

INVESTIGASI KARAKTERISTIK TERMOHIDROLIKA TERAS REAKTOR DAYA KECIL DENGAN PENDINGINAN SIRKULASI ALAM MENGGUNAKAN RELAP5

Susyadi, Hendro Tjahyono, Sukmanto Dibyo, Jupiter S. Pane
Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir -BATAN
Kawasan PUSPIPTEK gedung 80, Setu, Tangerang Selatan, 15310
email: susyadi@batan.go.id, tel:021-7560912, fax: 021-7560913

Diterima editor: 12 Januari 2016

Direvisi editor: 1 Februari 2016

Disetujui untuk publikasi: 28 Februari 2016

ABSTRAK

INVESTIGASI KARAKTERISTIK TERMOHIDROLIKA TERAS REAKTOR DAYA KECIL DENGAN PENDINGINAN SIRKULASI ALAM MENGGUNAKAN RELAP5. Reaktor modular daya-kecil (*Small Modular Reactor*, SMR) memiliki prospek tinggi untuk dibangun di Indonesia. Keluaran dayanya yang relatif kecil dan disainnya yang kompak serta dapat dikonstruksi secara modular memberikan keunggulan fleksibilitas pembangunan yang lebih baik dibanding reaktor konvensional berdaya besar. Disain sistem reaktor kategori ini sangat bervariasi, salah satu diantaranya adalah jenis reaktor air tekan (*pressurized water reactor*, PWR) yang menerapkan sirkulasi alamiah pada sistem pendingin primernya. Selain itu reaktor ini juga memiliki teras (*core*) lebih pendek dibanding PWR konvensional. Dari kedua perbedaan tersebut maka terdapat kemungkinan perbedaan pola perpindahan panas yang dapat berimplikasi terhadap keselamatan secara keseluruhan. Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan investigasi terhadap karakteristik termohidrolika teras reaktor tersebut khususnya karakteristik temperatur fluida dan bahan bakar serta laju alir fluidanya. Tujuannya adalah untuk mengetahui perbedaan margin keselamatan temperatur teras reaktor bila dibanding dengan PWR konvensional. Investigasi dilakukan dengan menggunakan program RELAP5, dimana secara parsial teras reaktor dimodelkan menggunakan model-model generik yang ada pada program dan dilakukan beberapa perhitungan kondisi tunak. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa saat beroperasi pada daya nominalnya, reaktor modular ini memiliki margin temperatur pendidihan sebesar 2K lebih baik dibanding reaktor konvensional. Selain itu, keunggulan margin keselamatan reaktor modular daya-kecil ini juga ditunjukkan dari naiknya laju alir mengikuti kenaikan dayanya yang berarti memiliki sifat keselamatan yang melekat (*inherent safety*).

Kata kunci: reaktor modular daya-kecil, PWR, sirkulasi alam, RELAP5, termohidrolika

ABSTRACT

INVESTIGATION ON CORE THERMAL HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF SMALL MODULAR REACTOR WITH NATURAL CIRCULATION COOLING USING RELAP5. *Small modular reactor (SMR) is very prospective to be deployed in Indonesia. Its low output power, compact design and capability to be constructed modularly provide better deployment flexibility compared to a large conventional reactor. There are various designs of SMRs, one of them implements natural circulation for its primary cooling system or in other words the reactor uses no primary pumps. Besides, the dimension of fuel element is shorter than the one used by large reactor. These two aspects may produce different heat transfer behavior, which could lead to a safety implication. For that reason, this research investigates thermal hydraulic characteristics of the core of SMR with naturally circulating coolant, especially on the fuel and coolant temperatures and mass flow rate. The purpose is to identify the thermal safety margin difference of the reactor compared with conventional PWR. The investigation was performed using RELAP5 in which the core was partially represented by means of generic models of the program and continued with steady state calculations. The result shows that during nominal power operation, the reactor has better of 2K degree for boiling temperature margin than the large conventional PWR. In addition, the excellence of SMR safety margin was shown by the increase of primary coolant flow rate following the increase of power, which means that the reactor has a distinctive inherent safety.*

Keywords: *small modular reactor, PWR, natural circulation, RELAP5, thermal-hydraulic*

