



Studi Karakteristik Termohidrolik Pada Kanal Pendingin Teras Reaktor SMART Menggunakan CFD *Ansys Fluent*

Agus Waluyo¹, Anggoro Septilarso², Efrizon Umar³

¹Direktorat Perizinan Instalasi dan Bahan Nuklir - BAPETEN, Jakarta, Indonesia

²Direktorat Inspeksi Instalasi dan Bahan Nuklir - BAPETEN, Jakarta, Indonesia

³Pusat Riset Teknologi Nuklir dan Terapan - BRIN, Bandung, Indonesia

a.waluyo@bapeten.go.id, a.septilarso@bapeten.go.id, efrizon@batan.go.id

Makalah Penelitian

Menyerahkan

4 November 2021

Diterima

11 Juli 2022

Terbit

29 Juli 2022

ABSTRAK

PLTN jenis *Small Modular Reactor* (SMR) saat ini berkembang sangat pesat dengan menawarkan berbagai macam fitur keselamatan baik yang aktif maupun pasif. Salah satu SMR yang saat ini akan dibangun dan dioperasikan adalah reaktor SMART (*System-integrated Modular Advanced Reactor*). Reaktor SMART didesain menggunakan tipe bahan bakar PWR konvensional namun beroperasi dengan laju alir dan temperatur inlet teras yang lebih rendah daripada PWR konvensional. Adanya perbedaan mendasar ini perlu menjadi catatan tersendiri bagi kita dalam melakukan evaluasi keselamatan terhadap Reaktor SMART, khususnya untuk aspek termohidrolik. Telah dilakukan karakteristik termohidrolik yang telah dilakukan sebelumnya dengan menggunakan *code* MATRA, namun demikian masih belum diketahui distribusi temperatur di sub kanal pendingin. Oleh karena itu, tujuan dari studi ini adalah menghitung distribusi temperatur di sub kanal pendingin pada SMART. Program yang dipakai pada studi ini adalah CFD ANSYS. Kode *Computational Fluid Dynamic* (CFD) *Ansys Fluent* 2021 R1 digunakan untuk mensimulasikan aliran fluida pendingin dan perpindahan panas dari bahan bakar ke fluida pendingin. Sub kanal pendingin dimodelkan terdiri dari empat bahan bakar dengan diameter 0,95 cm dan *pitch* 1,26 cm dalam susunan segi empat yang dikelilingi fluida pendingin air ringan. Berdasarkan perhitungan diperoleh hasil bahwa terjadi kenaikan temperatur rata-rata fluida pendingin antara sisi masukan dan keluaran sub kanal pendingin sebesar 60 °C yang mana nilai ini lebih besar daripada desain Reaktor SMART. Temperatur pusat bahan bakar dan kelongsong bahan bakar secara berurutan terhitung sebesar 1100°C dan 350°C. Perbedaan ini disebabkan karena asumsi pemodelan dan tipe aliran yang belum seluruhnya sesuai dengan desain sebenarnya. Susunan bahan bakar diasumsikan terdiri dari bahan bakar murni dan mengabaikan adanya variasi bahan bakar dan perangkat bahan bakar yang sebenarnya.

