

PERBANDINGAN TIPE TEKANAN *EMERGENCY CORE COOLING SYSTEM* PADA *SMALL MODULATOR REACTOR*

NATHANIEL EZER PUTRA DARMAWAN^{1,*}, G.B. HERU K², DEDI HARYANTO², GIARNO², I NYOMAN
SUPRAPTA WINAYA¹, I KETUT GEDE SUGITA¹ DAN MULYA JUARSA²

¹Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Udayana Jl.Raya Kampus UNUD,
Bukit Jimbaran, Kuta Selatan, Kabupaten Badung, Bali 803611

²Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir, Badan Tenaga Nuklir Nasional, Gedung 80,
Kawasan Puspiptek, Serpong, Tangerang Selatan 15130

Abstrak. *Small modular reactor* merupakan salah satu teknologi yang terus dikembangkan oleh berbagai negara. *Small modular reactor* merupakan salah satu pengembangan teknologi reaktor nuklir yang memiliki ukuran lebih kecil dan fitur keamanan yang lebih baik. Salah satu fitur keamanan yang lebih baik pada *small modular reactor* adalah sistem pendinginnya. Sistem pendinginan pada *small modular reactor* terbagi menjadi dua jenis, yaitu sistem pendingin aktif dan sistem pendingin pasif. Banyak sistem pendingin pasif sedang dikembangkan melalui beberapa penelitian dan pengembangan untuk diaplikasikan ke *small modular reactor* yang ada, contohnya seperti *emergency core cooling system* bertekanan tinggi dan *emergency core cooling system* bertekanan rendah. Makalah ini dibuat dengan tujuan untuk menunjukkan perbedaan dari kedua jenis *emergency core cooling system* tersebut. Metode penelitian yang digunakan adalah studi dokumen dengan membandingkan kedua tipe *emergency core cooling system* tersebut dan beberapa *small modular reactor* yang menggunakan *emergency core cooling system* bertekanan rendah dan bertekanan tinggi. Hasil analisis menunjukkan perbandingan dari beberapa *small modular reactor*, maka diketahui bahwa yang memiliki kinerja lebih baik adalah *emergency core cooling system* yang bertekanan tinggi.

Kata kunci: *small modular reactor; emergency core cooling system; tekanan tinggi; tekanan rendah; sistem pendinginan*

Abstract. *Small modular reactor* is a technology that being developed by many countries. *Small modular reactor* is a development of nuclear reactor that has smaller size and more advanced safety features. Cooling system in *small modular reactor* is an example of more better safety feature in *small modular reactor*. There are two types of *small modular cooling systems*, those are active cooling system and passive cooling system. Many passive cooling systems is being developed by some researches and development to apply to the *small modular reactor*, as examples, high pressure *emergency core cooling system* and low-pressure *emergency core cooling system*. This paper is made in purpose to show the difference between these two types of *emergency core cooling system*. The research method that is using by the writer is document studies by comparing those *emergency core cooling system* type and some type of *small modular reactors* which used high pressure and low-pressure *emergency core cooling system*. The result of the analysis that show the comparison from some *small modular reactor*, knowing that high pressure *emergency core cooling system* has better performance.

Keywords: *small modular reactor; emergency core cooling system; high pressure; low pressure; cooling system*

1. Pendahuluan

PLTN merupakan sistem pembangkit listrik yang menggunakan reaktor nuklir sebagai pembangkit listriknya. Cara kerja dari PLTN ini hampir sama seperti cara kerja PLTU pada umumnya, yang membedakan PLTN dengan PLTU ini adalah sumber panas yang dihasilkan oleh PLTN. Reaktor nuklir sendiri menggunakan uranium sebagai bahan utamanya yang akan direaksikan dan kemudian menghasilkan panas yang besar yang akan menghasilkan uap lalu uap tersebut digunakan untuk memutar turbin yang menghasilkan listrik. Reaksi yang terjadi pada reaktor nuklir tidak

*Email : ezermaster08@gmail.com

menghasilkan emisi atau *zero waste* sehingga PLTN dianggap sebagai salah satu pembangkit listrik yang ramah lingkungan.

Seiring dengan meningkatnya jumlah daya listrik yang dibutuhkan di berbagai negara, reaktor nuklir sebagai salah satu teknologi pembangkit listrik yang ramah lingkungan mulai dikembangkan. Berbagai teknologi pengembangan reaktor nuklir telah dilakukan, dan salah satu hasilnya adalah *small modular reactor*. *Small modular reactor* merupakan reaktor nuklir dengan ukuran yang lebih kecil dari reaktor nuklir pada umumnya. Kelebihan lain yang dimiliki oleh *small modular reactor* adalah fitur keamanan yang dimiliki lebih baik dibandingkan reaktor nuklir pada umumnya. Salah satu fitur keamanan yang lebih baik yang dimiliki oleh *small modular reactor* adalah sistem pendinginnya.

