

© Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi
Karya ini berada di bawah Lisensi Creative Commons Atribusi-BerbagiSerupa 4.0 Internasional
Terjemahan artikel 10.22146/jnteti.v14i2.17426

Memajukan Transisi Energi Indonesia: Studi Simulasi *Coal to Nuclear* (C2N)

Irfan Eko Budiyanto¹, Sinta Uri El Hakim²

¹ PT PLN Nusantara Power, Jl. Ketintang Baru 11, Surabaya, Jawa Timur 60231, Indonesia

² RWTH-Aachen (Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen) University, Aachen, Cologne 52056, Germany

[Diserahkan: 20 Desember 2024, Direvisi: 13 Maret 2025, Diterima: 9 April 2025]

Penulis Korespondensi: Irfan Eko Budiyanto (email: irfan.eb@pln.co.id)

INTISARI — Target Indonesia mencapai *net zero emission* (NZE) pada tahun 2060 mengharuskan adanya perubahan transformatif dari sistem tenaga yang bergantung pada batu bara ke sumber energi nuklir. Meskipun penelitian sebelumnya telah mengeksplorasi berbagai aspek transisi energi, penelitian terkait substitusi *boiler* berbahan bakar batu bara menjadi reaktor nuklir dengan tetap mempertahankan parameter masukan dan keluaran dari infrastruktur yang ada masih terbatas. Makalah ini menyajikan pendekatan untuk memfasilitasi transisi energi nuklir Indonesia melalui studi simulasi *coal to nuclear* (C2N). Fokus utama studi ini terletak pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) batu bara 400 MW yang mengandalkan pembakaran batu bara. Studi ini dirancang untuk memodelkan proses konversi sistem pembakaran batu bara ke pengaturan reaktor nuklir modular dengan tetap mempertahankan infrastruktur turbin uap dan generator yang sudah ada. Studi ini didasarkan pada kenyataan bahwa penggantian sumber panas berbasis reaktor nuklir harus memenuhi persyaratan rancangan siklus air dan uap yang sudah ada sebelumnya. Berbagai konfigurasi untuk mengganti *boiler* yang digunakan saat ini dengan reaktor nuklir dianalisis dengan mempertimbangkan aspek teknik, operasional, dan pemodelan. Hasil simulasi model untuk sembilan kondisi operasi yang berbeda menunjukkan penyimpangan suhu uap utama sekitar 3% dari nilai rancangan, dimulai pada 120 MWe ke atas. Namun demikian, semua parameter lain dari hasil simulasi konversi menunjukkan penyimpangan yang sangat kecil. Penyimpangan tersebut sangat sesuai dengan kondisi operasional sebenarnya PLTU batu bara sebelumnya. Makalah ini menekankan pada simulasi yang dapat menunjukkan integrasi yang menjanjikan antara infrastruktur lama dengan teknologi nuklir yang sedang berkembang.

KATA KUNCI — Transisi Energi Nuklir, Simulasi Pembangkit Listrik, Konversi *Coal to Nuclear*, *Boiler* Bakar Baru Bara, Reaktor Nuklir.

I. PENDAHULUAN

Pada pertemuan The UN Climate Change Conference (COP26) di Glasgow, Indonesia telah menyatakan komitmennya untuk mencapai *net-zero emission* (NZE) pada tahun 2060 untuk menjawab tantangan energi masa depan dunia. Sebagai salah satu perusahaan energi terbesar di Indonesia, Perusahaan Listrik Negara (PT PLN) telah mengembangkan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) Hijau 2021–2030 untuk mendukung komitmen tersebut. Salah satu inisiatif strategis dalam RUPTL tersebut adalah mengoptimalkan penggunaan energi baru untuk penyediaan pembangkit listrik untuk meningkatkan bauran energi [1]. Strategi tersebut juga mempertimbangkan dan mengkaji implementasi pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) di Indonesia. Beberapa negara telah mempelajari dan mengimplementasikan strategi transisi energi nuklir ini. Strategi yang umum diterapkan adalah melalui konversi pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) batu bara menjadi PLTN dengan mekanisme *coal-to-nuclear* (C2N) [2]. Mekanisme ini mengubah sistem pembakaran batu bara PLTU menjadi reaktor nuklir modular yang dilengkapi dengan generator uap. Meskipun demikian, pada mekanisme ini sistem turbin dan generator uap yang ada masih tetap dipertahankan.