Kata kunci: Reaktor SMART, CFD, Ansys Fluent, Termohidrolik

ABSTRACT

The *Small Modular Reactor* (SMR) type nuclear power plant is currently growing very rapidly by offering various kinds of safety features, both active and passive. One of the SMRs currently to be built and operated is the SMART (*System-integrated Modular Advanced Reactor*) reactor. The SMART reactor is designed to use conventional PWR fuel types but operates at a lower flow rate and core inlet temperature than conventional PWR. The existence of this basic difference needs to be a separate note for us in evaluating the safety of the SMART Reactor, especially for the thermohydraulic aspect. The thermohydraulic characteristics have been carried out previously using the MATRA code, however, the temperature distribution in the cooling sub channel is still unknown. Therefore, the purpose of this study is to calculate the temperature distribution in the cooling sub-channel on SMART. The program used in this study is CFD ANSYS. Ansys Fluent 2021 R1 Computational Fluid Dynamic (CFD) computer code was used to simulate coolant flow and heat transfer from fuel to coolant. The cooling sub channel was modeled consisting of four fuels with a diameter of 0.95 cm and a pitch of 1.26 cm in a rectangular arrangement surrounded by light water coolant. Based on the calculation, there is an increase in the average temperature of the coolant between the input and output sides of the coolant sub channel of 60 °C, which is greater than the SMART reactor design. The fuel center and fuel cladding temperatures were calculated at 1100 °C and 350 °C, respectively. This difference is caused by the modeling assumptions which is still far from the actual design. The model was assumed to consist of pure fuel and ignores the actual variations in fuel and fuel assembly.

Keywords: SMART Reactor, CFD, Ansys Fluent, Thermal Hydraulic

1. PENDAHULUAN

Pada beberapa tahun terakhir *Small Modular Reactor* (SMR) berkembang semakin pesat dan menjadi pokok diskusi utama pada banyak *Side Events General Conference International Atomic Energy Agency* (IAEA) 2021 [1]. Hal ini diakibatkan karena adanya keunggulan yang ditawarkan oleh SMR dibanding teknologi reaktor konvensional yang sudah ada sebelumnya, yaitu kemampuan adaptif teknologi SMR yang dapat menyesuaikan dengan tingkat kebutuhan energi. Teknologi ini juga menjanjikan adanya kebutuhan pembiayaan awal yang lebih rendah dengan metodologi modularisasi yang menjadi keunggulannya.

Menyadari adanya ketertarikan yang tinggi dari negara-negara anggota terhadap SMR, IAEA berinisiatif untuk memfasilitasi hal ini dengan mempublikasikan *Advanced in Small Modular Reactor Technology Development* [1]. Dalam publikasi ini teridentifikasi beberapa teknologi SMR yang sedang dikembangkan oleh di dunia, salah satunya adalah Reaktor SMART (*System-Integrated Modular Advanced Reactor*) yang dikembangkan oleh KAERI dan K. A. CARE [1].

Reaktor SMART dikenakan sebagai reaktor modular dari jenis *Pressurized Water Reactor* (PWR) yang mampu membangkitkan daya 107 MW(e) [1]. Dengan daya tersebut disertai kemampuan untuk desalinasi air laut dan pemanfaatan panas proses untuk industri, reaktor ini dianggap cocok untuk wilayah kepulauan seperti Indonesia.

Reaktor SMART didesain menggunakan tipe bahan bakar PWR konvensional namun beroperasi dengan laju alir dan temperatur inlet teras yang lebih rendah daripada PWR konvensional [2,3]. Adanya perbedaan desain ini, menjadi perlu bagi kita untuk melakukan evaluasi keselamatan ulang dengan memperhitungkan lingkungan kerja yang spesifik untuk Reaktor SMART, khususnya aspek termohidrolik.

Evaluasi karakteristik termohidrolik umum teras Reaktor SMART telah dilakukan dengan menggunakan *code* MATRA [2,4], namun belum mencakup distribusi temperatur di sub kanal pendingin. Oleh karena itu, tujuan dari studi ini adalah untuk mengetahui distribusi temperatur di sub kanal pendingin pada teras Reaktor SMART. Program yang dipakai pada studi ini adalah *CFD* ANSYS. Kode *Computational Fluid Dynamic* (CFD) *Ansys Fluent* 2021 R1 digunakan untuk mensimulasikan aliran fluida pendingin dan perpindahan panas dari bahan bakar ke fluida pendingin

2. REAKTOR SMART

Desain reaktor SMART ditujukan untuk pembangkitan daya listrik, desalinasi air laut, dan pembangkitan panas industri. Desainnya mengadopsi prinsip modularisasi dan sistem keselamatan pasif maju guna meningkatkan aspek keselamatan, kehandalan dan keekonomian.