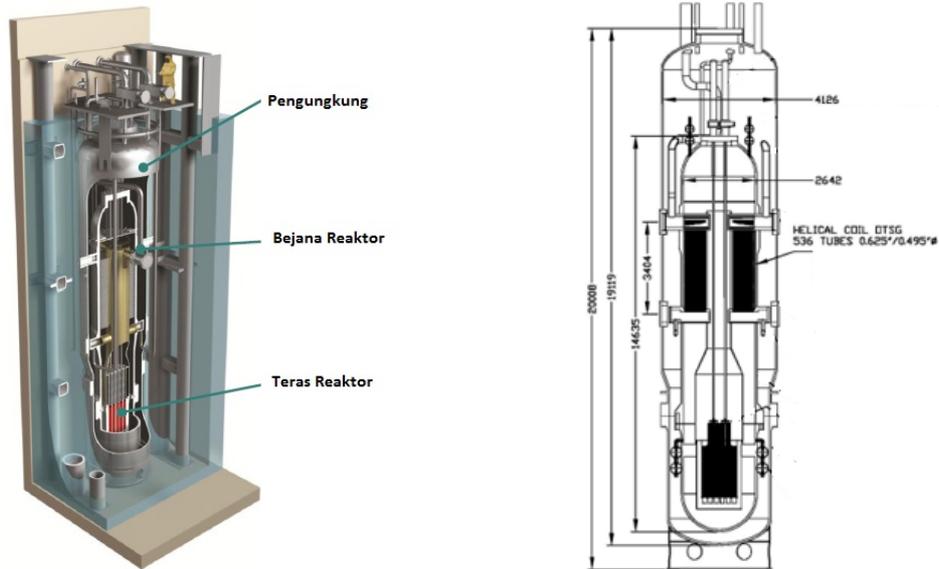
PENDAHULUAN

Reaktor modular daya-kecil (*Small Modular Reactor*, SMR) memiliki prospek yang tinggi untuk dibangun di Indonesia, terutama untuk pulau-pulau terpencil atau daerah-daerah di bagian Tengah dan Timur Indonesia dimana infrastrukturnya masih terbatas dan kapasitas jaringan listriknya masih rendah. Keluaran daya tiap unit yang kecil, biaya investasi yang tidak terlalu besar dan desainnya yang kompak serta dapat dikonstruksi secara modular memberikan keunggulan fleksibilitas pembangunan yang lebih baik dibanding reaktor berdaya besar konvensional [1-3], seperti AP1000 [4], VVER1000 [5], CANDU-6 [6] dan lain lain. Secara umum, desain sistem reaktor kategori ini bervariasi [7-12]. Beberapa diantaranya merupakan reaktor berpendingin air tekan (*Pressurized Water Reactor*, PWR) yang menerapkan mekanisme pendinginan sirkulasi alamiah pada sistem primernya, sehingga pompa primer tidak diperlukan [11-13]. Selain itu, bagian terasnya memiliki elemen bahan bakar yang panjangnya hanya sekitar separuh dari bahan bakar PWR konvensional. Kedua perbedaan tersebut kemungkinan memunculkan karakteristik termohidrolika yang berbeda bila dibanding reaktor besar dan dapat berimplikasi pada keselamatan reaktor secara keseluruhan. Mengingat reaktor ini masih dalam taraf disain, informasi dan publikasi tentang karakter reaktor ini masih sangat terbatas. Beberapa publikasi umumnya hanya menguraikan parameter termohidrolika secara umum seperti lajur alir, temperatur *inlet*, tekanan nominal dan daya termal operasi [12, 14-17]. Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan investigasi lebih jauh terhadap karakteristik termohidrolika disain teras reaktor tersebut khususnya karakteristik temperatur fluida dan bahan bakar serta laju alir fluidanya. Tujuannya adalah untuk mengetahui perbedaan margin temperatur pendidihan teras reaktor bila dibanding dengan PWR konvensional. Investigasi dilakukan dengan menggunakan program RELAP5, dimana secara parsial teras reaktor dimodelkan menggunakan rangkaian model-model generik yang ada pada program dan dilakukan beberapa eksekusi perhitungan kondisi tunak. Dengan diketahuinya perbedaan karakteristik termohidrolika, maka dapat diketahui pula keunggulan teknis dari disain reaktor jenis ini.

DESKRIPSI SISTEM

Deskripsi Umum

Disain reaktor modular daya-kecil yang diinvestigasi pada penelitian ini adalah konsep reaktor NuScale yang sedang dikembangkan oleh salah satu perusahaan di Amerika Serikat. Proses disain rincinya masih berlangsung dan direncanakan akan mengajukan aplikasi sertifikasi disain ke badan regulasi US-NRC pada semester kedua tahun 2016 [18]. Reaktor ini merupakan tipe integral, dimana seluruh komponen utama sistem pembangkit uapnya (yakni *steam generator*, teras, *pressurizer* dan sistem pendingin primer) berada di dalam satu bejana tunggal. Selain itu, konstruksi reaktornya bersifat modular yakni komponen-komponen utama dipasang di pabrik yang selanjutnya dibawa kelokasi dalam wujud modul siap pakai sehingga dengan mudah dapat diintegrasikan dengan sistem turbin saat konstruksi. Bentuk gambar bejana reaktor tersebut dan pengungkung serta geometrinya dapat dilihat dalam Gambar 1. Sedangkan beberapa karakteristik umum dari reaktor ditampilkan pada Tabel 1. Sebagaimana terlihat pada Gambar 1, reaktor memiliki tinggi dan diameter bejana tekan (*pressure vessel*) masing-masing sekitar 14,6 m dan 2,6 m. Pengungkungnya (*containment*) terbuat dari metal dan berukuran relatif kecil yakni tinggi 19 m dan diameter 4,1 m [16]. Dengan desain seperti itu, maka reaktor dan pengungkung menjadi sangat kompak dan juga dapat ditempatkan di dalam kolam air secara keseluruhan sehingga membuatnya memiliki kemampuan meminimalisir dampak terjadinya kecelakaan parah dengan fitur keselamatan pasifnya [12].



