

KAJIAN RESIDUAL HEAT REMOVAL PADA TIPE REAKTOR SMRS

ZIKRILLAH I RAHMAN^{1*}, G.B. HERU K², DEDDY HARYANTO², GIARNO², I GEDE PUTU AGUS SURYAWAN¹,
I KETUT GEDE WIRAWAN¹, SURIP WIDODO², MULYA JUARSA²

¹Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Udayana, Jalan Raya Kampus Unud Jimbaran,
Kecamatan Kuta Selatan, Kabupaten Badung, Bali 80361

²PTKRN BATAN, Kawasan PUSPIPEK Serpong, Gedung 80, Tangerang Selatan, Banten 15310

Abstrak. *Small Modular Reactor / Small and Medium Reactor (SMRs)* adalah sebuah inovasi baru dari sistem penggunaan energi nuklir yang digunakan untuk pembangkit listrik. *SMRs* sendiri sudah banyak negara yang berniat untuk membuat reaktor dikarenakan harganya yang murah, membutuhkan tempat yang tidak luas, memiliki sistem *safety passive*, dan memiliki resiko kecelakaan yang lebih kecil dibandingkan dengan reaktor nuklir konvensional. *SMRs* sendiri dapat menghasilkan sampai 300 MWe. Namun, karena *SMRs* ini masih baru maka diperlukan penelitian lebih lanjut, terutama mencakup keamanan dan kenyamanan untuk pekerja dan masyarakat sekitar. Salah satu pengembangan dari sistem keamanan *passive SMRs* yang sedang dikembangkan adalah *residual heat removal (RHR)*. Tujuan dari penulisan untuk mengetahui sistem kerja dari sistem *RHR* yang digunakan pada beberapa reaktor *SMRs*. Metodologi penulisan dilakukan dengan cara studi literatur dengan membandingkan sistem kerja *RHR* pada reaktor yang akan dibahas. Dari hasil kajian menunjukkan perbedaan, keunggulan, dan kerugian sistem *RHR* yang digunakan dalam reaktor *SMRs* adalah tipe *SMART* reaktor yang paling baik karena sudah memenuhi minimal persyaratan sistem blackout untuk tipe reaktor *smLWRs (small medium Light Water Reactor system)*.

Kata kunci: *SMRs, Nuklir, RHRs, SMART, smLWRs.*

Abstract. *Small Modular Reactor / Small and Medium Reactor (SMRs)* is a new innovation for nuclear energy which is used for electricity generation. *SMR* itself has recommended by many countries to build a reactor because it is cheap, requires a small space, has a passive safety system, and has less risk compared to conventional nuclear reactors. *SMRs* alone can produce up to 300 MWe. However, due to the new *SMRs*, there is still a lot of research to be developed. Research covering safety and comfort for workers and safety for nearest residential area. One of the developments of the passive *SMR* security system that is being developed is *Residual Heat Removal (RHR)*. The goal in this paper is to discuss the working system of the *RHR* systems used in several *SMRs* reactors. The methodology used for this paper is literature study by comparing the *RHR* work system in the reactors to be discussed. This paper show us the differences, advantages, and disadvantages of the *RHR* system used in the *SMR* reactor is the best type of *SMART* reactor because the *SMART* reactor meets the minimum requirements of the blackout system for the *smLWRs (small medium Light Water Reactor system)*.

Keywords: *SMRs, Nuclear, RHRs, SMART, smLWRs.*

1. Pendahuluan

Small Modular Reactor / Small and Medium Reactor (SMRs) adalah sebuah terobosan baru untuk sistem penggunaan energi nuklir yang salah satunya digunakan untuk pembangkit listrik. Karena bentuk reaktornya yang lebih kecil dari pada reaktor nuklir konvensional, *SMR* dinyatakan lebih aman dalam segi keselamatan dikarenakan memiliki fitur keselamatan yang melekat dan pasif untuk mengurangi risiko kecelakaan parah [1]. Bentuk yang kecil dari *SMR* ini juga dapat memainkan peran dalam keadilan sosial bagi masyarakat yang jauh dari kota dan tidak mendapatkan listrik. *SMR*

* Email: zikrillahimadirahman@student.unud.ac.id

sendiri telah dipuji sebagai transformatif di banyak bidang dan dipandang sebagai cara untuk mengatasi mahalannya biaya pembuatan reaktor nuklir konvensional yang menyebabkan penundaan konstruksi [1]. Sampai saat ini sudah muncul beberapa jenis reaktor dari SMR sendiri diantaranya *Pressurized Water Reactor (PWR)*, *Boiling Water Reactor (BWR)*, *Heavy Water Reactor (HWR)*, *High Temperature Gas Cooled Small Modular Reactor (HTGR)*, dan *Molten Salt Small Modular Reactor (MSR)*.