Transisi dari energi berbasis batu bara ke sistem energi terbarukan menghadirkan tantangan yang dapat diatasi melalui solusi penyimpanan energi dan siklus daya yang inovatif. Sistem penyimpanan energi berbasis garam cair dapat diintegrasikan pada turbin uap yang ada untuk meningkatkan fleksibilitas dan efisiensi, sekaligus terhubung ke sumber

terbarukan [3]. Berbagai siklus daya reaktor modular kecil (*small modular reactor*, SMR) telah dianalisis untuk meningkatkan efisiensi termodinamika dan mengurangi biaya. Siklus uap tradisional dengan reaktor berpendingin air mencapai efisiensi sebesar 33,5%, sedangkan reaktor helium berpendingin gas dapat mencapai efisiensi hingga 52,9% pada 1.000 °C menggunakan siklus biner yang menggabungkan siklus Brayton dan Rankine [4]. Selain itu, integrasi antara reaktor nuklir suhu tinggi modular dengan siklus uap dapat mencapai efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan teknologi nuklir tradisional [5]. Strategi pengisian ulang daya ini menawarkan sebuah cara untuk menurunkan emisi gas rumah kaca sekaligus menjaga keamanan energi dan memanfaatkan aset pembangkit listrik yang sudah ada. Berbagai konfigurasi telah dianalisis, termasuk mengintegrasikan penyimpanan energi termal (*thermal energy storage*, TES) untuk fleksibilitas [6] dan mengadaptasi sistem turbin uap yang ada ke SMR [7]. Penelitian sebelumnya mengungkapkan bahwa mengganti tahap turbin bertekanan tinggi merupakan opsi yang paling menguntungkan secara ekonomi. SMR bersuhu tinggi, seperti rancangan Kairos Power, memiliki potensi untuk diintegrasikan dengan infrastruktur pembangkit listrik tenaga batu bara yang ada [8].

Meskipun penelitian sebelumnya telah mengeksplorasi berbagai aspek transisi energi [5], [7], [8], penelitian tentang penggantian *boiler* berbahan bakar batu bara dengan reaktor nuklir sekaligus mempertahankan parameter masukan dan keluaran dari sistem saat ini masih terbatas. Tekanan, suhu, aliran massa, dan entalpi air umpan harus selaras dengan

parameter operasional dari pengaturan yang sudah ada. Terlebih lagi, karakteristik utama uap yang dihasilkan oleh generator uap harus memenuhi persyaratan turbin tekanan tinggi. Demikian pula, uap *hot reheat* yang dihasilkan harus memenuhi parameter yang dibutuhkan oleh turbin tekanan menengah yang ada, dengan masukan uap *cold reheat* berdasarkan parameter keluaran turbin bertekanan tinggi.

Penelitian ini mengembangkan simulasi pembangkit listrik C2N untuk mengatasi gap penelitian tersebut. Simulasi C2N dirancang untuk memodelkan proses konversi sistem pembakaran batu bara ke konfigurasi reaktor nuklir modular dengan tetap mempertahankan infrastruktur turbin uap dan generator yang sudah ada. Penelitian ini menekankan adanya potensi simulasi tersebut dalam memfasilitasi penerapan teknologi energi bersih, sehingga memajukan upaya Indonesia menuju masa depan yang berkelanjutan dan rendah karbon.

II. PENELITIAN TERKAIT

A. POINT KINETICS

Point kinetics merupakan konsep dasar fisika reaktor nuklir, khususnya untuk menghitung fluks neutron dan reaktivitas. *Point kinetics equation* (PKE) menyediakan model sederhana yang menggambarkan perilaku bergantung-waktu dari populasi neutron dan prekursor neutron tunda di dalam reaktor. Persamaan ini didasarkan pada asumsi bahwa reaktor bertindak sebagai sumber titik, yang merupakan asumsi yang valid untuk reaktor berukuran kecil atau ketika terjadi penyisipan reaktivitas kecil [9]. PKE terdiri atas gabungan persamaan diferensial biasa yang menyatakan hubungan antara densitas neutron, reaktivitas, dan konsentrasi prekursor neutron tunda. Dinamika persamaan ini dipengaruhi oleh beberapa faktor, termasuk jumlah kelompok neutron tunda, yang dapat berkisar antara satu hingga enam atau lebih, tergantung pada jenis reaktor dan kondisi operasional. PKE merupakan persamaan penting dalam kinetika reaktor karena dapat dengan efisien memprediksi perilaku reaktor pada berbagai skenario operasional [10]. PKE dijelaskan dalam (1) dan (2).

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{\rho(t) - \beta}{\Lambda} n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) + S(t) \quad (1)$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{n(t)}{\Lambda} - \lambda_i C_i(t) \quad (2)$$

dengan $n(t)$ adalah populasi neutron pada waktu t , $C_i(t)$ adalah prekursor untuk neutron tunda pada kelompok energi i dan waktu t , $S(t)$ adalah produksi sumber neutron pada waktu t , Λ adalah waktu pembangkitan neutron, β adalah fraksi neutron tunda, λ_i adalah konstanta peluruhan prekursor neutron tunda untuk kelompok energi i , dan $\rho(t)$ adalah reaktivitas pada waktu t .