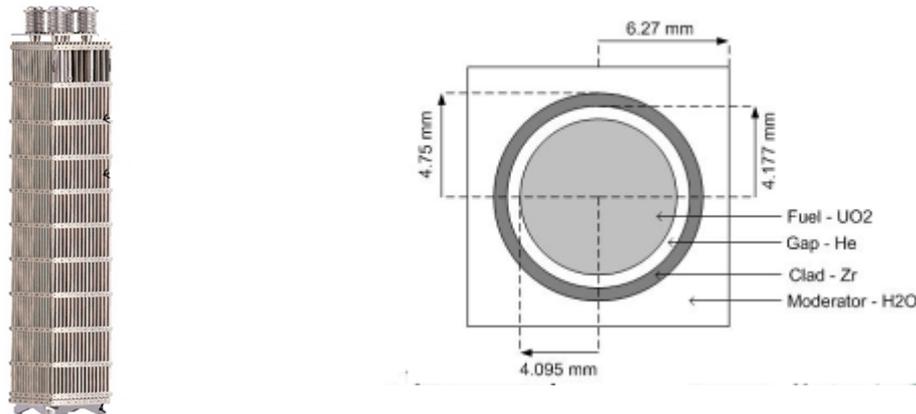
Gambar 1. Reaktor modular daya-kecil berpendingin sirkulasi alam [16].

Tabel 1. Karakteristik umum reaktor modular daya-kecil berpendingin sirkulasi alam [15, 17].

Parameter	Isi
Tipe reaktor	PWR
Daya termal (MWt)	160
Daya keluaran (MWe)	> 45 (nett)
Jumlah <i>steam generator</i>	2 bundel
Tipe <i>steam generator</i>	helikal, vertikal dan <i>once through</i>
Siklus uap	Rankine – <i>superheated</i>
Jumlah bundel bahan bakar	37
Siklus bahan bakar	24 bulan
Faktor kapasitas nominal (%)	> 90

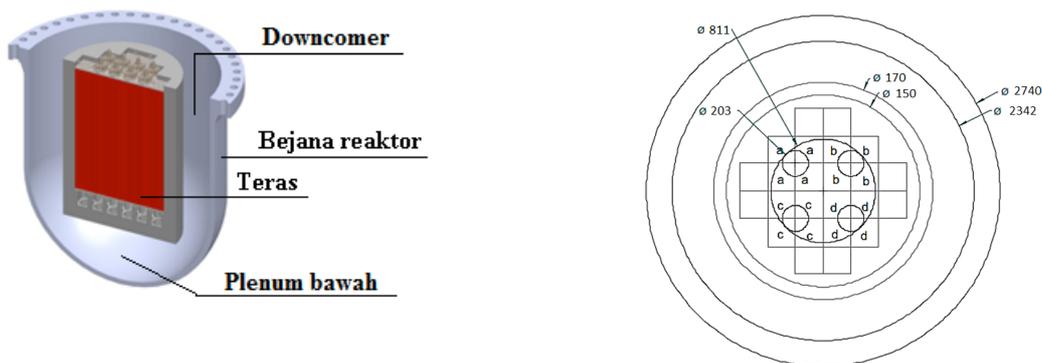
Deskripsi Teras dan Bahan Bakar Reaktor

Teras reaktor ini tersusun atas bahan bakar yang memiliki banyak kesamaan dengan bahan bakar standar PWR, yakni berisi pelet UO_2 dengan pengkayaan kurang dari 5% yang dimasukkan ke dalam material kelongsong Zircalloy (Zirc-4 atau *Advanced Clad*). Satu perangkat bahan bakar memiliki 264 pin dan dikonfigurasi secara 17x17 dengan panjang sekitar setengah dari panjang bahan bakar standar PWR. Diameter pelet bahan bakar, ukuran *gap* dan ketebalan kelongsong masing-masing adalah 8,18 mm, 0,022 mm dan 0,573 mm. Adapun susunan pin dalam satu bundel bahan bakar dan ukuran radius pada satu pin bahan bakar ditampilkan pada Gambar 2.