Awalnya reaktor nuklir hanya menggunakan satu sistem pendingin yang digunakan untuk mendinginkan reaktor saat beroperasi, namun ada beberapa kejadian dimana sistem pendingin reaktor tidak dapat mendinginkan reaktor secara maksimal sehingga menyebabkan kegagalan fungsi pada reaktor. Salah satu kejadian yang masih cukup diingat adalah meledaknya reaktor nuklir yang digunakan sebagai PLTN di daerah Fukushima, Jepang [1]. Akibat adanya kejadian tidak terduga, yaitu bencana alam, mengakibatkan satu-satunya sistem pendingin pada reaktor tersebut mati dan akhirnya reaktor tersebut meledak akibat panas yang dihasilkan terlalu tinggi [1].

Mengantisipasi kejadian-kejadian serupa, selanjutnya rancangan berbagai jenis teknologi reaktor nuklir, termasuk *small modular reactor*, mulai dikembangkan dengan menggunakan sistem pendingin pasif di dalamnya yang berperan sebagai sistem pendinginan cadangan untuk keperluan darurat. Hal ini dilakukan untuk mencegah terjadinya panas berlebih pada reaktor apabila terjadi kegagalan sistem pada sistem pendingin aktif (utama). Salah satu sistem pendingin pasif yang banyak digunakan adalah *Emergency Core Cooling System (ECCS)*. *ECCS* terdiri dari 2 tipe yaitu bertekanan tinggi dan bertekanan rendah [2]. Kedua tipe *ECCS* tersebut merupakan *core cooling system* yang bekerja secara alami tanpa bantuan daya dari reaktor maupun listrik [2].

Makalah ini dibuat dengan tujuan mengidentifikasi kedua tipe *ECCS* tersebut. Melalui studi dokumen yang akan dilakukan, diharapkan makalah ini mampu membahas hal tersebut dan memberikan informasi mengenai efektivitas terhadap kedua jenis *ECCS* tersebut. Makalah ini juga diharapkan mampu memberikan gambaran terhadap tipe *ECCS* yang tepat untuk digunakan pada suatu jenis *SMR* nantinya.

2. Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan dalam penulisan ini adalah metode penelitian studi dokumen. Sumber informasi yang digunakan dalam penulisan ini berupa artikel, jurnal, maupun buku, baik berupa fisik maupun non-fisik (dokumen elektronik), serta sumber informasi yang didapat dari *website*. Penulis menggunakan penelitian induktif pada penulisan artikel ini dimana penulis meneliti dan menjabarkan mengenai informasi dari topik yang akan diangkat dalam artikel terlebih dahulu, kemudian menarik kesimpulan dan hasil berdasarkan informasi yang didapatkan.

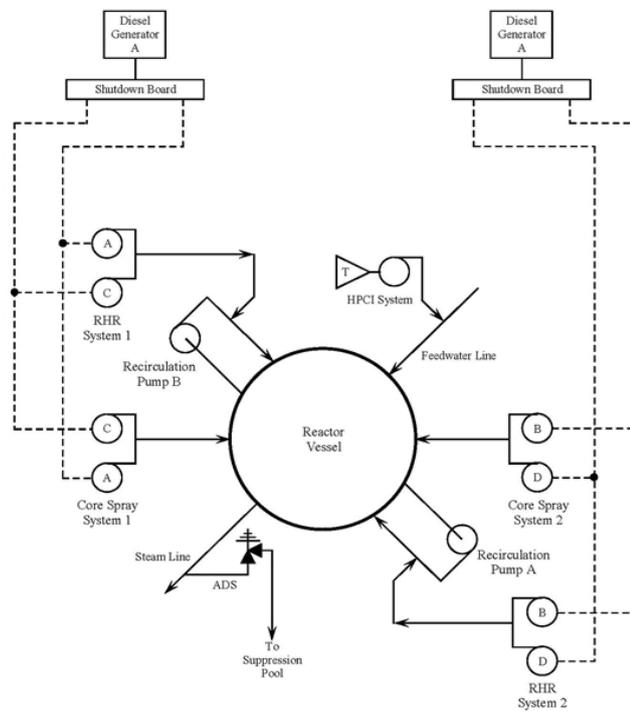
3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil

Setelah meninjau berbagai macam sumber, didapatkan bahwa *Emergency Core Cooling System (ECCS)* bertekanan tinggi memiliki keunggulan dibandingkan *ECCS* bertekanan rendah. Hal tersebut disebabkan karena *ECCS* bertekanan tinggi mampu menyalurkan zat pendingin (air) ke dalam bejana yang memiliki tekanan yang tinggi maupun yang rendah, sedangkan *ECCS* bertekanan rendah hanya mampu menyalurkan zat pendingin ke bejana yang bertekanan rendah (setelah dikurangi tekanannya). Meskipun demikian, kedua tipe *ECCS* itu sudah banyak digunakan di seluruh dunia, baik pada reaktor-reaktor nuklir yang telah beroperasi, maupun pada reaktor-reaktor nuklir yang masih dalam proses pembangunan atau perancangan.