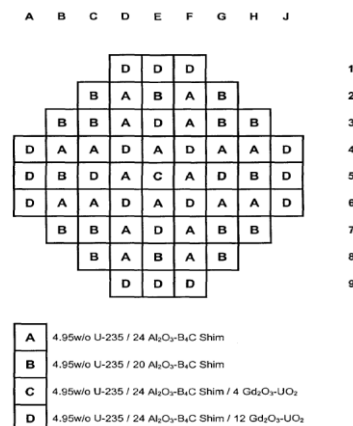
Teras reaktor didesain menggunakan bahan bakar UO_2 pengkayaan rendah dengan densitas daya rendah

untuk memastikan bahwa marjin keselamatan akan tetap tinggi meskipun dalam kejadian transien sekalipun.

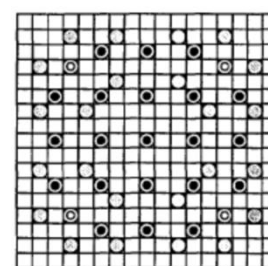
Total terdapat 57 perangkat bahan bakar dengan panjang 2 m yang masing-masing tersusun dari bahan bakar dengan pengkayaan 5% dengan geometri 17 x 17 sebagaimana bahan bakar standar *Pressurized Water Reactor* (PWR) [3]. Ada 4 tipe perangkat bahan bakar yang dibedakan dari jumlah bahan bakar dan racun bakar di tiap perangkatnya. Racun bakar ini ditujukan untuk meratakan profil radial dan aksial daya teras. Tipe perangkat bahan bakar tersebut dapat dilihat pada Tabel 1. Sedangkan pola pemuatan bahan bakar pada teras dan pola perangkat bahan bakar, secara berurutan dapat dilihat pada Gambar 1 dan Gambar 2.

Tabel 1. Tipe Perangkat Bahan Bakar [3].

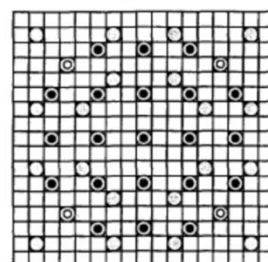
Tipe	Jumlah Perangkat	Jumlah Bahan Bakar	Jumlah $Al_2O_3-B_4C$	Jumlah $Gd_2O_3-UO_2$
A	20	240	24	-
B	16	244	20	-
C	1	236	24	4
D	20	228	24	12



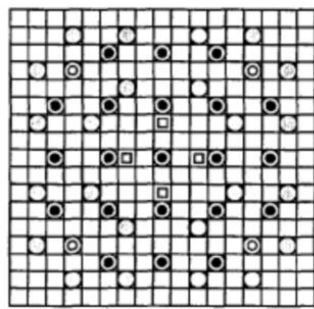
Gambar 1. Pola Pemuatan Teras [3].



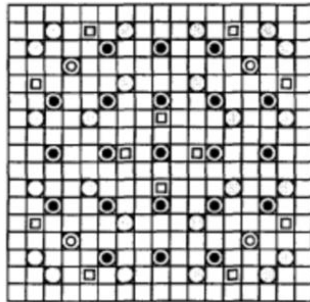
Type A



Type B



Type C



Type D

- Fuel Rod
- Al₂O₃-B₄C Poison Rod
- ▣ Gd₂O₃-UO₂ Fuel Rod
- ⊙ Instrumentation Thimble
- Guide Tube

Gambar 2. Pola Perangkat Bahan Bakar [3].

Parameter termohidrolik teras reaktor SMART dapat dilihat pada Tabel 2. Pada tabel ini dapat diketahui bahwa laju pembangkitan panas linier (LHGR) reaktor SMART ini cukup rendah dibandingkan reaktor tipe PWR pada umumnya [2,3]. Dengan desain temperatur masukan dan fluks massa pendingin teras yang rendah, maka dapat diperkirakan bahwa parameter desain termohidrolik yang menjadi pembatas dalam aspek keselamatan reaktor adalah nilai *Departure From The Nucleate Boiling Ratio* (DNBR).