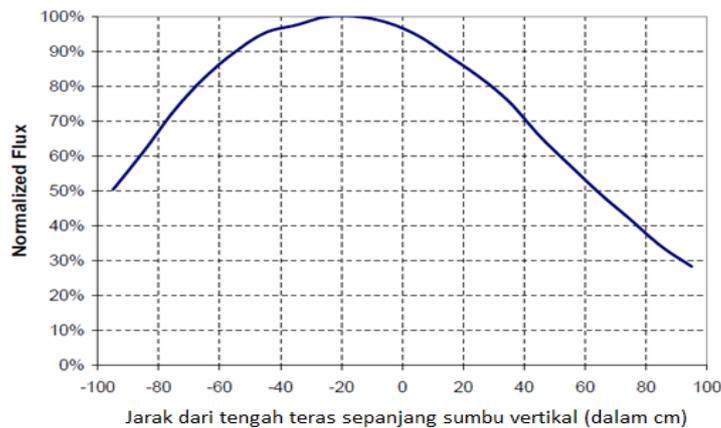


Gambar 2. Bundel bahan bakar reaktor PWR [19] dan ukuran tampang lintang pin.

Total terdapat 37 bundel bahan bakar dan 16 klaster batang kendali di dalam teras reaktor. Posisi teras di dalam bejana dan bentuk konfigurasi penyusunan bundel bahan bakarnya dapat dilihat pada Gambar 3. Sedangkan profil fluks neutron ternormalisasi didalam teras secara vertikal dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 3. Teras reaktor dan konfigurasi bahan bakar di teras [16].



Gambar 4. Profil normalisasi flux neutron axial [20].

Saat reaktor beroperasi, air pendingin di teras bergerak ke atas sebagai akibat dari gaya *buoyancy* hasil pemanasan pendingin oleh bahan bakar. Fluida pendingin yang menuju ke atas, kemudian berbelok ke arah radial dan masuk ke dalam area dimana terletak *steam generator*. Setelah memindahkan energinya ke *steam generator* untuk menghasilkan uap, temperatur fluida pendingin menurun dan densitasnya menjadi lebih besar, bergerak ke bawah mencapai *lower plenum*, yang selanjutnya kembali memasuki teras. Demikian seterusnya aliran berlangsung secara kontinu bersirkulasi ke seluruh sistem secara alamiah sehingga tidak diperlukan pompa untuk menggerakannya.

PEMODELAN TERAS REAKTOR PADA RELAP5.

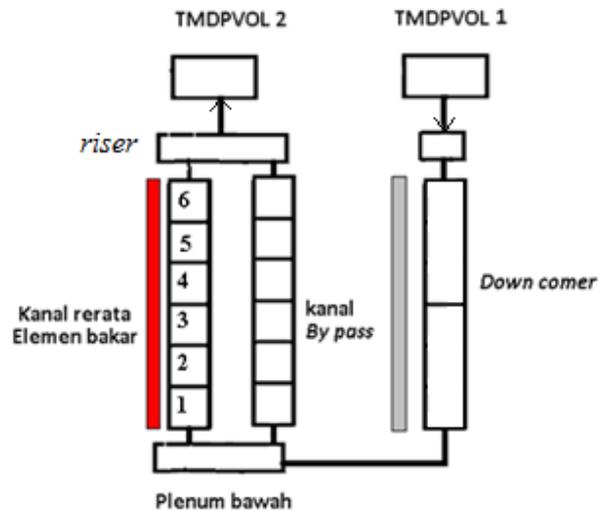
Secara umum langkah kerja dalam investigasi ini ditampilkan pada Gambar 5. Untuk melakukan investigasi karakteristik teras secara numerik, dilakukan pemodelan sistem reaktor terlebih dahulu menggunakan model-model generik yang ada pada RELAP5. Guna melakukan itu, perlu dipahami mekanisme kerja dari sistem reaktor.



Gambar 5. Langkah kerja investigasi.