***Emergency Core Cooling System* dan pembagian jenisnya berdasarkan tipe tekanannya**

Emergency Core Cooling System (ECCS) merupakan salah satu sistem pendingin pasif dalam reaktor nuklir. *ECCS* akan digunakan ketika terjadi *Loss of Coolant Accident (LOCA)* pada reaktor dengan tujuan untuk menghindari kerusakan bahan bakar dengan cara menginjeksi sejumlah besar zat pendingin (berupa air atau *boric acid*) ke dalam sistem pendingin reaktor. *ECCS* juga berfungsi untuk memastikan reaktor dalam keadaan berhenti beroperasi dengan memberikan racun neutron. *ECCS* memiliki 5 kriteria dalam standarisasi fungsinya sebagai sistem pendingin pasif pada sebuah reaktor. Kelima kriteria tersebut meliputi, *ECCS* harus mampu mencegah suhu kelongsong bahan bakar melebihi 2200 °F, mencegah oksidasi kelongsong bahan bakar lebih dari 17%, mencegah produksi hidrogen teoritis lebih dari 1% karena adanya reaksi air-logam zircalloy, mampu melakukan pendinginan jangka panjang dan mampu mempertahankan bentuk atau geometri yang mampu mendinginkan [2]. Setiap komponen pada *ECCS* harus terintegrasi dengan baik agar dapat beroperasi secara maksimal. Untuk mengetahui bagaimana hubungan antar sistem pada *ECCS*, perhatikan Gambar 1.



Gambar 1. Hubungan antar sistem pada Emergency Core Cooling System [2]

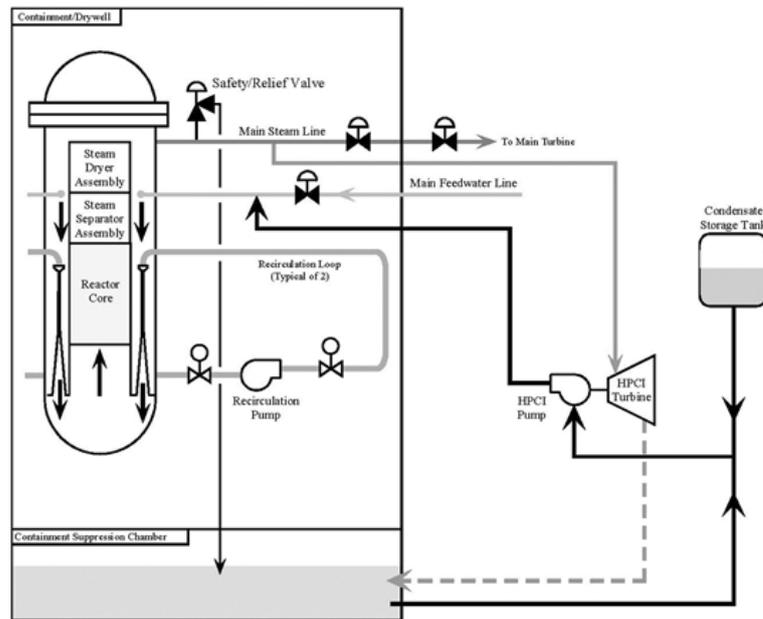
Dari Hubungan antar sistem pada Gambar 1 ditunjukkan bahwa setiap komponen akan terhubung ke masing-masing *coolant*, baik *core spray system*, *Residual Heat Removal (RHR) system*, maupun *High-Pressure Coolant Injection (HPCI) system*.

Gambar 1 merupakan Gambar yang menunjukkan secara lengkap komponen-komponen yang ada pada ECCS, namun sebenarnya ECCS terbagi menjadi dua jenis jika dibagi berdasarkan tekanannya. Yaitu *Emergency Core Cooling System* bertekanan tinggi dan *Emergency Core Cooling System* bertekanan rendah. Perbedaan utama antara ECCS yang bertekanan tinggi dengan ECCS bertekanan rendah adalah ECCS bertekanan rendah akan menginjeksikan air ke dalam bejana saat tekanan sudah diturunkan, sedangkan ECCS bertekanan tinggi mampu menginjeksikan air ke dalam bejana saat bejana memiliki tekanan yang tinggi atau saat tekanan di bejana sedang bertambah.

Emergency Core Cooling System Bertekanan Tinggi (High Pressure Emergency Cooling System)

Emergency Core Cooling System (ECCS) bertekanan tinggi merupakan sistem ECCS yang berdiri sendiri. Artinya sistem ini tidak memerlukan tambahan daya AC atau sistem air pendingin eksternal untuk membantu fungsinya menyediakan air pengganti ke bejana reaktor untuk mengantisipasi kecelakaan kehilangan cairan pendingin skala kecil ataupun skala menengah [3]. Terdapat 2 sistem yang umumnya ada dalam sistem ECCS bertekanan tinggi, yaitu *High Pressure Coolant Injection (HPCI) System* dan *Automatic Depressurization System (ADS)*. HPCI dapat menginjeksikan air tambahan ke bejana reaktor yang memiliki tekanan di atas rata-rata ke bejana yang memiliki tekanan rendah [3]. Sistem HPCI memiliki pengaturan tekanan pada nilai 12,41 MPa.