Tabel 2. Parameter Termohidrolik [2,3].

Parameter	Nilai
Daya termal Teras, MW	330
Tekanan sistem, bar	150
Tinggi teras efektif, m	2,0
Fluks panas teras rerata, kW/m ²	402
LHGR teras rerata, kW/m	12,0
Temperatur masukan teras, °C	270
Kenaikan temperatur teras, °C	40
Fluks massa pendingin teras rerata kg/m ² /s	1010

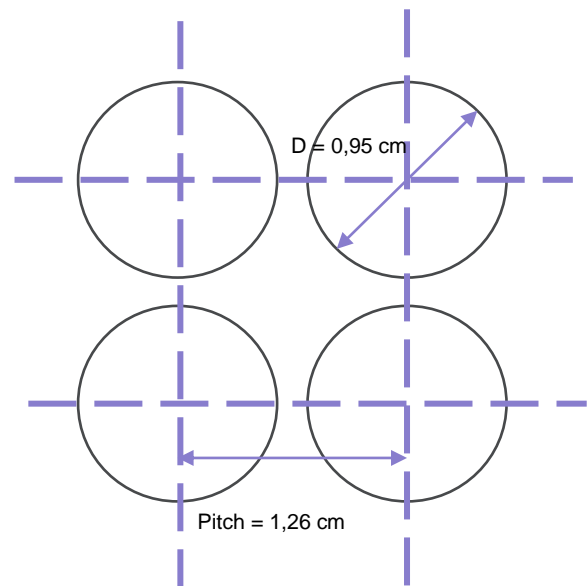
3. METODE

CFD adalah suatu ilmu yang mempelajari cara memprediksi aliran fluida, perpindahan panas, reaksi kimia, dan fenomena lainnya dengan menyelesaikan persamaan matematika[5]. Dalam pemodelan ini digunakan program komputer CFD *Ansys* versi 2021 R1.

Pemodelan dilakukan dengan mengikuti langkah-langkah sebagai berikut :

1. Pemodelan geometri;
2. Proses *meshing* dimana bidang atau volume kerja dibagi menjadi sel-sel yang lebih kecil;
3. Pendefinisian model fisik;
4. Pendefinisian kondisi-kondisi batas;
5. Penyelesaian persamaan-persamaan matematika secara iteratif, dalam kondisi tunak (*steady state*) atau transien;
6. Analisis dan visualisasi dari solusi *CFD*.

Analisis termohidrolik teras reaktor SMART dengan menggunakan metode *Computational Fluid Dynamic* (CFD) dilakukan dengan pendekatan perhitungan perpindahan panas pada sub kanal pendingin teras reaktor SMART. Sub kanal pendingin teras reaktor SMART berbentuk segi empat seperti ditunjukkan pada Gambar 3 .

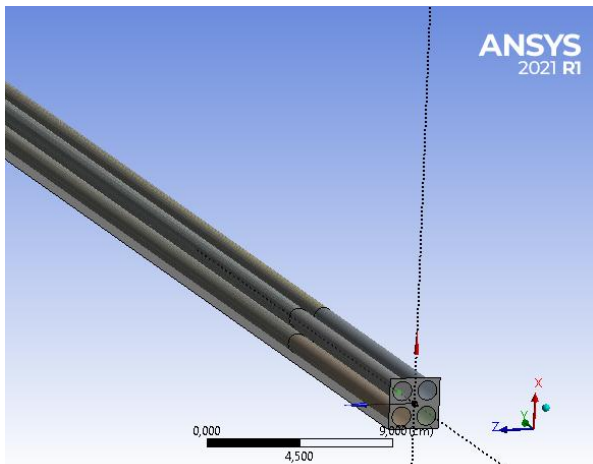


Gambar 3. Penampang Horizontal (XZ) Sub Kanal Pendingin.