Di dalam bejana reaktor, teras terletak disisi bagian bawah (lihat Gambar 1). Sebagaimana diungkapkan pada bagian deskripsi, di dalam teras air mengalir keatas akibat *buoyancy*. Saat kondisi tunak, dimana laju pembangkitan panas di teras telah sama dengan laju pengambilan panas oleh *steam generator*, aliran di sistem primer relatif konstan. Oleh karena itu maka fenomena keadaan tunak di teras dapat diinvestigasi dengan menggunakan model secara parsial. Bentuk hasil nodalisasi pemodelan parsial tersebut dapat dilihat pada Gambar 6. Pada Gambar 6 terlihat bahwa daerah teras dan *downcomer* diwakili menggunakan saluran pipa paralel (model PIPE). Daerah teras dibagi menjadi dua, yakni satu saluran rata-rata yang mewakili wilayah bahan bakar (sebelah kiri) dan satu saluran *bypass* yang mewakili wilayah dimana aliran pendingin tidak melewati daerah bahan bakar (sebelah kanan). Secara aksial kedua saluran ini dibagi menjadi 6 segmen yang masing-masing memiliki tinggi yang sama. Bagian plenum bawah (*lower plenum*) dan bagian keluaran teras (*riser*) masing-masing dimodelkan menggunakan volume tunggal (SNGLVOL). Sebagai kondisi batas (*boundary condition*), pada ujung awal *downcomer* dan bagian atas teras digunakan dua buah *time dependent volume* (TMDPVOL) yang masing-masing bertugas sebagai sumber penyuplai air dan tempat penampung air keluaran. Aliran dikontrol menggunakan beda tekanan diantara kedua TMDPVOL yang mewakili beda densitas air sisi panas (*hot leg*) dan sisi dingin (*cold leg*) sistem primer. Aliran fluida mengalir dari TMDPVOL1 yakni melalui *downcomer* dan menuju plenum bawah sebelum akhirnya masuk ke teras. Mengingat adanya perpindahan panas yang terjadi didalam teras, dimana elemen bahan bakar mentransfer panas hasil reaksi fisi ke air yang melewati kelongsong, maka disertakan model *HEAT STRUCTURE* (HS) pada model tersebut. Pada pemodelan ini digunakan dua HS, yakni (1) untuk merepresentasikan perpindahan panas dari *pin* bahan bakar ke air pendingin diteras dan (2) untuk merepresentasikan perpindahan panas dari sisi antara *downcomer* dan kanal *bypass* yang melewati *core barrel*.

Dari nodalisasi tersebut dibuat *input deck* guna keperluan perhitungan dengan program RELAP5. Dalam pembuatan *input deck*, dilakukan homogenisasi sumber panas teras. Adapun profil pembangkitan panas pada elemen bahan bakar secara vertikal dipakai profil distribusi flux neutron aksial saluran rerata seperti pada Gambar 4.



Gambar 6. Nodalisasi pemodelan bagian teras reaktor modular daya-kecil berpendingin sirkulasi alam.

Eksekusi perhitungan dilakukan dengan menggunakan kondisi batas (*boundary condition*) yang dikutip dari acuan yakni pada tekanan *pressurizer* 10,7 MPa, temperatur *inlet* teras 521 K dan laju alir sirkulasi alamiahnya 15400 gpm (sekitar 718 kg/s) [17]. Menurut acuan, kondisi tunak sisi primer tersebut dicapai saat laju alir air umpan pada sisi sekunder adalah 56,1 kg/s dan temperaturnya 306 K. Saat eksekusi, beda tekanan kedua TMDPVOL diatur sedemikian rupa sehingga laju alir kondisi tunak fluida pendingin di atas dapat diperoleh. Perhitungan pada RELAP5 dilakukan menggunakan mode transien yang dijalankan secukupnya hingga tercapai nilai hasil keluaran yang konstan.

HASIL PERHITUNGAN DAN PEMBAHASAN

Hasil ringkas perhitungan ditampilkan pada Tabel 2, Gambar 7 dan Gambar 8. Pada Tabel 2 penampilan hasil disandingkan dengan data yang dimiliki oleh reaktor PWR konvensional berdaya 1000 MW sebagai pembandingan. Tabel 2 menunjukkan bahwa tekanan kerja reaktor modular daya kecil (10,7 MPa) lebih rendah dari pada reaktor PWR konvensional berdaya besar (15,5 MPa). Tekanan kerja yang lebih rendah memiliki dua aspek dari sisi keselamatan. Disatu sisi memberikan margin yang lebih baik bagi pengungkung saat terjadi kecelakaan kehilangan pendingin (LOCA). Namun demikian, tekanan yang lebih rendah juga akan menyebabkan menurunnya batas temperatur pendidihan yakni temperatur saturasi (T_{sat}) yang menjadi lebih rendah. Melihat bahwa temperatur kerja reaktor ini berada pada rentang 521-565 K sementara besar T_{sat} adalah 589 K maka ada margin pendidihan sebesar $589-565=24$ K. Sementara itu, pada reaktor besar marginnya adalah $620-597,85=22,15$ K. Dengan melihat hasil data tersebut terlihat bahwa reaktor modular daya-kecil ini memiliki margin temperatur pendidihan ~ 2 K lebih baik dari reaktor PWR konvensional.