Light Water Reactor (LWRs) adalah reaktor daya yang didinginkan dan dimoderasi dengan air biasa [2]. Ada dua tipe dasar: *Pressurized Water Reactor (PWR)* dan *Boiling Water Reactor (BWR)*. Dalam PWR, air pada tekanan dan suhu tinggi menghilangkan panas dari inti dan diangkut ke generator uap. Di sana panas dari *primary loop* dipindahkan ke *secondary loop* bertekanan rendah yang juga mengandung air. Air di *secondary loop* memasuki *steam generator* pada tekanan dan suhu rendah untuk memulai pendidihan. Setelah menyerap panas dari *primary loop*, air menjadi jenuh dan akhirnya akan membuat panas berlebih. Uap yang dihasilkan berfungsi sebagai fluida kerja dalam siklus turbin uap. Lalu untuk sistem BWR bekerja dengan inti reaktor memanaskan air yang berubah menjadi uap dan kemudian menggerakkan turbin uap. Dalam BWRs, inti reaktor memanaskan air namun tidak sampai mendidih, lalu air panas ini kemudian bertukar panas dengan sistem air bertekanan rendah yang berubah menjadi uap dan menggerakkan turbin. Perbedaannya terdapat pada tekanan pada saat kerja normal kedua reaktor ini, dimana PWRs normalnya air pada titik kritis memiliki tekanan sebesar 22,064 MPa, Sedangkan tekanan dalam vessel BWRs sebesar 7,07 MPa [2].

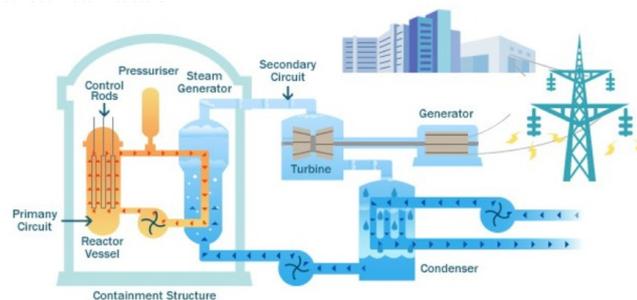
Kejadian kecelakaan pada LWRs dapat menyebabkan inti reaktor meleleh setelah mencapai suhu yang sangat tinggi, dimana bahan bakar nuklir dan cairan kelongsong pindah ke bagian bawah tekanan reaktor. Kejadian ini biasanya adalah mode kegagalan reaktor nuklir atau biasa disebut *Loss of Coolant Accident (LOCA)*. Salah satu akibat dari LOCA sendiri dapat melelehkan inti yang nantinya akan mengakibatkan masalah lainnya. Oleh karena itu, terdapat mode *Emergency Core Cooling System (ECCS)* untuk menangani LOCA ini.

The Emergency Core Cooling System (ECCS) menyediakan pendinginan *core* dalam kondisi terjadinya kecelakaan cairan pendingin untuk membatasi kerusakan selubung bahan bakar [3]. Sistem ECCS terdiri dari dua sistem tekanan tinggi dan dua sistem tekanan rendah. *Emergency Core Cooling System (ECCS)* akan beroperasi melindungi *core* saat persediaan pendingin reaktor hilang karena kerusakan [4]. Sistem injeksi cairan pendingin tekanan tinggi dirancang beroperasi saat sistem nuklir berada pada tekanan tinggi, sedangkan sistem penyemprotan inti dan injeksi cairan pendingin tekanan rendah dari sistem pembuangan panas sisa dirancang untuk beroperasi pada tekanan rendah. Jika ada kerusakan yang mengakibatkan kehilangan cairan pendingin melebihi kemampuan sistem injeksi cairan pendingin tekanan tinggi, tekanan reaktor akan turun dengan cepat dan pada saat itu ECCS bertekanan rendah akan mulai menginjeksi cairan pendingin tekanan rendah ke dalam reaktor untuk mendinginkan *core*.