Pada fisika reaktor nuklir, reaktivitas total pada inti merupakan parameter penting karena menunjukkan jumlah kontribusi berbagai mekanisme reaktivitas. Pendekatan penjumlahan ini memberikan pemahaman menyeluruh tentang faktor yang memengaruhi kinerja dan batas keamanan reaktor. Reaktivitas total dipengaruhi oleh beberapa mekanisme umpan balik, antara lain koefisien suhu, posisi batang kendali, dan keberadaan racun reaktor. Semua faktor tersebut harus diperhatikan untuk memastikan reaktor beroperasi dengan aman dan efisien. Kontribusi reaktivitas batang kendali ditentukan menggunakan data rancangan batang kendali. Dengan demikian, reaktivitas total pada inti dihitung dengan menjumlahkan semua reaktivitas yang berkontribusi, sebagaimana ditunjukkan pada (3) dan (4).

$$\rho_{total} = \rho_{excess} + (\rho_{CR} + \rho_{Xe} + \rho_T) \quad (3)$$

$$\rho_{CR} = \sum_{i=0}^n \rho_{CR_i} \quad (4)$$

dengan ρ_{total} adalah reaktivitas total, ρ_{excess} adalah reaktivitas berlebih bahan bakar, ρ_{CR} adalah reaktivitas batang kendali total, ρ_{Xe} adalah reaktivitas racun xenon, ρ_T adalah reaktivitas suhu negatif dari efek Doppler, dan ρ_{CR_i} adalah reaktivitas batang kendali dari batang kendali nomor i .

Salah satu kontributor utama reaktivitas adalah koefisien suhu, yang menunjukkan pengaruh perubahan suhu terhadap reaktivitas reaktor. Misalnya, saat suhu bahan bakar meningkat, efek Doppler biasanya menurunkan reaktivitas dengan memperluas resonansi penyerapan neutron pada bahan bakar [11]. Selain itu, reaktivitas dari batang kendali, boron cair, dan racun reaktor harus diperhatikan. Saat batang kendali dimasukkan ke dalam teras reaktor, batang kendali tersebut menyerap neutron, sehingga menurunkan reaktivitas. Sebaliknya, saat batang kendali ditarik, batang kendali tersebut menyebabkan reaktivitas positif, yang dapat menyebabkan peningkatan daya keluaran jika tidak dikendalikan dengan baik. Faktor-faktor ini harus dikelola dengan baik untuk memastikan reaktor beroperasi dengan aman dan efisien.

B. HIGH-TEMPERATURE GAS-COOLED REACTOR PEBBLE-BED MODULE (HTR-PM)

High-temperature gas-cooled reactor pebble-bed module (HTR-PM) merupakan pembangkit percontohan Tiongkok yang dikembangkan oleh Institute of Nuclear and New Energy Technology di Universitas Tsinghua. Pembangkit tersebut terdiri atas dua reaktor modular bola kerikil (*pebble-bed*) 250 MW yang masing-masing mempunyai generator uap yang menggerakkan satu turbin uap dengan keluaran sebesar 210 MW. Jalur produksi bahan bakar percontohan ini dirancang untuk memproduksi 300.000 elemen bahan bakar kerikil (*pebble*) setiap tahunnya. Proyek ini bertujuan untuk menunjukkan daya saing ekonomi dari HTR-PM komersial serta membuktikan bahwa pembangkit tersebut tidak memerlukan prosedur penanggulangan kecelakaan ataupun langkah darurat di luar lokasi [12]. HTR-PM dirancang dengan memperhatikan beberapa fitur keselamatan, sehingga kinerjanya kuat dan andal. Salah satu fitur tersebut adalah inventaris radioaktif minimal dalam pendingin helium primer selama beroperasi pada kondisi normal, yang berarti bahwa tindakan darurat tidak diperlukan bahkan jika terjadi pelepasan. Selain itu, selama terjadi kecelakaan reaktivitas atau kehilangan pendingin, kenaikan suhu elemen bahan bakar tidak menyebabkan pelepasan zat radioaktif dalam jumlah besar [13].

HTR-PM menggabungkan prinsip keselamatan yang melekat pada reaktor gas berpendingin suhu tinggi modular reaktor modular (*high-temperature gas-cooled reactor*, HTGR). Kerapatan daya yang lebih rendah, kinerja bahan bakar partikel berlapis yang andal, dan rancangan sistem yang seimbang memastikan pemeliharaan fungsi keselamatan. Fitur-fitur seperti koefisien suhu negatif yang besar, margin suhu yang besar, reaktivitas berlebih yang rendah akibat pengisian bahan bakar *online*, dan penggunaan batang kendali mendukung keamanan pengoperasian dan membatasi suhu kecelakaan. Panas peluruhan (*decay heat*) dilepaskan secara pasif dari inti reaktor pada setiap kondisi kecelakaan yang dirancang melalui mekanisme alami, seperti konduksi panas atau radiasi, untuk memastikan bahwa suhu bahan bakar maksimum tetap di bawah 1.620 °C. Penahanan ini mencegah

pelelahan inti reaktor dan pelepasan radioaktif dalam jumlah besar ke lingkungan dengan cara menahan hampir semua produk fisi untuk tetap berada pada lapisan silikon karbida (*silicon carbide*, SiC) dari partikel bahan bakar berlapis *TRi-structural ISOTropic* (TRISO). Selain itu, rancangan HTR-PM dapat memperlambat progres kecelakaan karena elemen bahan bakar memiliki kapasitas panas yang tinggi dan struktur internal grafit, bahkan dibutuhkan waktu berhari-hari bagi elemen bahan bakar untuk mencapai suhu maksimumnya ketika seluruh cairan pendingin hilang [13].