Selain HPCI, *Automatic Depressurization System (ADS)* juga merupakan bagian dari ECCS bertekanan tinggi. ADS adalah sistem otomatis aktuator yang membuka atau menutup katup secara otomatis untuk mengurangi tekanan dalam reaktor. Perhatikan Gambar 2 ini untuk detail dari hubungan antar komponen pada *Emergency Core Cooling System* bertekanan tinggi.



Gambar 2. Hubungan komponen Emergency Core Cooling System bertekanan tinggi [3]

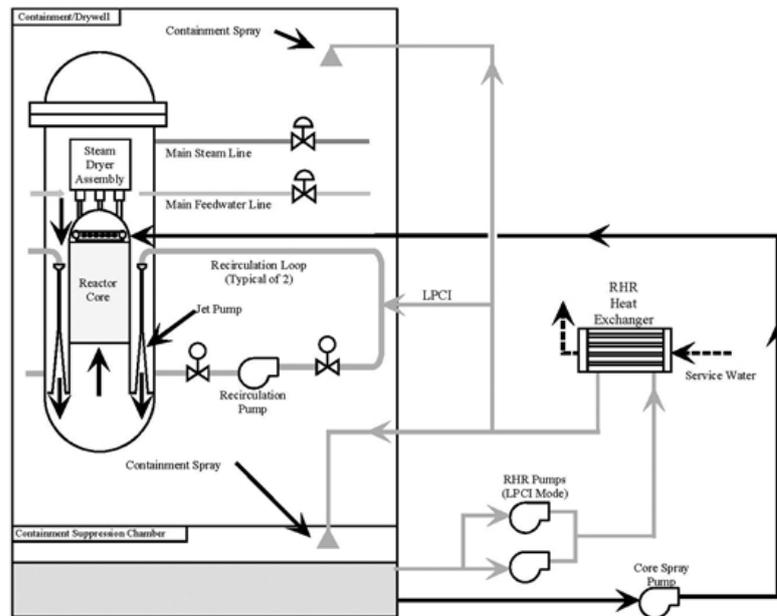
Gambar 2 memperlihatkan siklus dari ECCS bertekanan tinggi. Pada siklus ini bagian-bagian yang perlu diperhatikan adalah setiap pompa, *feedwater line* dan turbin, karena pada dasarnya komponen ini merupakan komponen yang membuat air bergerak dan mengarahkan air untuk mendinginkan reaktor.

Emergency Core Cooling System Bertekanan Rendah (Low Pressure Emergency Core Cooling System)

Emergency Core Cooling System Bertekanan Rendah terdiri dari dua sistem terpisah dan independen, yaitu *Core Spray System* dan mode *Low Pressure Coolant Injection (LPCI)* dari sistem pembuangan panas sisa [4]. *Core Spray System* terdiri dari dua *loop* pemompaan terpisah dan independen, masing-masing mampu memompa air dari kolam penekan ke dalam bejana reaktor [4]. LPCI diatur pada tekanan 1,03 MPa dan digunakan pada saat *Residual Heat Removal (RHR)*.

Selain LPCI, pada ECCS bertekanan rendah juga terdapat *Containment Spray System* yang merupakan sistem yang terdiri dari serangkaian pompa dan sparger yang menyemprotkan cairan pendingin ke bagian atas struktur penahanan utama. Ini dirancang untuk mengembunkan uap menjadi cairan di dalam struktur penahanan utama untuk mencegah tekanan berlebih dan suhu

berlebih, yang dapat menyebabkan kebocoran, yang diikuti oleh penurunan tekanan yang tidak disengaja. Perhatikan Gambar 3 dibawah ini untuk lebih jelasnya.



Gambar 3. Hubungan komponen Emergency Core Cooling System bertekanan rendah [4]

Komponen pada Gambar 3 ini merupakan komponen yang ada pada ECCS bertekanan rendah. Tentu saja berbeda dengan yang ada pada Gambar 2 sebelumnya dan tentunya lebih kompleks. Komponen pada ECCS tipe ini lebih banyak dari komponen ECCS bertekanan tinggi, dan tentu saja tidak ada kesamaan pada komponen kedua tipe ECCS tersebut.

Perbandingan *Small Modulator Reactor* yang Menggunakan *Emergency Core Cooling System* sebagai sistem pendingin pasif

Banyak reaktor nuklir yang telah dirancang menggunakan *emergency core cooling system* sebagai sistem pendingin pasif. Reaktor tersebut ada yang menggabungkan kedua tipe tekanan atau hanya menggunakan salah satu tipe tekanan ECCS saja. Pada sub-bab ini akan dibandingkan 3 SMR yang menggunakan ECCS sebagai salah satu sistem pendingin pasif-nya.