Hasil dari pembelahan (*fisi*) menghasilkan produk yang menghasilkan panas. Produk ini menjadi masalah apabila inti sudah dalam kondisi stabil dikarenakan panas dari produk dari *fisi* ini tidak dapat dihilangkan menggunakan sistem ECCS. Untuk menghilangkan panas ini, terdapat sistem yang dinamakan *Residual Heat Removal (RHRs)*. RHR sendiri dapat berfungsi saat kejadian transient (kecelakaan selain LOCA). Kecelakaan transient terjadi apabila didalam *Containment Vessel* ada terjadi kebocoran air dari pipa yang bisa menyebabkan terhambatnya pendinginan inti

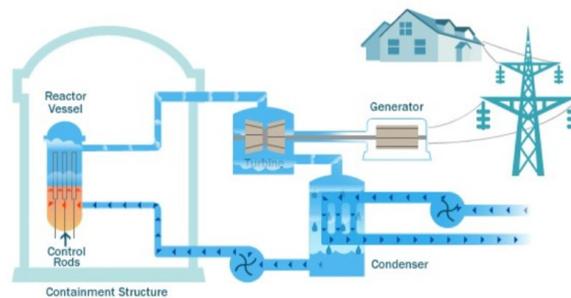
karena kejadian transient ini. RHRs dapat bekerja apabila terjadi sesuatu dari luar sistem, seperti listrik utama mati karena pemadaman.

Sistem pengambilan panas dari RHR sendiri bersifat konveksi alami. Umumnya pengambilan panas dari inti akan dikirim ke *Emergency Cooling Tank (ECT)* untuk proses pendinginan. Penelitian di Korea menemukan ide baru dimana ECT digantikan oleh *Dry Air Cooling Tower (DACT)* [5]. Untuk SMR jenis LWR banyak yang menggunakan sistem RHRs, salah satunya adalah reaktor CAREM, SMART, DMS, VK-300, dan lain – lain. Metodologi pengambilan reaktor yang dipilih berdasarkan *design* reaktor yang sudah mendapatkan lisensi. Lisensi tersebut berdasarkan daya termal yang dihasilkan (kecil, sedang, dan besar) dan jenis reaktor. Reaktor dengan daya termal sedang dalam tahap pembangunan dan dalam makalah ini akan menjelaskan cara pengambilan panas, sistem tambahan, keunggulan dan estimasi kerugian berdasarkan opini penulis.



Gambar 1. Pressurized Water Reactor (PWRs)

(sumber https://www.clpgroup.com/NuclearEnergy/Eng/power/power4_1_2.aspx)



Gambar 2. Boiling Water Reactor (BWRs)

(sumber: https://www.clpgroup.com/NuclearEnergy/Eng/power/power4_1_2.aspx)

Sistem keamanan keseluruhan harus dapat mengatasi system blackout minimal 72 jam tanpa intervensi operator [6].

2. Metode Penelitian

Metode penelitian untuk penulisan makalah ini dengan mengkaji sistem RHR pada reaktor SMR yang terdapat pada Tabel 1.

Tabel 1. Reaktor SMRs

No	Reaktor	Daya Thermal (MW(t))	Jenis Reaktor
1.	CAREM	100	PWR
2.	SMART	365	PWR
3.	DMS	840	BWR
4.	VK-300	750	BWR
5.	KLT-40S	150	PWR
6.	RITM-200	175	PWR

3. Hasil

Hasil kajian sistem RHR

CAREM, (CNEA, Argentina)



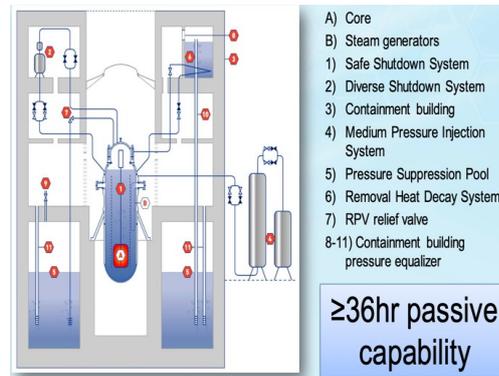
Gambar 3. CAREM Small Modular Reactor System Design

Sumber (Advanced in Small Modular Reactor Technology Development Book, Edition 2020, Page 9)

CAREM adalah salah satu rancangan SMRs dengan tipe *Light Water Reactor (LWRs)*. CAREM dikembangkan untuk membuat membangun pembangkit tenaga listrik skala kecil yang inovatif, murah dengan sistem keamanan yang tinggi. 70% komponen dari CAREM bersumber dari perusahaan asal Argentina [7]. CAREM diperuntukkan untuk daerah yang membutuhkan listrik yang tidak banyak. Design SMRs ini dapat menghasilkan 30MWe.