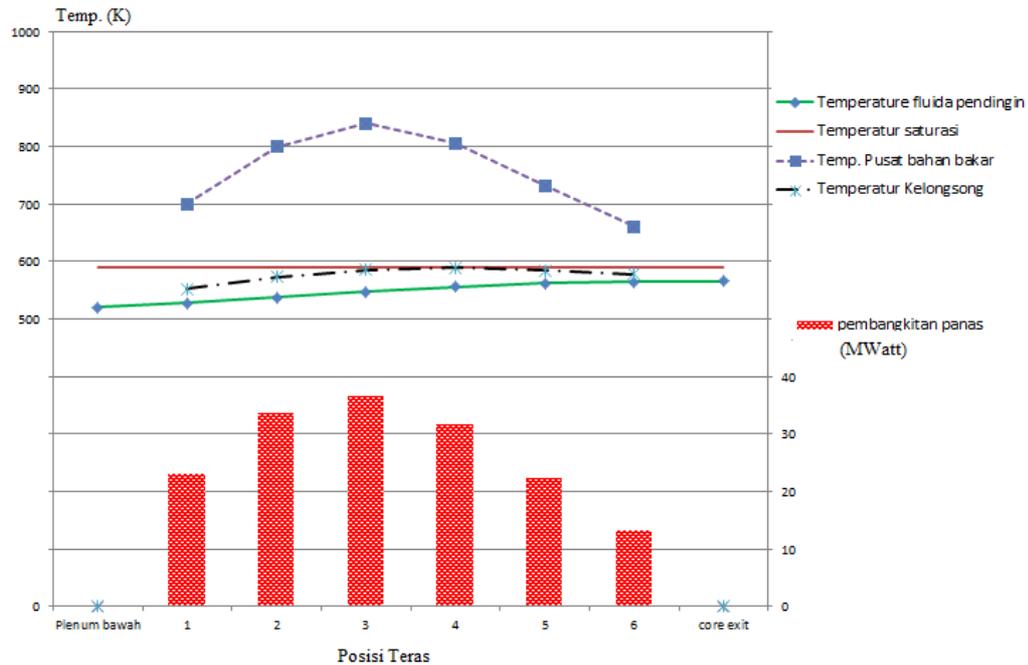
Tabel 2. Data hasil perhitungan kondisi tunak.

Parameter	Satuan	Reaktor modular daya-kecil	PWR konvensional (1000 MW) [21]
Daya	MWt	160	3400
Tekanan Pressurizer	MPa	10,7	15,5
Laju Alir	Kg/s	718,3	15170,14
Temperatur masuk	K	521	552,55
Temperatur keluar	K	565	597,85
Temperatur saturasi	K	589	620
Tinggi aktif bahan bakar	m	2	4,267
Kenaikan Temperatur diteras	K	44	45,3
Regim aliran (bilangan Reynold) di teras	-	89190 (<i>turbulence</i>)	-

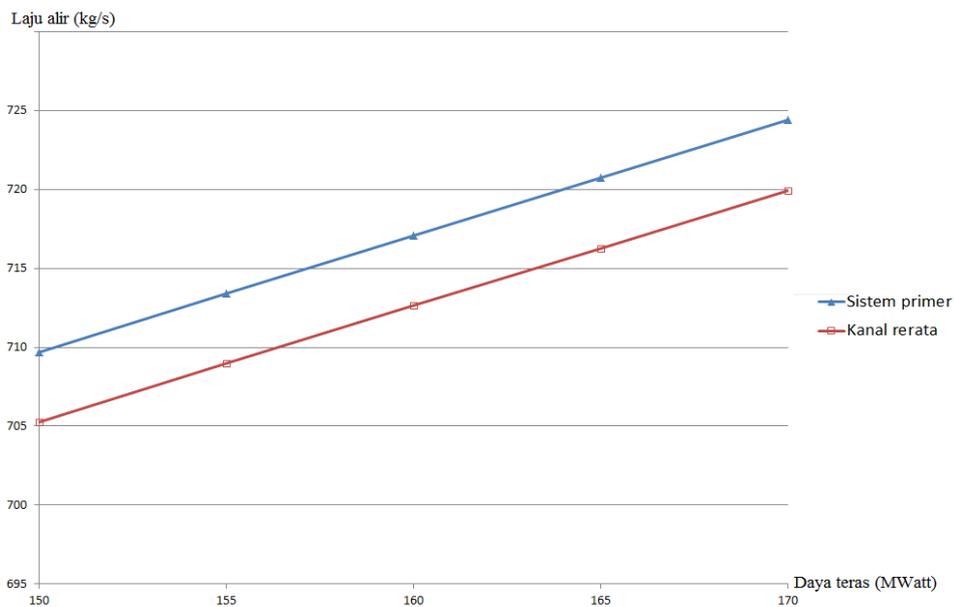
Hal lain yang terlihat pada reaktor ini adalah bahwa meskipun ukuran bahan bakarnya relatif jauh lebih pendek, namun kenaikan temperturnya di dalam teras hampir sama besar dari reaktor berdaya besar. Perhitungan dengan RELAP5 menunjukkan bahwa sepanjang 2 meter ketinggian teras, temperatur pendingin meningkat dari 521 K menjadi 565 K atau terjadi peningkatan sebesar 44 K. Sedangkan pada reaktor PWR konvensional, peningkatan temperatur adalah 45,3 K pada batang bahan bakar yang panjangnya 4,267 m. Hal ini menunjukkan bahwa laju alir *turbulence* (bilangan Reynold = 89190) di teras memberikan kinerja perpindahan panas yang lebih baik pada reaktor SMR dibanding reaktor konvensional. Meskipun demikian ada hal yang perlu diinvestigasi lebih jauh dari situasi ini. Mengingat pembangkitan daya secara vertikal membentuk pola *cosinus* dimana pembangkitan panas di bagian tengah lebih besar dibanding dibagian bawah dan atas, maka ada kemungkinan puncak temperatur kelongsong dibagian tengah melampaui temperatur saturasi sehingga dapat menyebabkan pendidihan inti (*nucleate boiling*). Oleh karena itu maka dilakukan pengecekan lanjutan terhadap distribusi panas dan temperatur secara vertikal di teras. Data hasil perhitungan ditampilkan pada Gambar 7.