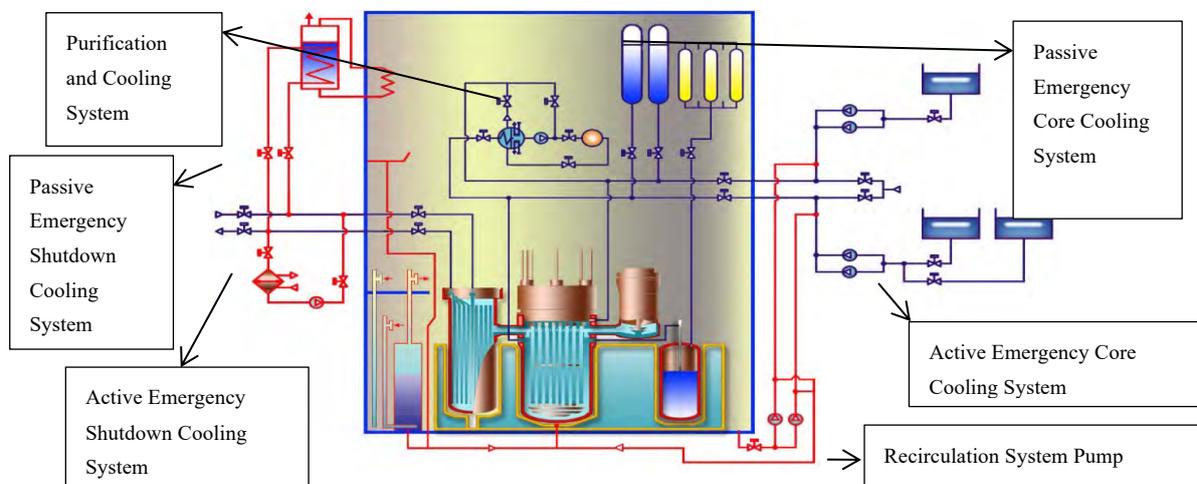
KLT-40S

KLT-40S merupakan *marine based reactor* dan dikembangkan oleh JSC “Afrikantov OKBM”, *Russian Federation* [5]. Status reaktor KLT-40S saat ini merupakan salah satu reaktor yang telah beroperasi [5]. Paparan mengenai parameter teknis utama reaktor ini dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 1. Parameter teknis utama SMR KLT-40S [5]

Parameter Teknis Utama KLT-40S	
Parameter	Nilai
Pengembang dan Negara Asal	JSC "Afrikantov OKBM", Rosatom, <i>Russian Federation</i>
Tipe Reaktor	<i>PWR</i>
Pendingin/Moderator	<i>Light Water/light water</i>
<i>Thermal/Electrical Capacity</i> , MW(t)/MW(e)	150/35
Sirkulasi Primer	Sirkulasi Paksa
Tekanan Operasi NSSS (Primer/Sekunder), MPa	12.7
Temperatur <i>Core Inlet/Inlet</i> Pendingin (°C)	280/316
Jenis Bahan Bakar/Susunan Perakitan	<i>UO₂ pellet in silumin matrix</i>
Jumlah Perakitan Bahan Bakar dalam <i>Core</i> .	121
<i>Fuel Enrichment</i> (%)	18.6
<i>Core Discharge Burnup</i> (GWd/ton)	45.4
Siklus Pengisian Ulang Bahan Bakar (bulan)	30-36
Reaktivitas Kontrol Mekanisme	<i>Control Rod Driving Mechanism</i>
Pendekatan Sistem Keamanan	Aktif (Pasif Sebagian)
Umur Pakai (Tahun)	40
Lahan Pembangunan (m ²)	4320 (PLTN mengambang)
Tinggi <i>RPV</i> /diameter (m)	4.8/2.0
Desain Seismik (<i>SSE</i>)	9 titik di skala MSK
Fitur Pembeda	Unit daya terapung untuk kogenerasi panas dan listrik; tidak ada pengisian bahan bakar di tempat; <i>spent fuel take back</i>
Status Desain	Tersambung ke jaringan listrik di Pevek pada Desember 2019. Mulai beroperasi secara komersial penuh pada Mei 2020.

Pada Tabel 1 dapat dilihat parameter teknis utama mengenai reaktor KLT-40S mulai dari pengembang hingga status reaktor-nya saat ini. KLT-40S merupakan salah satu dari beberapa reaktor yang telah beroperasi yang menggunakan ECCS sebagai fitur keamanan sistem pendingin pasif. ECCS pada reaktor KLT-40S digunakan untuk memasok air ke dalam *core reactor* jika terjadi kecelakaan hilangnya daya pendingin utama, memasok cairan pendingin ke reaktor pada saat ada kegagalan sistem penghentian reaktor elektromekanis, penyesuaian kimia air dan pengujian hidrolik dari sirkuit primer dan sistem terkait [5]. ECCS mencakup subsistem ECCS bertekanan tinggi dengan *makeup*, subsistem ECCS bertekanan tinggi dengan akumulator hidrolik dan subsistem ECCS bertekanan rendah dengan pompa resirkulasi [5]. Untuk lebih jelasnya perhatikan Gambar 4.



