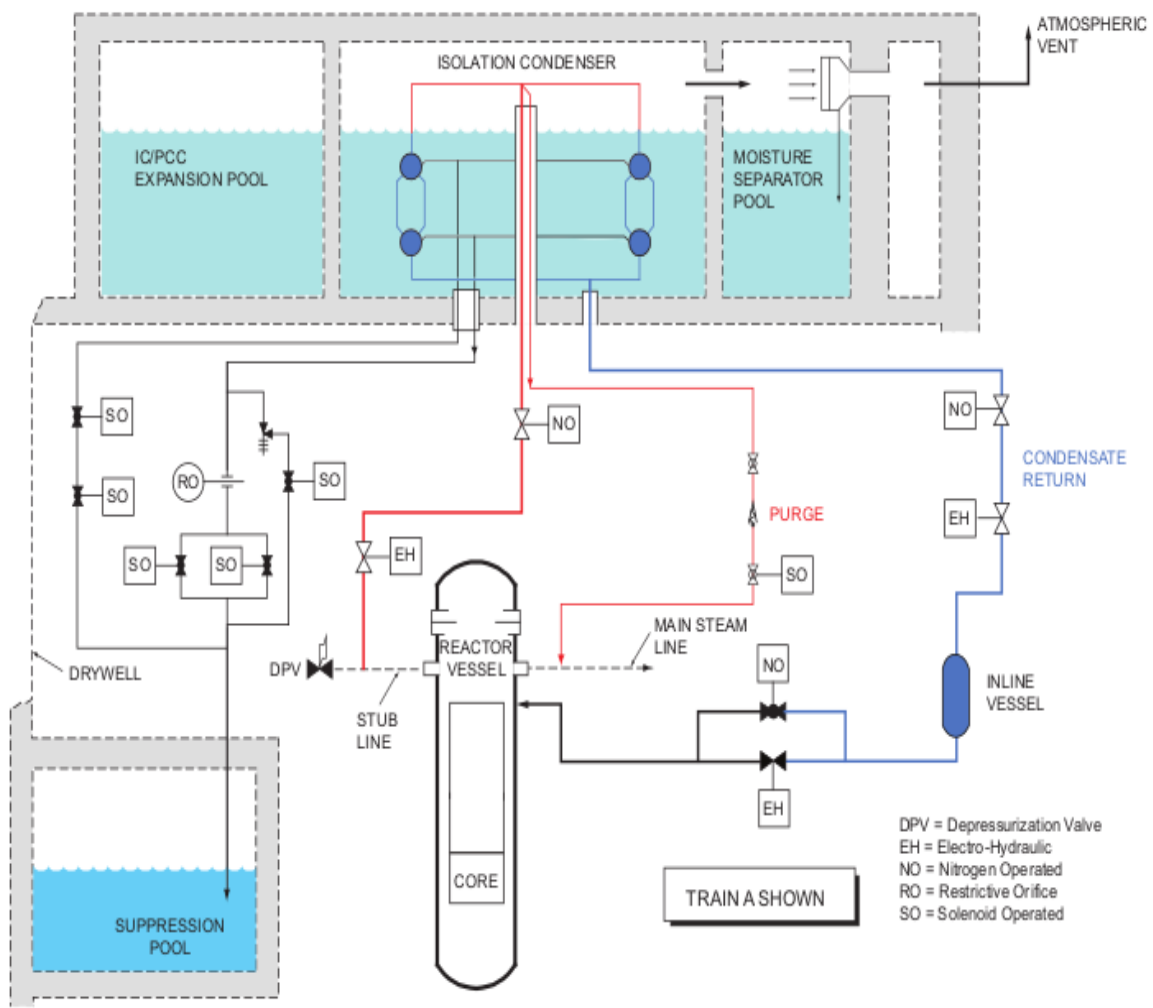
2.5. Sistem Keselamatan (*Safety System*) ESBWR

2.5.1. *Isolation Condenser System (ICS)*

Ada beberapa fungsi yang disediakan oleh ICS, yaitu ICS berfungsi membatasi tekanan reaktor dan menekan peningkatan tekanan transien sebelum mencapai setpoint dari SRV, meminimalkan jumlah siklus operasi SRV mengikuti

isolasi jalur uap utama. ICS bersama-sama dengan air yang tersimpan di RPV untuk menghemat volume pendingin reaktor yang cukup untuk menghindari depressurization otomatis yang disebabkan oleh ketinggian air reaktor rendah selama transien atau sistem blackout. ICS menghilangkan kelebihan teras peluruhan panas dari reaktor dengan cara pasif dan dengan mengurangi kehilangan persediaan pendingin dari reaktor ketika sistem pembuangan panas yang normal tidak tersedia. ICS ini dirancang sebagai sistem yang terkait dengan keselamatan untuk menghapus reaktor panas peluruhan berikut pemadaman reaktor dan isolasi. Hal ini untuk menghindari bantuan dari reaktor bertekanan dan operasi ECCS yang juga dapat melakukan fungsi ini.