Salah satu sistem keamanan yang dipakai di SMRs CAREM adalah *Passive Residual Heat Removal (PRHRs)*. Terdapat 2 PRHRs yang dipasang untuk meluruhkan inti setelah proses dari proses

shutdown system. Sistem ini aktif dengan masa tenggang 36 jam dan bekerja dengan *passive principle* (konveksi alami) untuk penghilangan sisa panas di inti [8]. Panas ini akan di *transfer* ke kolam khusus atau *Emergency Cooldown Tank (ECT)* [8]. PRHRs dalam design ini dibentuk oleh tabung U horizontal secara parallel (kondensor).



Gambar 4. *Passive Safety System CAREM SMRs Design*

Sumber (<https://nucleus.iaea.org/sites/INPRO/df17/IV.2-de%20Arenaza-CAREM.pdf>)

SMART (KAERI, Republik Korea)

The System Integrated Modular Advanced Reactor (SMART) adalah jenis reaktor PWR yang dapat menghasilkan daya 107 MWe [9]. SMART dikembangkan oleh *Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI)* yang dikembangkan sejak 1997 [8]. Sama seperti reaktor SMR lainnya, sistem keselamatannya menggunakan sistem keselamatan pasif.

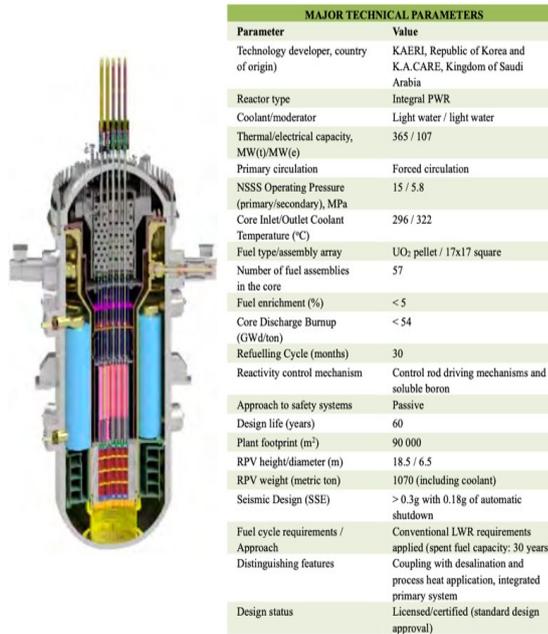
PRHRs di SMART reaktor juga berfungsi untuk pendinginan jangka panjang untuk perbaikan atau pengisian bahan bakar. Sistem ini dirancang untuk menjaga inti tidak rusak selama 20 hari tanpa ada tindakan korektif oleh operator [9]. Pada saat PRHRs berjalan, panas dari sisa inti akan dibuang melalui *SG Helical Tube* sebelum masuk ke *Emergency Cooldown Tank (ECT)* [9]. ECT terletak di atas SG yang berfungsi untuk menghilangkan panas secara konveksi alami (*natural convection*). Pada saat sistem ini berjalan, katup air umpan utama (*feedwater*) dan uap isolasi (*steam discharge*) akan tertutup sedangkan katup isolasi PRHR akan terbuka yang menuju ke ECT [10]. Kejadian ini akan membentuk *loop* tertutup dimana panas dari sisa inti akan dihilangkan melalui SG dan ECT secara *natural convection* dalam sistem PRHR.

DMS (Hitachi-GE Nuclear Energy, Jepang)

DMS adalah singkatan dari *Double MS (Modular simplified dan medium small reactor)*. DMS reaktor dengan tipe *BWR (Boiling Water Reactor)* yang dapat menghasilkan daya 300 MWe. Design DMS dikembangkan oleh Hitachi-GE Nuclear Energy yang di *sponsorship* oleh Japan Atomic Power Company (JAPC).

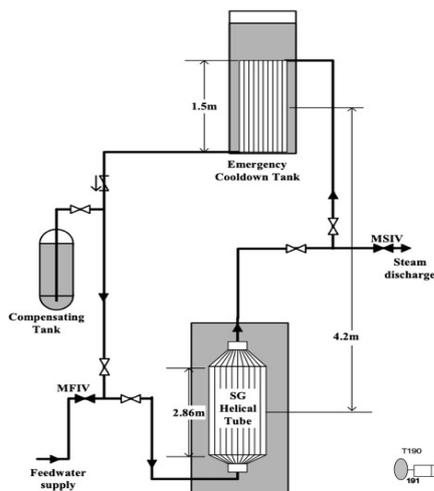
Residual Heat Removal (RHRs) terdiri dari beberapa pompa dan heat exchanger yang berfungsi untuk mendinginkan inti reactor atau *suppression pool (SP)*. RHRs DMS dapat menghilangkan panas *residual* (sisa) tidak hanya pada saat normal shutdown, namun dapat bekerja pada saat terjadi kecelakaan. Sistem RHR akan bekerja untuk mendinginkan *Supression Pool (SP)* di dalam *PCV*

