



## Analisis Distribusi Temperatur Dengan Metode CFD Pada Fluida Primer *Integral Pressurized Water Reactor (iPWR)*

Sunny Ineza Putri<sup>1</sup>, Nailul 'Atifah<sup>2</sup>, Adlisyah Hakim Syawaludin<sup>3</sup>, Leonardo Sintong Partogi Hutasoit<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Program Studi Teknik Mesin, Universitas Pamulang, Jl. Surya Kencana No. 1, Tangerang Selatan, Indonesia

E-mail : dosen02783@unpam.ac.id <sup>1</sup>, dosen00410@unpam.ac.id <sup>2</sup>

Masuk : 28 Februari 2024

Direvisi: 1 April 2024

Disetujui: 26 April 2024

**Abstract:** *The fluid circulating in the iPWR uses two working fluids, the primary fluid as a reactor coolant which delivers heat to the secondary fluid to generate steam. The secondary working fluid flows in the steam generator pipe without direct contact with the primary working fluid. The cooling process of the primary working fluid can be simulated using the Computational Fluid Dynamics (CFD) method to obtain the temperature distribution in the reactor core. So, this research will focus on analyzing the temperature distribution of the first working fluid in the iPWR reactor core using the CFD method. Simulation of the primary fluid flow being heated or cooled under normal conditions to reach the upper and lower temperature targets by adjusting the fluid flow speed used. Under normal and/or mal function conditions, the water temperature does not reach saturation. However, this research has not considered the material condition and pressure when the auxiliary tools are disabled.*

**Keywords:** *iPWR; NuScale; CFD; Primary Fluid.*

**Abstrak:** Fluida yang bersirkulasi pada iPWR menggunakan dua fluida kerja, fluida primer sebagai pendingin reaktor yang menghantarkan panas ke fluida kedua untuk membangkitkan uap. Fluida kerja kedua mengalir dalam pipa steam generator tidak kontak langsung dengan fluida kerja primer. Proses pendinginan fluida kerja primer dapat disimulasikan dengan metode *Computational Fluid Dynamics (CFD)* guna mendapatkan distribusi temperatur di teras reaktor. Sehingga, pada penelitian ini akan berfokus pada analisis distribusi temperatur fluida kerja pertama di teras reaktor iPWR menggunakan metode CFD. Simulasi aliran fluida primer dipanaskan ataupun didinginkan pada keadaan normal mencapai target temperatur atas dan bawah dengan mengatur kecepatan aliran fluida yang digunakan. Pada keadaan normal dan saat kendala temperatur air tidak mencapai keadaan saturasi. Namun, pada penelitian ini belum mempertimbangkan kondisi material dan tekanan pada keadaan *auxiliary tools* mati.

**Kata kunci:** iPWR; NuScale; CFD; Fluida Primer.

## PENDAHULUAN

*Small Modular Reactor (SMR)* adalah reaktor nuklir tingkat lanjut yang memiliki kapasitas daya hingga 300 MW(e) per unit, lebih kecil daripada reaktor nuklir tradisional [1]. Salah satu tipe SMR yang sedang dikembangkan oleh beberapa negara adalah Integral Pressurized Water Reactor (iPWR) yang mana komponen primer dan sekunder ditempatkan di dalam bejana reaktor sehingga menghilangkan kebutuhan pipa sambungan sehingga meningkatkan keselamatan dan keandalan [2]. Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) mendukung Perusahaan Listrik Negara (PLN) Indonesia Power untuk melakukan kajian terhadap teknologi reaktor modular kecil untuk pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) di Kalimantan Barat [3]. Kajian teknologi melibatkan para peneliti BRIN sebagai studi kelayakan [3].

Prinsip kerja dasar iPWR sama dengan PWR namun lebih kecil dalam segi ukuran dan fungsi kerja. Fluida yang bersirkulasi pada iPWR menggunakan dua fluida kerja, fluida primer sebagai pendingin reaktor yang menghantarkan panas ke fluida kedua untuk membangkitkan uap. Fluida kerja kedua mengalir dalam pipa *steam generator* tidak kontak langsung dengan fluida kerja primer. Perkembangan reaktor nuklir yang sudah mencapai generasi IV menerapkan reaktor yang nuklir yang lebih aman, keberlanjutan, efisien, dan hemat. *Small Modular Reactor (SMR)* berbeda dari reaktor lainnya dengan alasan (1) daya yang lebih rendah; (2) ukuran fisik dan tapak yang lebih kecil; (3) modularitas struktur bangunan reaktor yang lebih baik; (4) margin keamanan