Gambar 7 tersebut menunjukkan distribusi pembangkitan panas dan temperatur secara vertikal di teras. Distribusi pembangkitan daya aksial memiliki *power peaking factor* sebesar ~1,38. Terlihat bahwa pembangkitan panas terbesar terjadi pada bagian posisi vertikal nomor 3 yakni sekitar 36,5 MW. Dari sisi temperatur bahan bakar, temperatur maksimum di pusatnya mencapai ~840 K, dimana berada cukup jauh dari batas temperatur disainnya. Pada bagian posisi vertikal nomor 4, temperatur luar kelongsong tercatat sebesar 588,99 K yang merupakan temperatur terpanas kelongsong (*maximum cladding temperatur*) sepanjang batang bahan bakar. Temperatur ini masih berada di bawah temperatur saturasi (589,3 K). Ini menunjukkan bahwa tidak terjadi pendidihan inti di bagian titik terpanas. Fakta tersebut menunjukkan bahwa pada operasi daya nominal, temperatur kerja reaktor dalam kondisi yang dapat diterima.

Mengingat reaktor ini tidak menggunakan pompa untuk menggerakkan pendingin primer, maka laju alir di teras dapat mengalami perubahan saat terjadi transien daya maupun saat terjadi perubahan pemindahan panas oleh *steam generator*. Perubahan pemindahan panas oleh *steam generator* (misal: terjadinya kehilangan air umpan atau terjadinya kecelakaan pecahnya jalur pipa uap) akan menyebabkan perubahan perbedaan densitas pendingin antara sisi *riser* dan sisi *downcomer* yang akan menyebabkan perubahan laju alir. Selain itu perbedaan aliran juga dapat terjadi sebagai akibat dari perubahan daya. Oleh karena itu dilakukan simulasi dengan menggunakan daya yang sedikit lebih rendah dan lebih tinggi dari nilai nominalnya. Karakteristik laju alir pada peningkatan dan penurunan daya hasil kalkulasi dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 7. Distribusi vertikal pembangkitan panas dan temperatur pada teras rerata.



Gambar 8. Kurva hubungan laju alir dengan daya teras.

Gambar 8 menunjukkan hubungan antara daya teras dengan laju alir yang terjadi, baik di kanal rerata maupun di sistem primer. Hasil perhitungan laju alir ini merupakan pendekatan mengingat sistem reaktor tidak dimodelkan secara lingkaran penuh. Dalam perhitungan, *boundary condition* yang digunakan adalah nilai tekanan TMDPVOL yang dipakai saat mendapatkan nilai laju alir tunak untuk daya 160 MW. Gambar 8 menunjukkan tendensi perubahan laju alir saat daya berubah. Dari karakteristik tersebut, dapat dilihat bahwa reaktor yang didisain dengan pendinginan sirkulasi alamiah pada sisi primernya secara umum memiliki keunggulan dibanding reaktor yang menggunakan pompa. Di sini selain sistem tidak akan pernah mengalami kejadian kecelakaan kehilangan laju alir (*loss of flow accident*, LOFA), juga memiliki karakteristik dimana laju alir akan menjadi lebih cepat secara otomatis saat daya meningkat. Hal ini tentunya akan memberikan keuntungan dari segi margin

keselamatan. Yakni, saat daya meningkat secara tidak diinginkan, maka pemindahan panas oleh fluida pendingin di teras juga meningkat karena laju alir meningkat. Sebagai konsekwensinya, peningkatan temperatur bahan bakar juga menjadi lebih landau.