(Primary Containment Vessel) dan air yang dingin akan di injeksi masuk ke Reactor Pressure Vessel (RPV). Panas dalam RPV akan didinginkan lagi di waterpool yang terletak diatas PCV yang nantinya akan bersiklus kembali ke SP. siklus safety system ini berjalan secara natural convection sama seperti sistem passive reactor SMR lainnya.



Gambar 5. SMART SMRs Design

Sumber (Advanced in Small Modular Reactor Technology Development Book, Edition 2020, Page 9)



Gambar 6. Skematik diagram PRHRs in SMART Reactor Design

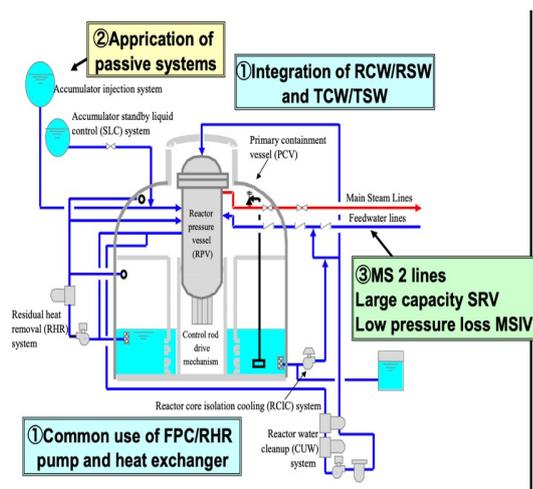
Sumber (International Agency Energy Book :Status Report 77 System Integrated Modular Advanced Reactor (SMART))



MAJOR TECHNICAL PARAMETERS	
Parameter	Value
Technology developer, country of origin	Hitachi-GE Nuclear Energy, Japan
Reactor type	Boiling water reactor
Coolant/moderator	Light water / light water
Thermal/electrical capacity, MW(t)/MW(e)	840 / ~300
Primary circulation	Natural circulation
NSSS Operating Pressure (primary/secondary), MPa	7.17
Core Inlet/Outlet Coolant Temperature (°C)	186 / 287
Fuel type/assembly array	UO ₂ pellet / 10x10 square configuration in channel box
Number of fuel assemblies in the core	400 (short fuel assembly)
Fuel enrichment (%)	< 5
Core Discharge Burnup (GWd/ton)	< 60
Refuelling Cycle (months)	24
Reactivity control mechanism	Control rod drive and soluble boron injection
Approach to safety systems	Hybrid (passive + active)
Design life (years)	60
RPV height/diameter (m)	15 / 4.8
Seismic Design (SSE)	0.45g
Distinguishing features	Simple reactor design, natural circulation system, hybrid safety system, multipurpose energy use
Design status	Basic design

Gambar 7. DMS SMRs Design

Sumber (Advanced in Small Modular Reactor Technology Development Book, Edition 2020, Page 9)



Gambar 8. DMS Power Plant Passive System

Sumber (http://www.nr.titech.ac.jp/coe21/eng/events/ines1/pdf/37_tominaga.pdf)

VK-300 (NIKIET, Federasi Rusia)

VK-300 adalah tipe reaktor *Boiling Water Reactor* (BWR). Reaktor ini dikembangkan dari reaktor sebelumnya yaitu VK-50 yang dikembangkan oleh Federasi Rusia. Reaktor ini dapat menghasilkan daya 250 MWe. Sistem RHR pada reaktor VK-300 akan bekerja saat penggerak scram bergerak. RHR akan mendinginkan kondensor yang berada dalam *Primary Containment* (PC). Kondensor dan reaktor terhubung dengan saluran perpipaan yang berisikan air. saat permukaan air di dalam reaktor menurun, pipa atas reaktor akan terbuka untuk mengalirkan uap dari reaktor ke kondensor dan kondensat. Kondensor akan didinginkan dengan air dari *emergency cool down tank*. RHR pada reaktor ini menggunakan 2 heat exchanger yang ditempatkan satu pada *emergency cooldown tank*

dan satunya lagi disimpan di aliran udara atmosfer diluar ruang reaktor. Sistem ini akan bersiklus secara pasif dan tidak membutuhkan adanya pompa [11].