III. METODOLOGI

Penelitian ini dimulai dengan mengambil data parameter-parameter utama proses PLTU Paiton yang sudah ada. Objek penelitian adalah PLTU Paiton berkapasitas 400 MWe dengan sistem *reheating* milik PLN Nusantara Power yang telah beroperasi sejak tahun 1993. Penelitian ini menggunakan parameter-parameter utama rancangan dan proses pada berbagai kondisi operasi sebagai acuan. Varian-varian yang digunakan antara lain kondisi pemanasan, putaran turbin, kecepatan nominal turbin 3.000 rpm, beban awal, dan beban sampai dengan 400 MWe. Parameter utama yang dikumpulkan terdiri atas tekanan (dalam kg/cm²), suhu (dalam °C), aliran massa (dalam kg/s), dan entalpi (dalam kJ/kg). Data parameter diperoleh dari rancangan neraca kalor-massa yang dibuat oleh produsen utama peralatan PLTU Paiton serta dari data observasi keadaan tunak di berbagai kondisi operasi PLTU Paiton. Mengingat keterbatasan akses terhadap data rancangan dan parameter operasional PLTU Paiton yang hanya tersedia bagi pihak berwenang, penelitian ini hanya dilakukan melalui observasi langsung di lapangan.

Premis dari penelitian ini adalah bahwa sumber panas pengganti yang berasal dari reaktor nuklir harus dapat menyesuaikan parameter masukan dan keluaran yang dirancang untuk kebutuhan siklus air dan uap sistem yang sudah ada. Berdasarkan data pengamatan di PLTU Paiton, parameter masukan dari sistem air umpan yang saat ini digunakan berkisar antara suhu 30 hingga 250 °C, dengan tekanan 45 hingga 190 kg/cm². Untuk parameter keluaran uap utama, suhu berkisar antara 350 hingga 540 °C, dengan tekanan berkisar antara 42 hingga 169 kg/cm².

Penelitian ini menggunakan SMR yang beroperasi pada rentang parameter siklus air dan uap yang telah ditentukan. International Atomic Energy Agency (IAEA) menunjukkan bahwa salah satu SMR yang telah beroperasi pada rentang parameter tersebut adalah HTR-PM dari Universitas Tsinghua, Tiongkok [14]. Penelitian ini menggunakan SMR tersebut, yaitu HTGR dengan spesifikasi seperti yang dijelaskan dalam Advanced Reactors Information System (ARIS) IAEA [14]. Pada penelitian ini, beberapa konfigurasi dianalisis untuk menggantikan *boiler* yang digunakan saat ini dengan reaktor nuklir dan sistem primer sebagai sumber panas. Analisis dilakukan dengan mempertimbangkan pro dan kontra aspek teknik, aspek operasional, dan aspek pemodelan.

Konfigurasi pertama melibatkan sistem primer helium HTR-PM dengan sistem sekunder TES garam cair, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1. Sistem sekunder menggunakan satu unit penukar kalor helium dan garam cair, dengan memperhatikan standar keselamatan nuklir. Empat unit penukar kalor menghasilkan uap dari sistem tersier sesuai dengan konfigurasi panel *boiler* yang ada.

Sistem primer menggunakan gas helium pada sistem *header* dingin dan panas. Sistem ini menggunakan garam cair