KESIMPULAN

Pada investigasi yang dilakukan dengan memodelkan teras reaktor modular daya-kecil berpendingin sirkulasi alam ke dalam model parsial RELAP5 dan dengan eksekusi beberapa perhitungan kondisi tunak. Hasilnya menunjukkan bahwa saat beroperasi pada daya nominalnya, reaktor memiliki margin temperatur pendidihan sebesar 2K lebih baik dari reaktor PWR konvensional berdaya besar. Selain itu, keunggulan margin keselamatan reaktor modular daya-kecil ini juga ditunjukkan dari naiknya laju alir mengikuti kenaikan dayanya yang berarti memiliki sifat keselamatan yang melekat (*inherent safety*).

DAFTAR PUSTAKA

1. Hidayatullah, H., S. Susyadi, and M.H. Subki, Design and Technology Development for Small Modular Reactors – Safety Expectations, Prospects and Impediments of Their Deployment. *Progress in Nuclear Energy*, 2015. 79(0): p. 127-135.
2. Sullivan, M.A., et al., The Future of Nuclear Power. *The Electricity Journal*, 2014. 27(4): p. 7-15.
3. Kessides, I.N. and V. Kuznetsov, Small Modular Reactors for Enhancing Energy Security in Developing Countries, 2012, World Bank: Washington DC, USA. p. 26 pp.
4. Schulz, T.L., Westinghouse AP1000 advanced passive plant. *Nuclear Engineering and Design*, 2006. 236(14-16): p. 1547-1557.
5. Agrawal, S.K., A. Chauhan, and A. Mishra, The VVERs at Kudankulam. *Nuclear Engineering and Design*, 2006. 236(7-8): p. 812-835.
6. Nguyen, T., et al., Development of severe accident management guidance (SAMG) for the Canadian CANDU 6 nuclear power plants. *Nuclear Engineering and Design*, 2008. 238(4): p. 1093-1099.
7. Lumbanraja, S.M., Kajian Implementasi FLEXBLUE di Indonesia. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir V*, 2014. 16(2): p. 107 - 117.
8. Carelli, M.D., et al., The design and safety features of the IRIS reactor. *Nuclear Engineering and Design*, 2004. 230(1-3): p. 151-167.
9. Halfinger, J.A. and M.D. Haggerty, The B&W mPOWER Scalable Practical Nuclear Reactor Design. *Nuclear Technology*, 2012. 178(May 2012): p. 164-169.
10. Ingersoll, D.T., Deliberately small reactors and the second nuclear era. *Progress in Nuclear Energy*, 2009. 51(4-5): p. 589-603.
11. Fukami, M.V.I. and A. Santecchia, CAREM project: Innovative small PWR. *Progress in Nuclear Energy*, 2000. 37(1-4): p. 265-270.
12. José N. Reyes, J., NuScale Plant Safety in Response to Extreme Events. *Nuclear Technology*, 2012. 178(128): p. 153-163
13. Marcel, C.P., et al., Stability of self-pressurized, natural circulation, low thermo-dynamic quality, nuclear reactors: The stability performance of the CAREM-25 reactor. *Nuclear Engineering and Design*, 2013. 265(0): p. 232-243.
14. Reyes Jr, J.N. and P. Lorenzini, NuScale Power: A modular, scalable approach to commercial nuclear power. *Nuclear News*, 2010. 53(7): p. 97.
15. Ingersoll, D.T., et al., NuScale small modular reactor for Co-generation of electricity and water. *Desalination*, 2014. 340(0): p. 84-93.

16. José N. Reyes, J., Introduction to NuScale Design, in U.S. Nuclear Regulatory Commission Pre-Application Meeting 2008, NuScale Power Inc.: Rockville, MD.
17. Jose N. Reyes, J. Meeting Introduction and Overview of NuScale Design. in U.S. Nuclear Regulatory Commission Pre-Application Meeting. 2009. Rockville, MD: NuScale Power.
18. NuScale. NuScale Status in the Regulatory Process. 15 June 2015]; Available from: <http://www.nuscalepower.com/our-technology/nrc-interaction>.
19. Song, K.-n. and S.-h. Lee, Effect of Weld Properties on the Crush Strength of the PWR Spacer Grid. Science and Technology of Nuclear Installations, 2012. 2012: p. 12.
20. Modro, S., et al., Multi-application small light water reactor final report. Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, 2003.
21. Sutharshan, B., et al., The AP1000™ Reactor: Passive Safety and Modular Design. Energy Procedia, 2011. 7(0): p. 293-302.