MAJOR TECHNICAL PARAMETERS	
Parameter	Value
Technology developer, country of origin	NIKIET, Russian Federation
Reactor type	Simplified passive BWR
Coolant/moderator	Light water / light water
Thermal/electrical capacity, MW(t)/MW(e)	750 / 250
Primary circulation	Natural circulation
NSSS Operating Pressure (primary/secondary), MPa	6.9
Core Inlet/Outlet Coolant Temperature (°C)	190 / 285
Fuel type/assembly array	UO ₂ pellet/hexahedron
Number of fuel assemblies in the core	313
Fuel enrichment (%)	4
Core Discharge Burnup (GWd/ton)	41.4
Refueling Cycle (months)	72
Reactivity control mechanism	Rod insertions
Approach to safety systems	Passive
Design life (years)	60
Plant footprint (m ²)	40 000
RPV height/diameter (m)	13.1 / 4.535
RPV weight (metric ton)	325
Seismic Design (SSE)	Max 8 point of MSK-64
Fuel cycle requirements / Approach	Once through fuel cycle with UO ₂
Distinguishing features	Innovative passive BWR based on operating prototype and well-developed equipment
Design status	Detailed design of reactor and cogeneration plant standard design

Gambar 9. VK-300 SMRs Design

Sumber (Advanced in Small Modular Reactor Technology Development Book, Edition 2020, Page 9)

KLT-40S

KLT-40S adalah SMRs tipe PWR yang dikembangkan untuk pembangkit listrik tenaga nuklir yang terapung / *floating nuclear power plant (FNPP)* [12]. Reaktor ini dapat diproduksi di galangan kapal dan dikirim ke lokasi dengan kondisi sudah siap dirakit dan siap pakai. KLT-40S memiliki kebebasan yang tinggi dalam memilih lokasi untuk FNPP karena dapat dirakit di wilayah mana pun [13]. Sistem penghilangan panas peluruhan pada reaktor ini untuk menghilangkan panas sisa teras apabila terjadi suatu kejadian abnormal termasuk juga kecelakaan. RHR pada reaktor ini mencakup dua saluran pendinginan pasif sekunder melalui *steam generator*. Satu saluran pendingin sekunder aktif melalui pembangkit uap dan satu saluran pendingin aktif melalui *primary / third heat exchanger*.

Reaktor ini didasarkan pada teknologi PWR yang terbukti dan 400 tahun Pengalaman Rosatom reaktor dalam pengoperasian reaktor kecil di pemecah es. Reaktor ini dirancang oleh JSC “Afrikantov OKBM” Federasi Rusia. Reaktor seri RITm dapat digunakan untuk pembangkit listrik, *water desalination*, dan *cogeneration* [14].

Sistem pembuangan panas reaktor ini terdiri dari empat rangkaian keselamatan, pertama adalah *loop* pengaman aktif dengan sirkulasi paksa *steam generator*, *loop* pengaman aktif dengan sirkulasi paksa melalui *heat exchanger* dari pendinginan sirkuit primer, dan dua *loop* pengaman pasif dengan sirkulasi alami dari tangki air melalui *steam generator*. Empat rangkaian di atas terhubung ke *steam generator* yang berbeda.



Reactor type:	Pressurized water reactor
Electrical capacity:	35 MW(e)
Thermal capacity:	150 MW(th)
Coolant/moderator:	Light water
Primary circulation:	Forced circulation
System pressure:	12.7 MPa
Core outlet temperature:	316°C
Thermodynamic cycle:	Indirect Rankine cycle
Fuel material:	UO ₂
Fuel enrichment:	<20%
Fuel cycle:	28 months
Reactivity control:	Rod insertion
No. of safety trains:	2
Emergency safety systems:	Active and passive systems
Residual heat removal systems:	Passive system
Design life:	40 years
Design status:	Under construction
Seismic design:	3.0g
Predicted core damage frequency:	1E-6/reactor year
Planned deployment:	2012
Distinguishing features:	Floating power unit for heat and electricity

Gambar 10. KLT-40S SMRs Design

Sumber (<https://aris.iaea.org/Publications/smr-status-sep-2012.pdf>)