Gambar 4. Emergency Core Cooling System pada reaktor KLT-40S [5]

Gambar 4 merupakan nama-nama komponen pada ECCS di reaktor KLT-40S dan hubungan setiap komponen sehingga bisa menjadi kesatuan sistem pendingin yang baik yang mampu bekerja sesuai dengan apa yang diharapkan. Gambar 4 juga menunjukkan bahwa pada reaktor KLT-40S, ECCS dibagi menjadi sistem aktif dan pasif. Dengan memperhatikan penjelasan yang ada, dapat diketahui bahwa reaktor ini menggunakan ECCS bertekanan tinggi dan bertekanan rendah.

NuScale

NuScale merupakan *land-based reactor* yang sedang dikembangkan oleh NuScale Power, LLC, United States of America. 60 MW(e) NuScale Power Module (NPM) menyediakan daya secara bertahap yang dapat diskalakan hingga 720 MW(e) gross dalam satu fasilitas dengan dua belas modul [6]. Setiap NPM adalah modul mandiri yang beroperasi secara independen dari modul lain dalam konfigurasi multi-modul [6]. Setiap modul pada NPM dikendalikan dari satu ruang kendali [6]. Perhatikan tabel berikut untuk melihat lebih jelas paparan mengenai reaktor NuScale.

Tabel 2 menunjukkan spesifikasi lengkap mengenai reaktor NuScale yang sedang dalam tahap peninjauan. Dilihat dari tabel 2, NuScale menghasilkan kapasitas termal sebesar 200 MW(e). Diperlukan sistem pendingin pasif yang mumpuni agar saat terjadi kegagalan pada sistem pendingin utama reaktor tidak berisiko gagal fungsi atau bahkan meledak karena panas yang berlebih. NuScale merupakan salah satu dari beberapa SMR yang menggunakan ECCS sebagai sistem pendingin pasifnya. Dalam NuScale ini katup ECCS-nya terdiri dari 3 katup ventilasi reaktor (RVV) dan 2 katup resirkulasi reaktor (RRV) [7]. RVV terhubung ke bagian atas bejana reaktor bertekanan dan melepaskan uap *pressurizer* [7]. RVV juga melindungi reaktor dari tekanan berlebih selama proses pengoperasian suhu rendah.

ECCS akan mengembalikan cairan pendingin dari *CNV* ke bejana reaktor jika terjadi LOCA dalam *containment* [6]. ECCS menyediakan pembuangan panas peluruhan jika terjadi hilangnya aliran air umpan, dikombinasikan dengan hilangnya kedua rangkaian *Decay Heat Removal System* (DHRS).

ECCS menghilangkan panas dan membatasi tekanan kontainmen dengan kondensasi uap dan perpindahan panas konvektif ke permukaan bagian dalam CNV.

Tabel 2. Nilai dioptri PDMS hasil sintesis

Parameter Teknis Utama NuScale	
Parameter	Nilai
Pengembang dan Negara Asal	NuScale Power, LLC, <i>United States of America</i>
Tipe Reaktor	<i>Integral PWR</i>
Pendingin/ <i>Moderator</i>	<i>Light Water/light water</i>
<i>Thermal/Electrical Capacity</i> , MW(t)/MW(e)	200/60 (<i>gross</i>)
Sirkulasi Primer	Sirkulasi Natural
Tekanan Operasi <i>NSSS</i> (Primer/Sekunder), MPa	13.8/4.3
Temperatur <i>Core Inlet/Inlet</i> Pendingin (°C)	265/321
Jenis Bahan Bakar/Susunan Perakitan	<i>UO₂ pellet/17x17</i> persegi
Jumlah Perakitan Bahan Bakar dalam <i>Core</i> .	37
<i>Fuel Enrichment</i> (%)	<4.95
<i>Core Discharge Burnup</i> (GWd/ton)	>30
Siklus Pengisian Ulang Bahan Bakar (bulan)	30-36
Reaktivitas Kontrol Mekanisme	<i>Control Rod Drive</i> , Boron
Pendekatan Sistem Keamanan	Pasif
Umur Pakai (Tahun)	60
Lahan Pembangunan (m ²)	140000
Tinggi <i>RPV</i> /diameter (m)	17.7/2.7
Desain Seismik (<i>SSE</i>)	0,5 g horizontal dan vertikal 0,4 g akselerasi puncak tanah
Fitur Pembeda	Waktu koping tidak terbatas untuk pendinginan teras tanpa daya AC atau DC, penambahan air, atau tindakan operator
Status Desain	Sedang dibawah peninjauan

SMART

SMART merupakan salah satu SMR yang berasal dari negara Korea Selatan. SMART merupakan *Integral Pressurized Water Reactor* (PWR) dengan daya listrik terukur 107 MW(e) dari 365 MW(t) [8]. Konfigurasi desain pada SMR SMART menggabungkan fitur keselamatan yang melekat dan sistem keselamatan pasif dengan tujuan untuk meningkatkan keselamatan dan kehandalan [8]. Tujuan desain adalah untuk mencapai peningkatan ekonomi melalui penyederhanaan sistem, modularisasi komponen, pengurangan waktu konstruksi dan ketersediaan pabrik yang tinggi [8]. Paparan lengkap mengenai spesifikasi reaktor SMART bisa dilihat pada Tabel 3 di halaman berikutnya.