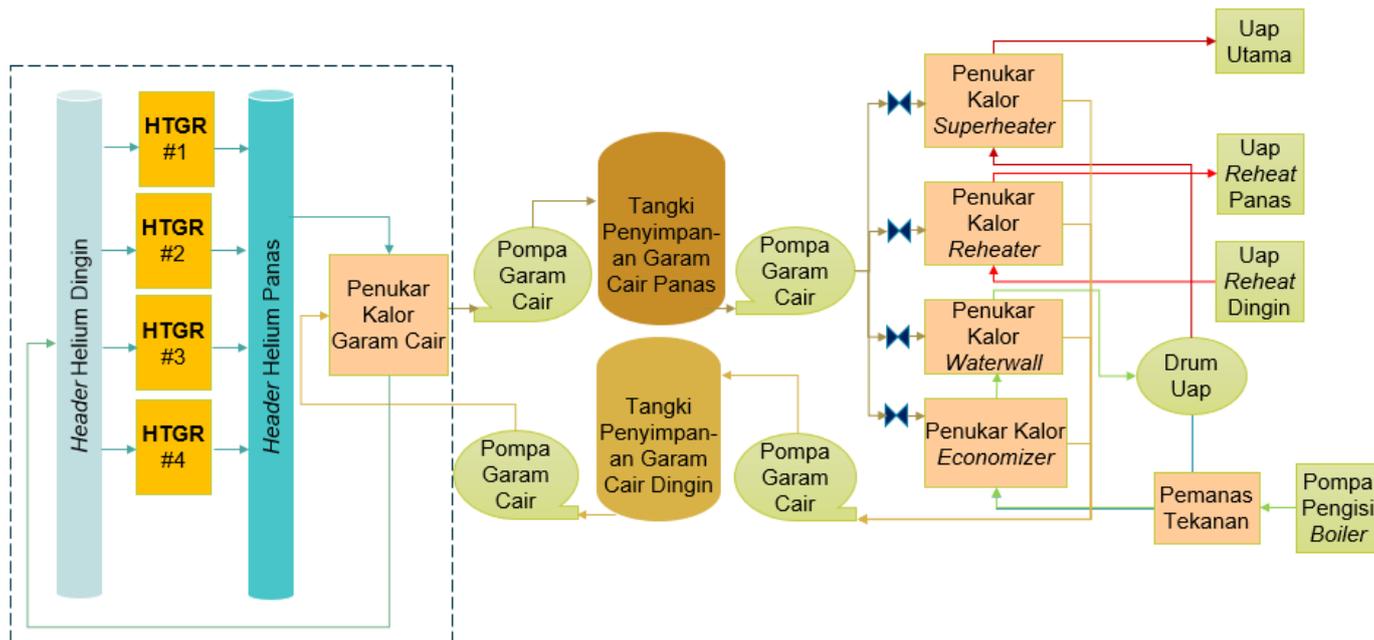
sebagai penukar kalor. Penggunaan garam cair sebagai cairan pemindah kalor (*heat transfer fluid*, HTF) dan media TES disebabkan oleh tingginya kapasitas kalor, rendahnya tekanan uap, serta tingginya rentang temperatur operasional, yang dapat mencapai hingga sekitar 500 °C [15]. Penelitian terkini telah menyoroti potensi berbagai komposisi garam cair, termasuk garam berbasis nitrat kuarterner yang memiliki kinerja perpindahan kalor dan stabilitas termal yang sangat baik [16]. Selain itu, campuran eutektik klorida telah diteliti karena kepadatan penyimpanan kalornya yang tinggi dan biaya yang digunakan lebih rendah, menjadikannya alternatif yang menjanjikan untuk pengaplikasian di suhu tinggi [17]. Secara keseluruhan, penggunaan garam cair sebagai media HTF dan TES merupakan pendekatan untuk meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan sistem energi yang menjanjikan. Sifat yang unik dan keserbagunaan garam cair menjadikannya sebagai komponen penting bagi masa depan teknologi energi surya dan nuklir.

Pada konfigurasi ini, garam cair berfungsi sebagai sistem sekunder dan dialirkan melalui empat unit penukar kalor, sehingga menggantikan panel *boiler* asli. Air bertekanan digunakan sebagai fluida kerja tersier pada penukar kalor *economizer* dan *waterwall*, sedangkan uap *superheat* digunakan oleh sistem tersier pada penukar kalor *superheater* dan *reheater*.

Pada aspek teknik, kelebihan konfigurasi ini adalah TES dapat diaplikasikan untuk kogenerasi dan kebutuhan lainnya [18]. Hal ini menjadikan sistem TES komponen penting untuk meningkatkan efisiensi energi pada berbagai aplikasi. TES telah diintegrasikan ke dalam pembangkit kogenerasi, termasuk PLTN, untuk meningkatkan fleksibilitas operasional dan memenuhi berbagai kebutuhan panas [19]. Teknologi ini mencakup penyimpanan kalor sensibel, kalor laten, dan termokimia, dengan sistem TES panas sensibel menjadi sistem yang paling hemat biaya dan paling banyak digunakan. Integrasi TES pada sistem kogenerasi secara signifikan meningkatkan efisiensi keseluruhan, dengan satu studi melaporkan efisiensi kogenerasi total yang dicapai adalah sebesar 75% [19]. Penelitian terbaru telah mengeksplorasi sistem kogenerasi yang inovatif untuk memproduksi hidrogen hijau dan membangkitkan energi. Sistem ini mengintegrasikan berbagai teknologi untuk meningkatkan efisiensi dan menekan dampak lingkungan. Integrasi sistem hidrogen hijau skala besar pada proses kogenerasi berbasis batu bara secara signifikan mengurangi emisi karbon. Akan tetapi, cara ini meningkatkan biaya operasi [20]. Dengan memanfaatkan energi panas dari TES, kogenerasi juga telah diterapkan pada produksi hidrogen hijau dengan *solid oxide electrolysis cell* (SOEC) yang menggunakan energi panas dari TES [21].