yang lebih meningkat; (5) fitur keamanan yang lebih baik; (6) risiko finansial yang lebih minim, dan (7) fleksibilitas penggunaan unit reaktor untuk berbagai kebutuhan [4]. *Small Modular Reactor* (SMR) adalah reaktor nuklir fisi yang ukurannya lebih kecil daripada reaktor konvensional lainnya yaitu dengan kapasitas dibawah 300 MW dan dengan sistem modular yang jika sistem modular tersebut digabungkan akan membentuk PLTN skala besar [5], [6]. Pada beberapa tahun belakangan, perkembangan teknologi SMR tipe *Integral Pressurized Water Reactor* (iPWR) sedang tren, karena mengintegrasikan komponen sistem utama untuk menghilangkan atau meminimalkan potensi pemicu kecelakaan dan menggunakan *Passive System Safety* (PSS) atau sistem keselamatan pasif untuk melawan dan memitigasi pemicu kecelakaan yang tersisa [7]. Saat ini di dunia terdapat sekitar 11 desain dan konsep SMR tipe iPWR secara global [8], dengan sebagian besar masih dalam tahap pengembangan, dan beberapa masih perencanaan untuk penerapan jangka pendek.

Tujuan yang ingin dicapai pada penelitian ini adalah menganalisis distribusi temperatur fluida primer dengan bantuan pompa dengan spesifikasi debit aliran fluida, dan menganalisis distribusi temperatur fluida primer ketika pompa mati atau fluida mengalir secara konveksi alami. Sirkulasi aliran fluida pada iPWR banyak sudah banyak diteliti untuk kasus kecelakaan, sirkulasi fluida primer dapat mengalir secara konveksi alami, seperti pada penelitian Susyadi untuk NuScale dan Yifan Xu untuk IP200 [9], [10]. Adapun penelitian mengenai hidraulik termal pada penelitian Ig. Djoko Irianto untuk iWR NHR200-II [11]. Ketiga penelitian tersebut menggunakan metode analisis numerik menggunakan RELAP5 [9]–[11] dan diintegrasikan dengan MATLAB [10]. Pada penelitian ini akan berfokus pada iPWR NuScale yang beroperasi dengan daya 160 MW, tekanan 12,7 MPa, aliran fluida primer alami sekitar 536 kg/s dimana temperatur inlet dan outletnya adalah 536,9 K dan 591,9 K [9]. Kondisi tunak dapat terjadi pada aliran fluida primer dengan temperatur *feed water* adalah 422 K dan laju alirannya 68 kg/s [9].

Reaktor iPWR NuScale memiliki dua pembangkit uap (*once-through helical coil steam generators*) yang terintegrasi langsung di dalam bejana tekan reaktor (*reactor pressure vessel*). *Steam generator* dirancang dapat diganti dan terdiri dari tabung dengan panjang rata-rata adalah 30,1 m dan total luas perpindahan panas sekitar 1624,2 m<sup>2</sup> [11]. Untuk situasi darurat, sistem air umpan diperkaya dengan sistem air umpan darurat pasif yang memungkinkan air di kolam masuk secara pasif ke dalam *helical coil* dengan membuka katup kontrol.

## METODOLOGI

Penelitian ini dimulai dari studi literatur tentang desain iPWR khususnya untuk aliran fluida primer. Studi literatur juga diperlukan untuk mengetahui konsep dasar, prinsip dasar, sistem keselamatan dan penelitian terdahulu tentang aliran fluida primer pada iPWR. Penelitian terdahulu juga melakukan simulasi sistem keselamatan pada aliran fluida Ketika mal fungsi menggunakan software RELAP, sedangkan pada penelitian ini menggunakan *software* ANSYS Fluent. ANSYS Fluent adalah alat bantu, sementara *Computational Fluid Dynamics* (CFD) merupakan metode yang digunakan dalam penelitian ini. Metode CFD dipilih karena dapat menunjukkan distribusi temperatur dimana terjadi pemanasan yang mungkin berlebih sehingga dapat menjadi fokus penelitian lainnya dalam mengembangkan teknologi keselamatan reaktor khususnya pada reaktor iPWR. Karena yang dianalisis adalah fluida primer, maka metode yang paling cocok adalah CFD dimana mempertimbangkan karakteristik aliran fluida dan perpindahan panas yang bekerja pada fluida primer tersebut.