Berdasarkan status reaktor ini juga merupakan yang cukup tertinggal dari dua reaktor sebelumnya yang mana KLT-40S telah beroperasi dan NuScale sedang dibawah peninjauan. Namun, reaktor ini merupakan salah satu reaktor yang didalam desain-nya terdapat ECCS sebagai salah satu fitur keamanan.

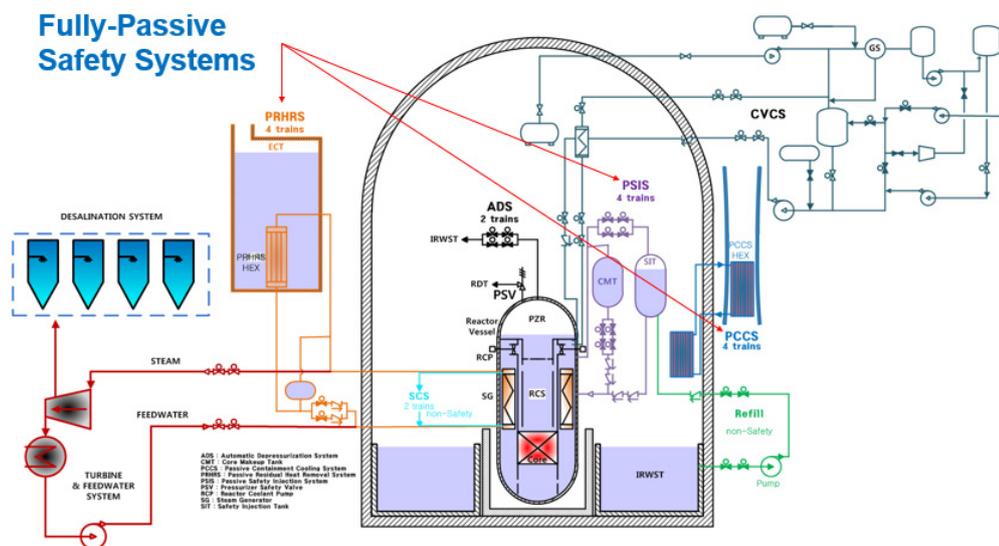
Tabel 3. Parameter teknis utama SMR SMART [8]

Parameter Teknis Utama SMART	
Parameter	Nilai
Pengembang dan Negara Asal	KAERI, <i>Republic of Korea</i> and K.A.CARE, <i>Kingdom of Saudi Arabia</i>
Tipe Reaktor	<i>Integral PWR</i>
Pendingin/Moderator	<i>Light Water/light water</i>
<i>Thermal/Electrical Capacity</i> , MW(t)/MW(e)	365/107
Sirkulasi Primer	Sirkulasi Paksa
Tekanan Operasi NSSS (Primer/Sekunder), Mpa	15/5.8
Temperatur <i>Core Inlet/Inlet</i> Pendingin (°C)	296/322
Jenis Bahan Bakar/Susunan Perakitan	UO ₂ <i>pellet/17x17</i> persegi
Jumlah Perakitan Bahan Bakar dalam <i>Core</i> .	57
<i>Fuel Enrichment</i> (%)	<5
<i>Core Discharge Burnup</i> (GWd/ton)	<54
Siklus Pengisian Ulang Bahan Bakar (bulan)	30
Reaktivitas Kontrol Mekanisme	<i>Control rod driving mechanisms and soluble Boron</i>
Pendekatan Sistem Keamanan	Pasif
Umur Pakai (Tahun)	60
Lahan Pembangunan (m ²)	90000
Tinggi <i>RPV</i> /diameter (m)	18.5/6.5
Berat <i>RPV</i> (metric ton)	1070 (termasuk pendingin)
Desain Seismik (<i>SSE</i>)	> 0,3 g dengan 0,18 g dari <i>automatic shutdown</i>
Persyaratan / Pendekatan siklus bahan bakar	Persyaratan <i>LWR</i> konvensional diterapkan (kapasitas bahan bakar bekas: 30 tahun)
Fitur Pembeda	Kopling dengan desalinasi dan aplikasi panas proses, sistem primer terintegrasi
Status Desain	Tersertifikasi (Desain disetujui)

Passive safety injection system (PSIS) menyediakan *core cooling system* setelah kecelakaan dasar desain yang dipostulasikan. Pendinginan teras darurat dilakukan dengan menggunakan empat (4) *Core Make-up Tank* (CMT) dan empat (4) *Safety Injection Tank* (SIT) [8]. Empat (4) CMT yang penuh dengan *borating water* menyediakan fungsi *makeup* dan pemboran ke RCS selama tahap awal SBLOCA atau non-LOCA [8]. Bagian atas dan bawah CMT dihubungkan ke RCS melalui jalur keseimbangan tekanan dan *safety injection line*, masing-masing [8]. Fungsi injeksi keselamatan dari

PSIS dipertahankan dalam jangka panjang karena SIT diisi ulang secara berkala [8]. Untuk lebih jelasnya mengenai ECCS pada reaktor SMART, perhatikan Gambar 5 di bawah ini.