Dari segi pengoperasian, konfigurasi ini memiliki keuntungan karena pengoperasian sistem pendukung (*balance of plant*) menggunakan sistem tersier, sehingga terpisah dari risiko yang dimiliki sistem primer. Dari segi pemodelan, konfigurasi ini juga memiliki keunggulan berupa kesamaan antara model penukar kalor dari sistem tersier dan model panel *boiler* yang sudah ada. Akan tetapi, konfigurasi ini memiliki kelemahan, yaitu penambahan peralatan baru dapat menjadi sangat intensif. Akibatnya, dari segi pemodelan dan sistem kendali, operasi menjadi lebih intensif dan kompulsif.

Konfigurasi kedua masih menggunakan sistem primer gas helium yang dilengkapi dengan *header* panas dan dingin. Gas helium dialirkan langsung ke empat penukar kalor yang menggantikan fungsi panel *boiler* yang saat ini digunakan,



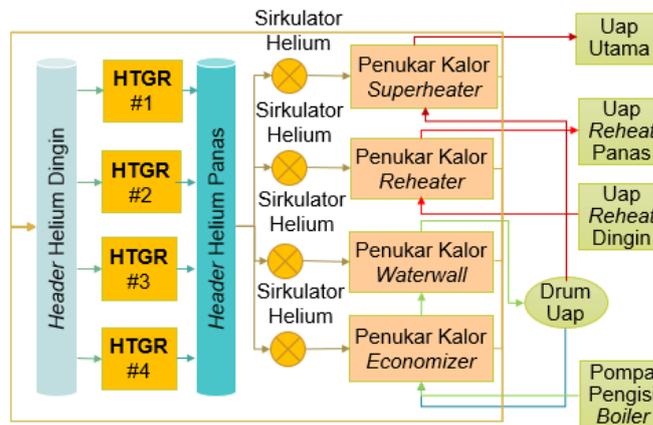
Gambar 1. Sistem primer helium dengan konfigurasi TES garam cair.

dengan cara mengendalikan kipas sirkulasi secara individual. Sistem sekunder pada penukar kalor *economizer* dan *waterwall* menggunakan air bertekanan sebagai fluida kerja. Sementara itu, penukar kalor *superheater* dan *reheater* menggunakan uap *superheat* sebagai fluida sekunder (Gambar 2).

Dari aspek teknik, konfigurasi ini memiliki kelebihan yaitu sumber panas tinggi helium dapat lebih fleksibel untuk memenuhi persyaratan model penukar kalor, tergantung panel *boiler*. Namun, sistem ini memerlukan generator uap yang sesuai dengan standar keselamatan nuklir serta menuntut rancangan dan instalasi teknik yang ketat untuk memastikan helium tertutup secara sempurna.

Pengendalian impermeabilitas helium dalam HTGR merupakan fokus penting dalam penelitian sebelumnya karena proses ini dapat memastikan keamanan dan efisiensi reaktor. Beberapa studi telah meneliti penggunaan keramik yang canggih dan aloi logam pada komponen-komponen utama. Hasilnya menunjukkan bahwa penggunaan bahan tersebut memberikan ketahanan terhadap difusi helium saat reaktor dalam kondisi operasi ekstrem. Pengujian yang dilakukan telah mengonfirmasi kemampuan bahan-bahan tersebut untuk mempertahankan integritas struktural dan meminimalkan kebocoran dalam jangka waktu yang lama. Upaya-upaya ini merupakan dasar yang kuat untuk meningkatkan keandalan dan keberlanjutan teknologi HTGR. Penelitian sebelumnya tentang HTGR berfokus pada peningkatan sistem kendali dan penyelesaian masalah yang terkait dengan pendingin helium. Sebuah metode untuk kendali daya bertingkat, yang sepenuhnya mengandalkan penyesuaian laju aliran helium, telah diperkenalkan dan menunjukkan hasil yang menjanjikan dalam hal stabilitas dan kinerja [22].

Dari perspektif operasional, konfigurasi ini menawarkan keuntungan berupa kemampuan untuk memungkinkan pengendalian dan penyesuaian proses pembangkitan uap dengan lancar. Proses ini bekerja dengan cara yang sangat mirip dengan sistem *boiler* yang digunakan saat ini, sehingga dapat menyederhanakan operasi. Selain itu, dari perspektif pemodelan, kelebihan model ini adalah dapat mempertahankan model dan mekanisme kendali panel *boiler*. Di sisi lain, sistem ini memiliki kelemahan, yaitu kebutuhan energi panas untuk



Gambar 2. Sistem primer helium dengan konfigurasi penukar kalor.

setiap penukar kalor menggunakan sirkulator helium cukup besar. Sirkulator helium digunakan untuk mengatur distribusi aliran massa dari *header*, memastikannya memenuhi persyaratan energi panas setiap panel penukar kalor. Biasanya, sirkulator helium terdiri atas peralatan yang dirancang sebagai kipas atau *blower*. Pengoperasiannya dilakukan dengan cara mengendalikan kecepatan rotasi, sehingga keluaran aliran massa dapat diatur untuk mencapai tingkat yang dibutuhkan. Penyesuaian ini memastikan bahwa sistem dapat secara efisien memenuhi berbagai kebutuhan operasional dengan tetap mempertahankan kinerja yang optimal.