Perancangan desain aliran fluida iPWR disederhanakan menjadi dua saluran fluida primer yang terhubung satu sama lain. Dari Gambar 1, diketahui bahwa desain iPWR simetri pada bagian kiri dan kanannya, oleh karena itu penelitian ini mengambil satu sisi sebelah kanan, dengan asumsi bahwa hasil akhir distribusi temperatur pada sisi bagian kiri akan sama dengan sisi kanan. Pada Gambar 1, saluran atau kolom fluida primer pertama mengarah ke atas adalah proses pemanasan dengan menerima panas dari reaktor dan kolom fluida kedua mengalir ke bawah adalah proses pendinginan dengan melepaskan panas ke *steam generator*. Hal ini dilakukan karena terbatasnya kapasitas komputer simulasi yang digunakan. Namun, penyederhanaan desain ini tidak mengurangi kelayakan data, karena ukuran dan kondisi batas yang digunakan masih sesuai pada kondisi yang sebenarnya.



**Gambar 1.** Skema modul reaktor iPWR NuScale [12].

Tipe iPWR yang digunakan adalah NuScale dengan daya 160 MWt, 50 MWe, tekanan sistem primer 12,8 MPa. Reaktor iPWR NuScale memiliki dua pembangkit uap (*once through helical coil steam generators*) yang terintegrasi langsung di dalam bejana tekan reaktor (*reactor pressure vessel*). Steam generator dirancang dapat diganti dan terdiri dari tabung dengan panjang rata-rata 30,1 m dan total luas perpindahan panas sekitar 1624,2 m<sup>2</sup>. Adapun kondisi batas yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Kondisi batas simulasi

Parameter	Referensi	Kondisi batas yang digunakan
Teras reaktor daya output termal	160 MW(t)	160 MW(t)
Daya output listrik	50 MW(e)	50 MW(e)
Tekanan operasi	12,8 MPa	12,8 MPa
Laju massa aliran fluida primer	567 kg/s	-
Kecepatan rata-rata aliran fluida primer	0,82 m/s	0,25 m/s
Temperatur atas aliran fluida primer	585,9 K	585 K
Temperatur bawah aliran fluida primer	531,9 K	531 K
<i>Heat flux</i> rata-rata teras reaktor	268,1 kW/m <sup>2</sup>	268,1 kW/m <sup>2</sup>
Temperatur rata-rata teras reaktor	557,04 K	557 K
Diameter <i>core</i> aktif	1,51 m	1,51 m
Diameter kolom aliran fluida primer	-	0,375 m
Tinggi kolom aliran fluida primer	17,32 m	17,32 m

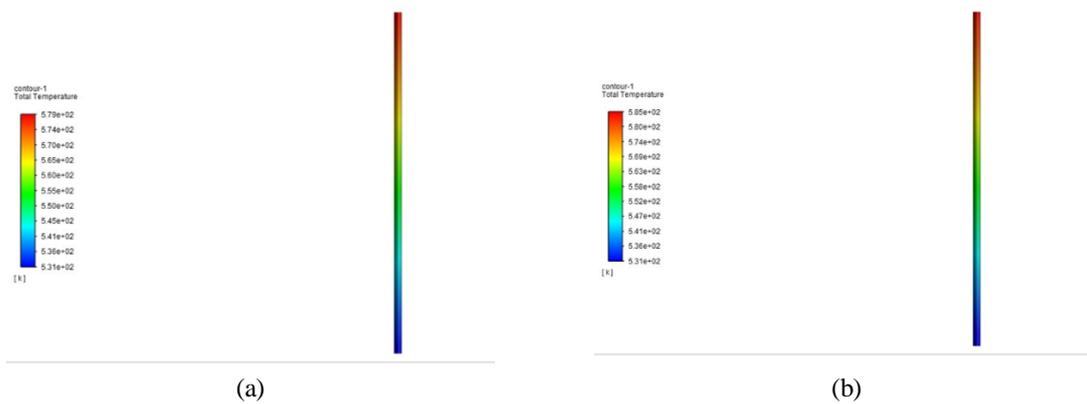
Properti fluida konstan dapat diterapkan atau dikembangkan dengan metode *piecewise*. Kolom saluran fluida primer pertama menerima sumber panas dari reaktor yang dianggap sebagai *heat flux* yang diatur konstan untuk setiap bagian perpindahan panas diberikan pada kolom teras reaktor. Sedangkan pada kolom kedua, dimana fluida primer melepaskan panas, akan menggunakan *heat flux* konstan, seperti pada kolom pertama, namun *heat flux* pada kolom kedua ini bekerja sebagai *heat sink* pada setiap bagian perpindahan panas pada *steam generator*. Data atau kondisi batas yang digunakan pada perhitungan numerik ialah data referensi penelitian sebelumnya.