ICS terdiri dari empat totally independent train, masing – masing berisi IC yang mengembun uap pada sisi tabung dan mentransfer panas ke Isolation Condenser besar/Passive Containment Cooling System (IC/PCCS) kolam terletak di luar containment yang dibuang ke atmosfer seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.15 skema ICS. IC dihubungkan dengan pipa ke RPV yang ditempatkan pada ketinggian di atas sumber uap (bejana) dan ketika uap terkondensasi kondensat dikembalikan ke RPV melalui pipa kondensat kembali. Koneksi sisi uap antara bejana dan IC pada saat keadaan normal akan terbuka dan jalur kondensat pada saat kondisi normal akan tertutup. Hal ini memungkinkan IC menguras pipa dan dalam jalur tangki penyimpanan air sesuai untuk mengisi dengan kondensat yang dipertahankan pada suhu *subcooled* oleh air kolam selama operasi reaktor normal. IC memulai operasi dengan membuka katup kondensat kembali dan menguras kondensat ke reaktor, sehingga menyebabkan uap dari reaktor mengisi tabung dan mentransfer panas menjadi dingin didalam air kolam.

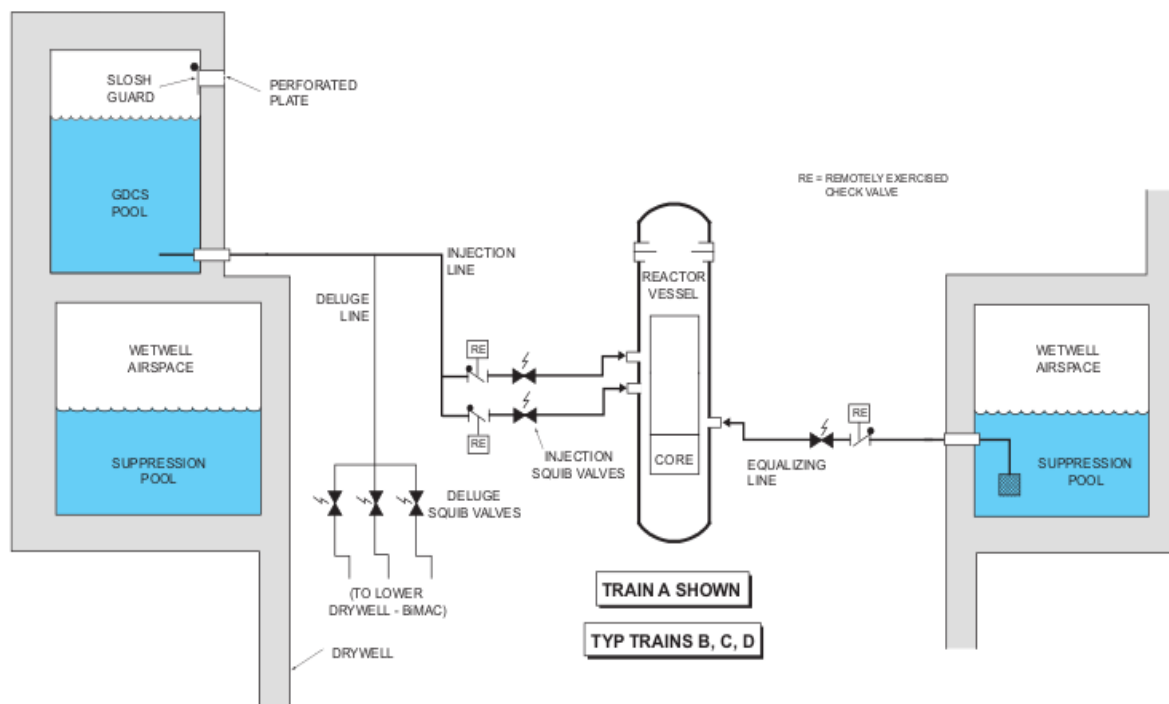


Gambar 2.15: *Isolation Condenser System (Standby Mode)*

2.5.2. Gravity Driven Core Cooling System (GDCCS)

GDCCS terdiri dari empat train mekanik dan keempat bagian listrik. Sebuah train tunggal GDCCS terdiri dari tiga subsistem independent yaitu pendinginan jangka pendek (*injection*) sistem, pendinginan jangka panjang (*equalizing*) sistem dan saluran banjir (*Deluge Line*). Sistem jangka pendek dan jangka panjang menyediakan air pendingin dibawah gaya gravitasi untuk mengganti persediaan air RPV yang hilang selama terjadi LOCA dan kerusakan diakibatkan panas peluruhan.

Saluran banjir (*Deluge Line*) menghubungkan kolam GDCS dengan drywell rendah, lihat gambar 2.16. Setiap susunan dari sistem *injection* GDCS terdiri dari satu pipa keluaran dari kolam GDCS berdiameter 200 mm. Saluran *injection* terhubung langsung setelah saluran banjir berhubungan dengan wilayah yang kering melewati *drywell annulus* dimana saluran bercabang menjadi dua dengan diameter 150 mm dan masing – masing cabang saluran terdiri dari biased-open check valve dan squib valve. Setiap susunan dari sistem jangka panjang terdiri dari saluran yang sama berdiameter 150 mm dengan *check valve* dan *squib valve*, diarahkan antara kolam bertekanan dan RPV. Semua sistem pemipaan itu terbuat dari bahan stainless steel dan disesuaikan untuk reaktor bertekanan dan temperatur.