Selain itu, proses pemodelan menjadi lebih rumit, terutama dalam mentransfer panas dari sumber helium ke setiap model panel *boiler* yang sudah ada. Memindahkan kalor dari sumber helium merupakan proses penting pada berbagai sistem termal, terutama yang melibatkan reaktor gas suhu tinggi atau penukar kalor canggih. Helium, yang dikenal karena sifat lembamnya dan konduktivitas termalnya yang tinggi, sering digunakan sebagai HTF karena kemampuannya untuk membawa energi termal secara efisien tanpa mengalami perubahan signifikan pada sifat fisiknya. Dalam sistem ini, kalor dipindahkan dari sumber helium, biasanya reaktor atau komponen pembangkit panas, ke panel penukar kalor atau unit penyerap kalor lainnya.

Pemindahan terjadi melalui serangkaian sistem yang dirancang dengan cermat, seperti sirkulator helium dan penukar kalor, yang mengatur aliran massa dan memastikan distribusi energi termal yang optimal. Dengan mengendalikan laju aliran dan tekanan, sistem memastikan bahwa panas dari helium ditransfer secara efektif ke fluida kerja, sehingga mempertahankan suhu dan tekanan yang diperlukan untuk proses pembangkitan energi berikutnya. Proses perpindahan kalor ini merupakan komponen penting untuk menjaga efisiensi dan keamanan keseluruhan sistem energi berkinerja tinggi karena memungkinkan pemanfaatan energi yang dihasilkan dari sumber helium secara efektif.

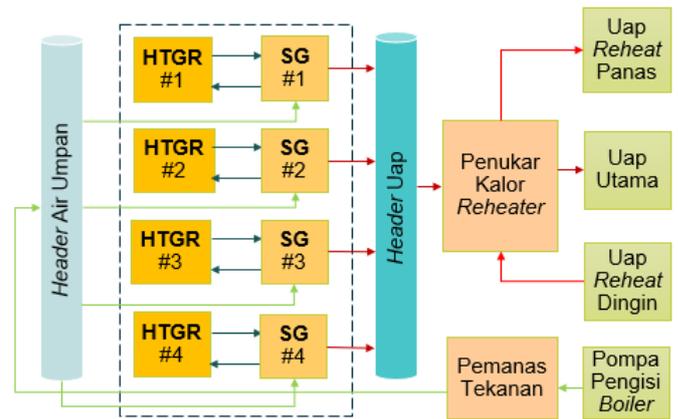
Berdasarkan dua konfigurasi sebelumnya, diusulkan opsi konfigurasi ketiga yang lebih efisien. Konfigurasi ini menggunakan paket reaktor HTR-PM lengkap beserta generator uapnya. Empat unit reaktor dengan generator uap menggunakan *header* air umpan dan *header* uap agar sesuai dengan parameter rancangan sistem yang ada. Konfigurasi ini menggunakan sistem tersier melalui penukar kalor, yang berfungsi sebagai sistem *reheat* untuk rancangan turbin yang ada (Gambar 3).

Kelebihan konfigurasi ini adalah rancangan reaktornya yang ringkas, yang menggunakan rancangan SMR HTGR umum dengan pembangkit uap masing-masing. Pembangkit uap dalam HTGR sering dirancang agar menyatu dengan sistem reaktor karena dapat mengurangi kompleksitas dan potensi kegagalan yang biasanya terjadi pada rancangan tradisional yang masih menggunakan sistem pembangkit uap terpisah. Misalnya, Holtec Inherently Safe Modular Underground Reactor (HI-SMUR) memiliki rancangan terintegrasi dengan pembangkit uap yang terhubung langsung ke bejana reaktor, sehingga tidak memerlukan banyak pipa dan dapat meningkatkan keselamatan karena berkurangnya risiko kebocoran [23].

Konfigurasi ini menggunakan *header* air umpan dan *header* uap. *Header* air umpan memastikan bahwa keluaran aliran massa dari sistem air umpan yang ada didistribusikan secara merata ke setiap generator uap, sesuai dengan batas rancangan. Sementara itu, *header* uap memastikan bahwa kebutuhan aliran massa dari sistem uap utama yang ada terpenuhi melalui akumulasi produksi uap dari setiap generator uap.