*Coupled algorithm* digunakan untuk menyelesaikan kasus *pressure-velocity coupling* karena dalam *boundary condition* menggunakan *velocity-inlet* dan *pressure-outlet*. Standard k-epsilon digunakan untuk mengaktifkan model turbulen pada aliran air. *First order discretization* digunakan pada tekanan dan *second order upwind scheme* digunakan untuk persamaan momentum, energi kinetik turbulen, laju disipasi turbulen, dan energi. Kriteria konvergensi 0,001 digunakan pada kontinuitas, untuk kecepatan x, y dan z, serta untuk k dan epsilon, sementara energi menggunakan kriteria konvergensi 1e-06. *Operating condition* diatur pada tekanan 12,8 MPa dan mengaktifkan gravitasi dengan nilai 9,81 m/s<sup>2</sup> pada sumbu y.

Pada proses analisis, hasil distribusi temperatur aliran fluida primer divalidasi dari data referensi yang ada pada penelitian sebelumnya. Jika beda hasil antara hasil simulasi dengan data referensi lebih dari 10%, maka perlu dilakukan pengaturan pada kondisi batas dan pengaturan simulasi agar didapatkan hasil yang lebih baik. Selain parameter temperatur, yang perlu diamati adalah tekanan pada saluran aliran fluida primer. Jika terjadi kenaikan tekanan, maka akan mempengaruhi kondisi operasional sebenarnya, sehingga perlu dilakukan pengaturan ulang. Massa jenis dari fluida primer diamati agar mengetahui apakah terjadi perubahan fase pada aliran fluida primer. Pada dasarnya, tekanan operasional yang digunakan pada saluran fluida primer adalah menjaga agar fluida tidak terjadi perubahan fase dan memiliki temperatur didih yang tinggi. Nilai temperatur didih sangat bergantung pada tekanan saluran fluida primer, setelah fluida melewati temperatur didihnya maka akan terjadi perubahan fase. Kasus seperti ini yang harus dihindari dalam simulasi.

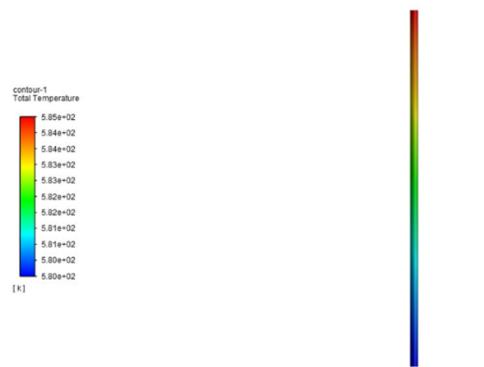
### HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan kondisi batas dan pengaturan simulasi pada Ansys Fluent menggunakan kondisi batas seperti pada Tabel 1, distribusi temperatur pada aliran fluida primer dipanaskan dengan kondisi normal ditampilkan pada Gambar 2 berikut.



**Gambar 2. a).** Distribusi temperatur aliran fluida primer dipanaskan.  
**b).** Distribusi temperatur aliran fluida primer didinginkan.