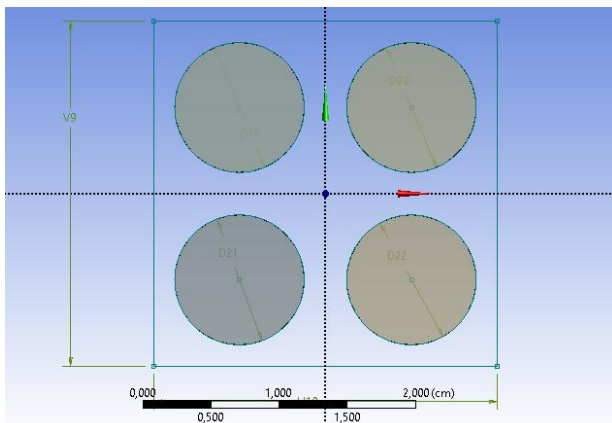
Pada studi ini kami menggunakan perangkat pemodelan CFD *Ansys Fluent* [6]. Bahan bakar pada teras reaktor dimodelkan sebagai *solid* dimana dianggap bahwa tidak ada gap antara pelet bahan bakar dengan kelongsong. Model sub kanal bahan bakar dibangun menggunakan fitur *Design Modeler* milik *Ansys Fluent*. Penampang model sub kanal pendingin dapat dilihat pada Gambar 4.

Sebagai masukan kami menggunakan nilai parameter sebagaimana yang tercantum dalam Tabel 2 di atas. Sifat-sifat air diatur sebagai *piece-wise linear* untuk beberapa tingkat temperatur sesuai kondisi kerja pada teras Reaktor SMART [7].

Pemodelan termohidrolik untuk sub kanal bahan bakar reaktor SMART dilakukan pada kondisi *steady state* (tunak) serta diasumsikan aliran air pendingin di sub kanal pendingin merupakan aliran laminar. Secara lengkap, kondisi batas untuk masukan *Ansys Fluent* dapat dilihat pada Tabel 3.



(a) Penampang Diagonal (XYZ) Model Sub Kanal Pendingin.



(b) Penampang Horizontal (XZ) Model Sub Kanal Pendingin.

Gambar 4. Penampang Model Sub Kanal Pendingin.

Tabel 3. Kondisi Batas

Parameter	Nilai
Laju alir masukan	0,0888 kg/detik
Temperatur masukan	270 °C
Daya bahan bakar	169 MW/m ³
Tekanan operasi	15 Mpa

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pemodelan dan perhitungan menggunakan *Ansys Fluent* dapat dilihat pada Gambar 5, Gambar 6, Gambar 7 dan Tabel 4. Dari Gambar 5 dapat dilihat bahwa pada bagian pusat sub kanal pendingin terjadi kenaikan temperatur 6 °C dari 270 °C pada sisi masukan menjadi 276 °C pada sisi keluaran sub kanal pendingin. Namun demikian untuk satu sub kanal pendingin terjadi kenaikan temperatur rata-rata sebesar 64,93 °C dari 270 °C pada sisi masukan menjadi 334,93 °C pada sisi keluaran sub kanal pendingin sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.

Hasil perhitungan dalam studi ini menunjukkan adanya perbedaan dibandingkan dengan referensi [2,3]. Dalam referensi disebutkan bahwa peningkatan temperatur pendingin antara sisi masukan dan keluaran adalah 40 °C sedangkan dari hasil studi ini adalah 60 °C.

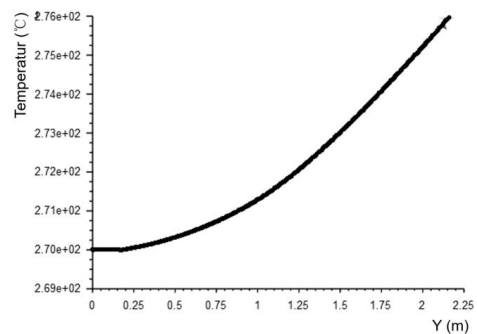
Lebih jauh pada Gambar 6 diperoleh informasi mengenai kontur temperatur pendingin secara visual.