RITM-200



Reactor type:	Pressurized water reactor
Electrical capacity:	35 MW(e)
Thermal capacity:	150 MW(th)
Coolant/moderator:	Light water
Primary circulation:	Forced circulation
System pressure:	12.7 MPa
Core outlet temperature:	316°C
Thermodynamic cycle:	Indirect Rankine cycle
Fuel material:	UO ₂
Fuel enrichment:	<20%
Fuel cycle:	28 months
Reactivity control:	Rod insertion
No. of safety trains:	2
Emergency safety systems:	Active and passive systems
Residual heat removal systems:	Passive system
Design life:	40 years
Design status:	Under construction
Seismic design:	3.0g
Predicted core damage frequency:	1E-6/reactor year
Planned deployment:	2012
Distinguishing features:	Floating power unit for heat and electricity

Gambar 10. KLT-40S SMRs Design

Sumber (<https://aris.iaea.org/Publications/smr-status-sep-2012.pdf>)

Pembahasan

Berdasarkan uraian pada sub bab 3.1 diperoleh ringkasan perbedaan-perbedaan sistem RHR seperti yang dicantumkan pada Tabel 2. Dari Tabel 2 didapatkan, Setiap reaktor memiliki sistem RHR yang berbeda-beda. DMS dan VK-300 reaktor berjenis BWR sedangkan untuk SMART, CAREM, KLT-40S, RITM-200 berjenis PWR. Perbedaan reaktor RITM-200 dengan reaktor lainnya terlihat dari jenis sistem yang digunakan, dimana RITM-200 menggunakan sistem aktif dan pasif sedangkan reaktor CAREM, SMART, VK-300, DMS, dan KLT-40S hanya menggunakan sistem yang pasif. Perbedaan yang lain terlihat dari jumlah *loop* RHR yang digunakan, reaktor CAREM memiliki 1 *loop* RHR, SMART 4 *loop* RHR, DMS, KLT-40S, dan VK-300 2 *loop* RHR, dan RITM-200

memiliki 4 *loop* RHR. Kapasitas pendinginan setiap *loop* berbeda-beda mengikuti jumlah *loop* yang terdapat pada reaktor tersebut. CAREM, SMART, DMS, dan VK-300 memiliki estimasi jangka waktu penggunaan reaktor selama 60 tahun. Sedangkan untuk KLT-40S dan RITM-200 memiliki 40 tahun penggunaannya. Untuk jangka waktu sistem RHR tanpa intervensi operator CAREM dapat bertahan 36 jam, SMART dapat bertahan 72 jam dan 20 hari apabila terjadi skenario Fukushima *accident*, DMS dapat bertahan 10 Hari, VK-300 dapat bertahan 1 hari, KLT-40S dapat bertahan 1 hari dengan menggunakan 2 *loop*, dan RITM-200 dapat bertahan tidak hingga dikarenakan sistem RHR pada reaktor ini menggunakan kolam air dan udara luar untuk pendinginnya. Reaktor CAREM, SMART, dan KLT-40S sudah memiliki *design licence*, namun baru 2 reaktor yang statusnya dalam pembangunan, yaitu reaktor CAREM di Argentina dan KLT-40S di Rusia. Reaktor KLT-40S dan RITM-200 berbasis FNPP dimana diletakkan di dalam kapal atau di pesisir pantai, sedangkan reaktor CAREM, SMART, DMS, dan VK-300 berbasis di daratan atau *land base*.

Tabel 2. Informasi RHRs pada Reaktor SMR

No	Nama Reaktor	Aktif / Pasif	Jangka Penggunaan Reaktor	Daya Tahan RHR Tanpa Operator	Jumlah Loop	Design Licence	Under Construction
1.	CAREM	Pasif	60 Tahun	36 Jam	1	√	√
2.	SMART	Pasif	60 Tahun	72 Jam (*)	4	√	X
3.	DMS	Pasif	60 Tahun	10 Hari	2	X	X
4.	VK-300	Pasif	60 Tahun	24 Jam	2	X	X
5.	KLT- 40S	Pasif	40 Tahun	2 Loop = 24 Jam	2	√	√
6.	RITM- 200	Pasif dan Aktif	40 Tahun	∞ (#)	4	X	X

Keterangan = (*) Untuk skenario kecelakaan Fukushima, kapasitas kolam RHR reaktor ini dapat bertahan selama 20 hari tanpa intervensi operator [15].

(#) RITM-200 reaktor disamping menggunakan kolam berisi air, reaktor ini juga menggunakan udara sebagai pembuang panas akhir untuk sistem RHR[16].