Pada Gambar 2a menunjukkan temperatur fluida paling atas tidak mencapai temperatur atas rata-rata teras reaktor yang bernilai 585 K. Temperatur atas yang didapatkan dari simulasi adalah sekitar 579 K. Hal ini disebabkan temperatur air selalu lebih rendah daripada temperatur lingkungannya. Pada Gambar 2b menunjukkan temperatur fluida paling bawah mencapai temperatur atas rata-rata teras reaktor yang bernilai 531 K. Temperatur yang dihasilkan pada keadaan ini juga masih di bawah temperatur saturasi, artinya fluida primer masih dalam keadaan *subcooled liquid*. Fluida primer tidak berubah fase menjadi uap karena temperatur saturasi air pada tekanan 12,8 MPa adalah 602,75 K. Kecepatan aliran fluida primer yang digunakan adalah 0,25 m/s berbeda dengan referensi yaitu 0,82 m/s. Hal ini disebabkan oleh ukuran diameter kolom aliran fluida primer yang digunakan berbeda. Pada penelitian ini diameter *core* aktif dibagi menjadi empat, dengan asumsi dibagi membujur sisi kanan dan kiri adalah identik. Sementara setengah sisinya dibagi dua lagi dengan asumsi seperempatnya adalah kolom fluida dipanaskan dan seperempat sisinya adalah kolom fluida didinginkan. Pada kasus ini, beroperasi pada keadaan normal atau semua *auxiliary tools* beroperasi normal tanpa ada kendala.



**Gambar 3.** Distribusi temperatur aliran fluida primer didinginkan saat kendala.

Pada Gambar 3 menunjukkan bahwa temperatur bawah aliran fluida tidak mencapai target referensi yaitu 531 K, sedangkan hasil simulasi menunjukkan temperatur 580 K. Hal ini disebabkan oleh pada keadaan kendala dengan semua *auxiliary tools* mati, sehingga aliran fluida primer didinginkan dengan memanfaatkan konveksi alami. Pada keadaan kendala, *steam generator* utama melepaskan panas pada *steam generator* kedua dimana fluida pendinginnya dari kolam reaktor. Dari *steam generator* utama ke *steam generator* kedua terdapat katup yang otomatis terbuka ketika terjadi kendala. Dengan mendinginnya *steam generator*, maka panas fluida primer akan turun dengan turunnya temperatur fluida pada *steam generator*. Namun, dengan asumsi temperatur reaktor masih dalam keadaan temperatur rata-rata yaitu 557 K, maka fluida primer hanya bisa turun temperatur hingga 580 K. Temperatur yang dihasilkan pada keadaan ini juga masih di bawah temperatur saturasi, artinya fluida primer masih dalam keadaan *subcooled liquid*. Fluida primer tidak berubah fase menjadi uap karena temperatur saturasi air pada tekanan 12,8 MPa adalah 602,75 K. Hal ini juga disebabkan oleh kasus simulasi yang digunakan adalah dalam keadaan tunak. Jika dilakukan simulasi dalam keadaan *transient*, maka akan didapatkan waktu yang dibutuhkan untuk fluida primer bisa turun ke temperatur normal.

Berdasarkan hasil simulasi aliran fluida primer didinginkan pada keadaan normal dan pada saat kendala, temperatur fluida primer masih dibawah temperatur saturasi atau dibawah 602,75 K. Dengan tekanan 12,8 MPa ini dirancang untuk air tidak mengalami perubahan fase dan mampu menerima panas dari teras reaktor. Tekanan pada core dijaga konstan pada 12,8 MPa dengan menggunakan *pressurizer* tepat diatas kolom *riser* aliran fluida primer. Hal ini diperlukan karena sesuai dengan hukum Termodinamika dimana tekanan sebanding dengan temperaturnya, maka ketika temperatur naik maka tekanan bisa naik.

Pada keadaan normal, baik fluida dipanaskan ataupun didinginkan menggunakan kecepatan aliran fluida yang sama yaitu 0,25 m/s, dibawah kecepatan aliran fluida referensi. Hal ini disebabkan karena berbedanya ukuran kolom aliran fluida primer. Dengan kecepatan fluida yang lebih rendah dari referensi artinya membutuhkan spesifikasi pompa yang berbeda dengan yang digunakan referensi. Dengan menurunnya kecepatan fluida maka juga dapat menurunkan daya pompa yang dibutuhkan. Kecepatan aliran fluida primer didinginkan sama dengan yang dipanaskan yaitu 0,25 m/s, namun pada aliran fluida didinginkan fluida mengalir dari atas ke bawah dengan memanfaatkan konveksi alami ketika terjadi pelepasan panas dari fluida primer ke fluida sekunder. Dengan nilai kecepatan yang cukup kecil ini dan bantuan konveksi alami, Sehingga ketika ada kendala dalam operasi, pompa dalam keadaan mati tidak akan menjadi masalah karena masih dibantu oleh konveksi alami. Walaupun pada keadaan saat kendala temperatur air tidak mencapai temperatur saturasi, namun jika terlalu lama pada keadaan temperatur tinggi akan mempengaruhi kondisi material yang ada di dalam core. Pada penelitian selanjutnya perlu meneliti kondisi material pada *core*. Selain itu, perlu juga mempertimbangkan pengaruh tekanan karena *pressurizer* mati dan oksidasi yang terjadi dapat menyebabkan korosi.