Disini terlihat jelas bahwa temperatur pendingin yang ada di tengah kanal mempunyai temperatur yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan temperatur pendingin pada area dekat bahan bakar.

Selanjutnya dari Gambar 7 dapat diketahui bahwa temperatur di bagian pusat bahan bakar memiliki temperatur yang lebih tinggi dibanding di pinggir bahan bakar. Pada sisi outlet ($y = 2 \text{ m}$) temperatur pada pusat bahan bakar adalah 1100 °C sedangkan temperatur di pinggir bahan bakar (kelongsong) sekitar 350 °C. Nilai yang dihasilkan ini memiliki perbedaan bila dibandingkan dengan salah satu referensi dimana diperkirakan bahwa temperatur di pusat bahan bakar dan di kelongsong secara berurutan adalah 1053 °C dan 363 °C [8].

Adanya perbedaan ini disebabkan karena adanya simplifikasi model yang digunakan dalam studi ini. Pada Gambar 1 dan Gambar 2 terlihat bahwa ada beberapa tipe bahan bakar dan perangkat bahan bakar dalam teras Reaktor SMART. Dalam satu teras terdiri dari empat tipe perangkat bahan bakar dan satu perangkat bahan bakar terdiri dari *guide tube*, batang kendali serta *instrumentation Thimble*. Namun dalam studi ini hanya terdiri dari empat bahan bakar murni tanpa ada tambahan instrumen lainnya.

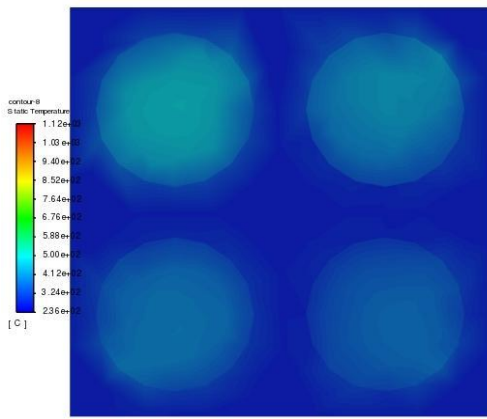
Penyebab lain adanya perbedaan ini adalah karena pengesetan tipe aliran yang kita gunakan dalam pemodelan ini. Dalam pemodelan yang dilakukan saat ini mengasumsikan bahwa aliran di dalam sub kanal adalah aliran laminar. Pada kenyataannya tipe aliran dalam sub kanal sangat berpengaruh terhadap kinerja perpindahan panas konveksi yang pada akhirnya berpengaruh terhadap distribusi temperatur di dalam sub kanal. Kemungkinan tipe aliran yang digunakan dalam pemodelan ini kurang tepat, sehingga untuk studi lebih lanjut diharapkan aliran di dalam sub kanal disesuaikan dengan kondisi yang lebih realistis dengan menghitung nilai Reynold terlebih dahulu.



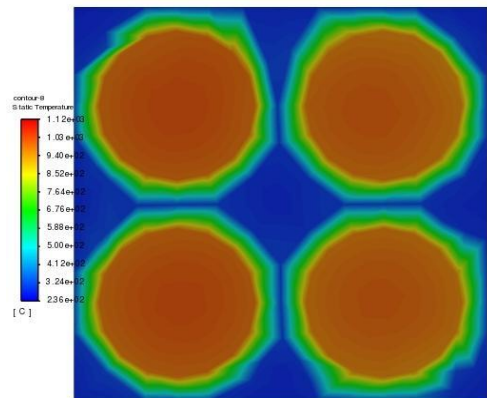
Gambar 5. Grafik kenaikan temperatur pendingin terhadap ketinggian (Y) pada pusat sub kanal pendingin [6].