Gambar 5 menunjukkan secara keseluruhan pasif sistem pada reaktor SMART. Reaktor SMART memiliki 4 *fully-passive system* yang handal, yaitu : empat (4) rangkaian *Passive Containment Cooling System (PCCS)*, *Passive Residual Heat Removal System (PRHRS)* yang menghilangkan panas sisa selama lebih dari 20 hari, empat (4) rangkaian *Passive Safety Injection System (PSIS)* yang menyediakan pendinginan teras darurat di *Loss-Of-Coolant Accident (LOCA)*, dan *Passive Hydrogen Removal System (PHRS)* yang mencegah ledakan Hidrogen [9].



Gambar 5. Fully-passive safety system pada reaktor SMART [9]

4. Kesimpulan

Hasil menunjukkan bahwa *Emergency Core Cooling System (ECCS)* bertekanan tinggi memiliki kelebihan dibandingkan ECCS bertekanan rendah karena ECCS bertekanan tinggi mampu menyalurkan atau menginjeksikan pendingin ke dalam bejana yang memiliki tekanan tinggi maupun rendah. Meskipun demikian, SMR yang ada saat ini banyak yang mengaplikasikannya dengan mengkombinasikan kedua tipe ECCS tersebut, bahkan ada yang mengkombinasikannya dengan sistem pendingin pasif lainnya. Desain ECCS pada setiap reaktor berbeda-beda sehingga pengaplikasian ECCS pada SMR berbeda-beda pula. Hanya menggunakan 2 tipe ECCS ataupun menggabungkan ECCS dengan sistem pendingin pasif lainnya harus mempertimbangkan desain dari reaktor untuk memastikan efektivitas kinerja dari ECCS tersebut.

Ucapan terima kasih

Penyelesaian penulisan artikel ilmiah ini tidak lepas dari bantuan yang diberikan oleh beberapa pihak, baik langsung maupun tidak langsung. Karena itu, dengan segala kerendahan hati penulis ingin menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Badan Tenaga Nuklir Nasional

(BATAN), sub-tim Termohidrolika BATAN, Universitas Udayana, serta kepada teman-teman sekalian yang membantu penulis dalam penulisan artikel ini. Berkat bantuan dari rekan-rekanlah penulis akhirnya mampu menyelesaikan penulisan artikel ilmiah ini. Penulis berharap kerja sama dari rekan-rekan sekalian untuk penulisan artikel-artikel selanjutnya.

Daftar Pustaka

- [1] D. Febraldo, Pengaruh Kecepatan Pendingin pada Unjuk Kerja *Thermal U-Shaped Heat Pipe*, Laporan Kerja Praktik 2018, Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Udayana, Bali, p. 1-2
- [2] Nuclear. S, *Emergency Core Cooling System*, [https://nuclearstreet.com/nuclear-power-plants/w/nuclear_power_plants/emergency-core-coolingsystems#:~:text=The%20emergency%20core%20cooling%20systems,to%20limit%20fuel%20cladding%20damage.&text=The%20low%20pressure%20systems%20are,core%20spray%20\(CS\)%20system](https://nuclearstreet.com/nuclear-power-plants/w/nuclear_power_plants/emergency-core-coolingsystems#:~:text=The%20emergency%20core%20cooling%20systems,to%20limit%20fuel%20cladding%20damage.&text=The%20low%20pressure%20systems%20are,core%20spray%20(CS)%20system). (Diakses pada 25 November 2020)
- [3] Nuclear. S, *High Pressure Emergency Core Cooling Systems*, https://nuclearstreet.com/nuclear-power-plants/w/nuclear_power_plants/high-pressure-emergency-core-cooling-systems#:~:text=The%20high%20pressure%20coolant%20injection,and%20intermediate%20size%20loss%20of. (diakses pada 3 Desember 2020)
- [4] Nuclear, S. *Low Pressure Emergency Core Cooling System*, https://nuclearstreet.com/nuclear-power-plants/w/nuclear_power_plants/low-pressure-emergency-core-cooling-systems. (diakses pada 3 Desember 2020)
- [5] IAEA, *Advances In Small Modular Reactor Technology Developments*, 111-114, September 2020.
- [6] IAEA, *Advances In Small Modular Reactor Technology Developments*, 89-91, September 2020.
- [7] NuScale Power LLC, *Reactor Coolant System And Connecting System* (2020) p 5.1-4
- [8] IAEA, *Advances In Small Modular Reactor Technology Developments*, 53-56, September 2020.
- [9] SMART Power Co., Ltd, *SMART Technology*, http://smart-nuclear.com/tech/key_data.php (diakses pada 14 Desember 2020)