## KESIMPULAN

1. Simulasi aliran fluida primer dipanaskan ataupun didinginkan pada keadaan normal mencapai target temperatur atas dan bawah dengan mengatur kecepatan aliran fluida yang digunakan. Pada keadaan normal temperatur air tidak mencapai keadaan saturasi.
2. Simulasi aliran fluida primer didinginkan pada keadaan kendala target temperatur atas dan bawah dengan mengatur kecepatan aliran fluida yang digunakan. Pada keadaan saat kendala temperatur air tidak mencapai keadaan saturasi. Namun, pada penelitian ini belum mempertimbangkan kondisi material dan tekanan pada keadaan *auxiliary tools* mati.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] International Atomic Energy Association: IAEA, "What are Small Modular Reactors (SMRs)?," 2023. <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-are-small-modular-reactors-smrs> (accessed Oct. 10, 2023).
- [2] International Atomic Energy Association: IAEA, "Integral Pressurized Water Reactor Simulator (SMR)." <https://www.iaea.org/topics/nuclear-power-reactors/nuclear-reactor-simulators-for-education-and-training/integral-pressurized-water-reactor-simulator#:~:text=One type of SMR currently,of enhancing safety and reliability> (accessed Oct. 10, 2023).
- [3] B. R. dan I. N. (BRIN), "BRIN Dukung PLN Indonesia Power Kaji SMR NuScale di Kalimantan Barat," 2023. <https://brin.go.id/news/114073/brin-dukung-pln-indonesia-power-kaji-smr-nuscale-di-kalimantan-barat> (accessed Oct. 10, 2023).
- [4] I. L. Pioro, Ed., "Chapter 20 - Small Modular Reactors (SMRs)," in *Handbook of Generation IV Nuclear Reactors (Second Edition)*, Second., Woodhead Publishing, 2023, pp. 681–711. doi:

- <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820588-4.00026-8>.
- [5] S. Gao, G. Huang, X. Zhang, J. Chen, and D. Han, "SMR siting for the electricity system management," *J. Clean. Prod.*, vol. 297, p. 126621, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126621.
- [6] B. Mignacca and G. Locatelli, "Economics and finance of Small Modular Reactors: A systematic review and research agenda," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 118, no. July 2019, p. 109519, 2020, doi: 10.1016/j.rser.2019.109519.
- [7] C. Zeliang, Y. Mi, A. Tokuhiko, L. Lu, and A. Rezvoi, "Developmental Status , Design Characteristics and," *Energies*, 2020.
- [8] International Atomic Energy Association: IAEA, "Advances in Small Modular Reactor Technology Developments," *IAEA Adv. React. Inf. Syst.*, 2014.
- [9] Susyadi, A. S. Ekariansyah, H. Tjahjono, and D. T. S. Tjahyani, "Analysis on inadvertent operation of decay heat removal system in NuScale reactor," *AIP Conf. Proc.*, vol. 2180, 2019, doi: 10.1063/1.5135523.
- [10] Y. Xu, M. Peng, G. Xia, and H. Shang, "Optimization of forced circulation to natural circulation transition characteristics of IPWR," *Ann. Nucl. Energy*, vol. 157, p. 108249, 2021, doi: 10.1016/j.anucene.2021.108249.
- [11] I. D. Irianto, S. Sriyono, S. Dibyo, D. H. Salimy, T. Surbakti, and R. Kusumastuti, "Analysis of Cogeneration Energy Conversion System Design in Ipwr Reactor," *J. Teknol. Reakt. Nukl. Tri Dasa Mega*, vol. 24, no. 1, p. 19, 2022, doi: 10.17146/tdm.2022.24.1.6414.
- [12] NuScale, "NuScale Products." <https://www.nuscalepower.com/en/products> (accessed Oct. 10, 2023).