Tabel 4 Temperatur pendingin masuk dan keluar di sub kanal

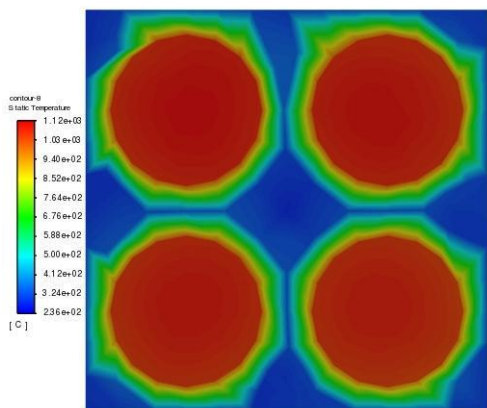
Bagian Sub Kanal	Temperatur
Inlet	270,00 °C
Outlet	334,93 °C



(a) Kontur temperatur pendingin sub kanal pendingin pada bagian inlet (Y = 0 m).

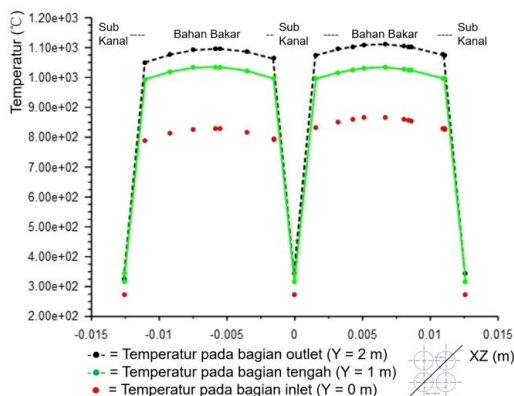


(b) Kontur temperatur pendingin sub kanal pendingin pada bagian tengah (Y = 1 m).



(c) Kontur temperatur pendingin sub kanal bahan bakar pada bagian outlet (Y = 2m).

Gambar 6. Kontur temperatur pendingin pada sub kanal pendingin.



Gambar 7. Distribusi temperatur secara radial [6].

5. KESIMPULAN

Telah dilakukan perhitungan termohidrolik untuk sub kanal pendingin pada teras Reaktor SMART dengan menggunakan *Ansys Fluent*. Hasil perhitungan menunjukkan adanya kenaikan temperatur pendingin pada sisi keluaran dibandingkan dengan sisi masukan sub kanal pendingin. Pada sisi keluaran, temperatur pusat bahan bakar dan kelongsong terhitung, secara berurutan adalah 1100 °C dan 350 °C.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami ucapkan terima kasih kepada Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) PSTNT-BATAN dan Tim atas dukungan serta bantuannya sehingga penelitian ini dapat berjalan dengan lancar.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. IAEA, *Advances in Small Modular Reactor technology Developments, A supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS) 2020 edition*: Vienna: IAEA; 2000.
- [2]. Chungchan Lee, et al, *Nuclear and Thermal Hydraulic Design Characteristic of the SMART Core, GENES4/ANP2003*, Sep 15-19, 2003, Kyoto, Japan, 2003.
- [3]. KAERI, *Nuclear Characteristic Analysis Report for System-Integrated Modular Advanced Reactor, KAERI/TR-1162/98*, Korea, 1998.
- [4]. Z. Cheng, *Strategies for Developing Subchannel Capability in an Advanced System Thermalhydraulic Code: A Literature Review, CW-111420-CONF-005, Rev.0*, IAEA, 2014.
- [5]. Firman Tuakia, *Dasar-Dasar CFD Menggunakan Fluent*, Informatika, Bandung, 2008.
- [6]. *Ansys® Academic Research Mechanical, 2021 R1, Help System, Coupled Field Analysis Guide*, ANSYS, Inc.
- [7]. J. H. Keenan, F. G. Keyes, P. G. Hill, and J. G. Moore, "Steam Tables", Wiley, New York, 1969.
- [8]. Y. I. Alzaben, *Neutronics and Thermal-Hydraulics Safety Related Investigations of an Innovative Boron-Free Core Integrated Within a Generic Small Modular Reactor*, Dissertation, Karlsruhe Institut für Technologie (KIT), 2019.