4. Kesimpulan

Berdasarkan jumlah daya output yang dikeluarkan, jenis reaktor yang dirancang, dan sistem pembuangan panas sisa, SMART reaktor memiliki sistem RHR yang baik. SMART menggunakan 4 *loop* RHR dimana masing-masing *loop*-nya akan memiliki daya pendinginan yang seimbang, aman, dan efisien. SMART reaktor juga memiliki jangka waktu penggunaan yang lama yaitu 60 tahun. Sistem RHR pada reaktor ini juga dapat bertahan tanpa adanya operator selama 72 jam yang bersifat pasif dan apabila terjadi kecelakaan seperti Fukushima, kapasitas tanki reaktor ini dapat bertahan sampai 20 hari. SMART reaktor juga sudah memenuhi syarat sistem *blackout* RHR smLWRs (*small medium Light Water Reactor system*) yang minimum dapat bertahan 72 Jam tanpa intervensi dari operator. SMART reaktor juga sudah mendapatkan *Design Licence* yang berarti reaktor ini sudah siap untuk dimanufaktur / dirakit.

5. Ucapan Terima Kasih

Terima kasih kepada lembaga Universitas Udayana maupun Pusat Teknologi Keselamatan Reaktor Nuklir (PTKRN) BATAN, dan kepada Kartutu, Abidin, dan Abdullah yang sudah membantu dalam melaksanakan penelitian.

Daftar Pustaka

- [1] Wibisono Andhika Feri, Lee Jeong Ik, Shwageraus Eugene, *Effect of Operating Pressure on The Performance of a Hybrid System of Small Modular Boiling Water Reactor with External Superheaters*, United Kingdom (2019).
- [2] Paul Breeze, *Power Generation Technologies (Third Edition)*, (2019).
- [3] Khattak Muhammad, Kasmani Rafiziana, dan Mahadi Muhammad, *A Review of Safety Features of Small Modular Reactor (SMRs): Malaysian Nuclear Program Perspective*, Jurnal of Advanced Research in Applied Mechanics, Volume 1 Hal. 1-17, Malaysia (2017).
- [4] Paolo Galo, *API1000 The PWR Revisited*, IAEA-CN-164-3S05.
- [5] Min-wook Na, Do-young Shin, Jae-Hyung Park, Jeong-ik Lee, Sung-joong Kim, *Indefinite Sustainability of Passive Residual Heat Removal System of Small Modular Reactor using Dry Air Cooling Tower*, Korea (2019).
- [6] Electric Power Research Institute, *Advance Nuclear Technology: Advanced Light Water Reactor Utility Requirements Document*, Small Modular Reactors Inclusion Summary, 2014.
- [7] Chung Y.J, Lee G.H, Kim H.C, Kim K.K, Zee S.Q, *Parameters, Which Effect The Mass Flow In The PRHRs Under A Natural Convection Condition*, The International Conference on Nuclear Option in Countries with Small and Medium Electricity Grids, Croatia (2004).
- [8] Delmastro Dario, Gimenez Marcelo, Florido Pablo, Daverio Hernando, Serra Oscar, Blanco Anibal, Pablo Mueller, *CAREM Concept: A Competitive SMR*, 12th International Conference on Nuclear Engineering (2004).
- [9] International Agency Energy Atomic (IAEA), *Advance in Small Modular Reactor Technology Developments*, 2020 Edition (2020).
- [10] International Atomic Energy Agency, *Status Report 77: System Integrated Modular Advanced Reactor (SMART)*, South Korea (2011).
- [11] Kuznetsov Y.N., Lisitza F.D., Tokarev Yu.I., Glazkov O.M, *Nuclear Power Plant with VK-300 Reactor, Simplicity and Passivity as A Way to Provide Enhanced Safety and Economic Competitive Ability*, Rusia (1998).
- [12] International Atomic Energy Agency, *KLT-40S*, Russia (2013).
- [13] Kang-heon Lee, Min-gil Kim, Jeong-ik Lee, Phill-seung Lee, *Recent Advance in Ocean Nuclear Power Plant*, Korea (2015).
- [14] International Atomic Energy Agency, *Status of Small and Medium Sized Reactor Design*, (2012).
- [15] Keung-koo Kim, Won-jae Lee, Shun Choi, Hark-rho Kim, and Jae-joo Ha, *SMART: The First Licensed Advanced Integral Reactor*, Korea (2014).
- [16] V.M. Belyaev, A.N. Pakhomov, and K.B. Veshnyakov, *Technology Development and Design Approaches Including Economic of Small and Medium Sized Reactor*, Vienna (2017).