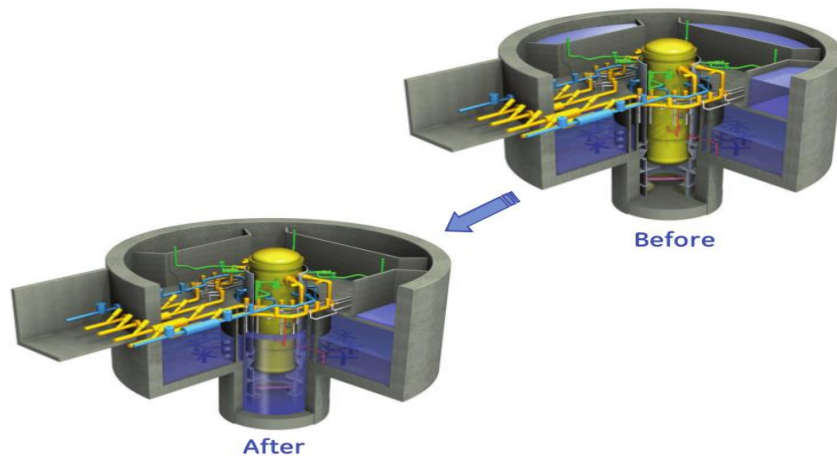


Gambar 2.16 : Skema Sistem Gravity Driven Cooling

Jalur *nozzle injection* RPV dan jalur *nozzle* yang sama semuanya berisikan pembatas aliran yang telah diperlukan. Dalam jalur *injection* dan jalur yang sama

terdapat katup bias terbuka yang terletak dialiran atas dari *squib valve* yang digerakkan. Katub GDCS *squib* adalah tipe katup geser gas propellant yang terbuka secara normal dan yang terbuka ketika *booster pyrotechnic* pengisi dinyalakan. Selama operasi reaktor normal, *squib valve* dirancang agar tidak bocor. Ketika katup *squib* digerakkan sehingga menyediakan jalur aliran yang terbuka permanen menuju RPV. Check valve mengurangi konsukuensi terjadinya operasi GDCS *squib valve* yang tidak biasa, meminimalkan hilangnya persediaan air pada RPV setelah *squib valve* digerakkan dan tekanan RPV masih lebih tinggi dibanding kolam *GDCS pressure* dan *head gravity*. Ketika RPV mengalami penurunan tekanan dibawah tekanan permukaan kolam GDCS dan head gravity, differential pressure akan membuka *check valve* dan memungkinkan air untuk mulai mengalir ke RPV. Gambar 2.17 menunjukkan simulasi 3D dari proses GDCS.

Saluran GDCS *deluge* menyediakan cara untuk membanjiri daerah terbawah dari drywell dengan air kolam GDCS dalam kejadian yang sudah diperkirakan bagian meleleh secara berturut-turut yang disebabkan kegagalan pada head RPV yang lebih rendah dan membiarkan bahan bakar yang meleleh mencapai lantai drywell yang lebih rendah. Dan bagian yang meleleh perlahan-lahan akan menunjukkan hasil dari kegagalan yang biasa terjadi dari sistem jangka pendek dan jangka panjang, yang menghalangi kinerja dari fungsi yang dimaksud. Aliran pada saluran *deluge* dapat diketahui dengan *thermocouple* yang bisa mendeteksi tinggi rendah bagian drywell temperatur lapisan bawah menunjukkan bahan bakar yang meleleh pada drywell lantai yang lebih rendah. Katup tipe *squib* pada saluran *deluge* digerakkan berdasarkan temperatur level bawah yang tinggi. Saluran *deluge* tidak diperlukan pada saat katup *squib* berada pada jalur injection dari pemipaan GDCS untuk kinerja fungsi tersebut.



Gambar 2.17 : *Simulasi 3D dari Proses GDCS*

2.5.3. *Passive Containment Cooling System (PCCS)*

Passive Containment Cooling System (PCCS) merupakan sistem keselamatan pasif pada ESBWR yang bekerja menggunakan kolam pada tempat yang lebih tinggi sebagai media pengambil panas. Uap yang dihisap ke containment akan mengalami kondensasi pada permukaan tabung kondenser containment sehingga menyebabkan supresi tekanan dan menyediakan pendingin bagi containment.

2.5.4 *Automatic Depressurization System (ADS)*

Automatic Depressurization System (ADS) merupakan katup yang akan aktif secara otomatis jika sinyal level air pada RPV rendah selama 10 detik. SRV dan DPV merupakan bagian dari katup ADS yang menerima sinyal inisiasi dari tiga bagian yang terkait dengan keselamatan dan juga *Diverse Protection System (DPS)*, dengan asumsi jika satu bagian tidak tersedia karena pemeliharaan maka bagian lain bisa membackupnya.