Pengoperasian ini lebih mudah dilakukan, khususnya kendali pembakaran, dibandingkan pada setiap panel *boiler* sebelumnya. Pada sistem *boiler* sebelumnya, fungsi panel pembakaran, seperti *economizer*, *evaporator*, dan *superheater*, secara efektif diambil alih oleh rancangan generator uap. Namun, rancangan generator uap ini tidak mencakup fitur untuk memanaskan ulang uap yang keluar dari turbin uap bertekanan tinggi yang ada. Untuk mengatasi kekurangan ini, konfigurasi tersebut memperkenalkan model penukar kalor tunggal yang secara khusus dirancang sebagai sistem *reheater*. Penambahan konfigurasi ini memastikan bahwa proses pemanasan ulang dilakukan dengan baik, sehingga dapat mengisi mekanisme pemanasan ulang yang tidak tersedia pada rancangan generator uap asli.

Namun, penukar kalor pada *reheater* memerlukan rancangan teknik yang tepat, yaitu menerapkan uap ke fluida uap. Studi tentang penukar kalor yang menggunakan perpindahan uap ke fluida uap difokuskan pada peningkatan kinerja termal dan keandalan operasional. Para peneliti telah menyelidiki berbagai konfigurasi, seperti rancangan cangkang, tabung, dan pelat, untuk menentukan efisiensinya dalam



Gambar 3. HTGR dilengkapi dengan konfigurasi generator uap.

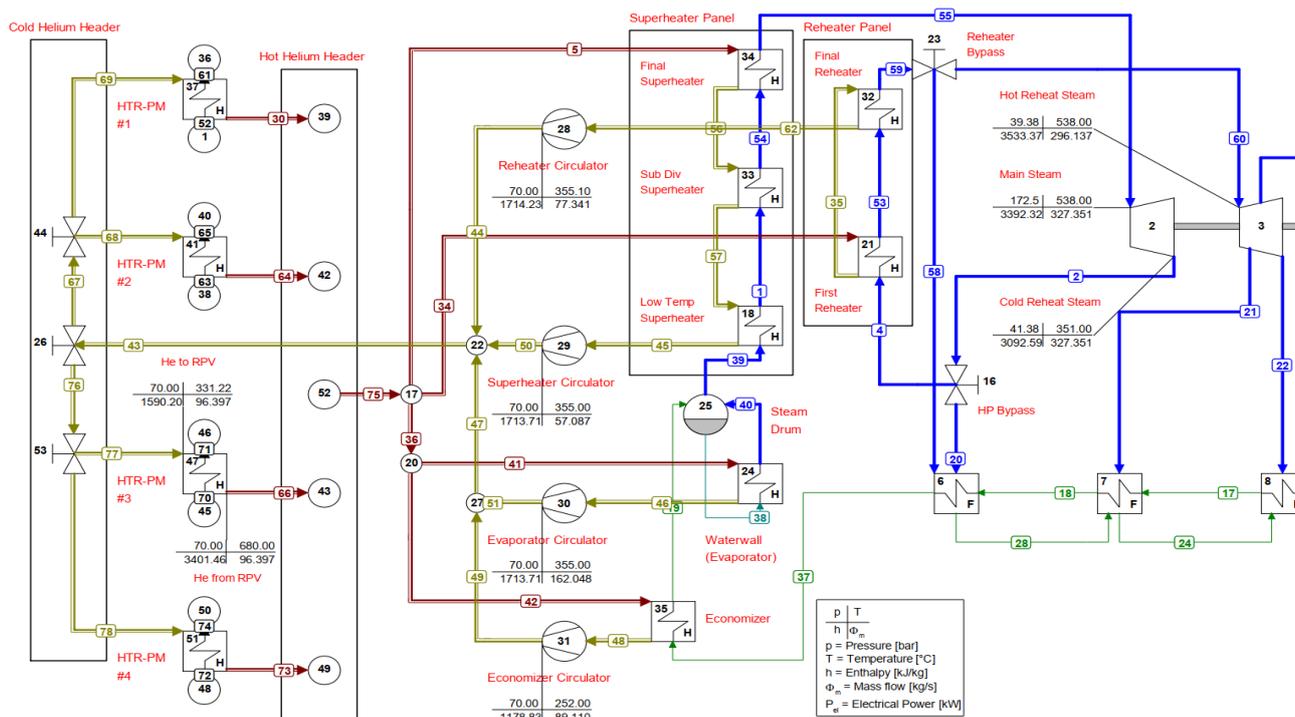
kondisi suhu dan tekanan tinggi [24]. Uji eksperimen menunjukkan bahwa pengoptimalan luas permukaan dan pemilihan material dapat meningkatkan laju perpindahan kalor dan meminimalkan kehilangan termal [25]. Teknik simulasi lanjut juga dilakukan untuk memodelkan dinamika fluida dan proses pertukaran kalor, sehingga dapat memvalidasi hasil eksperimen dan memandu perbaikan rancangan. Upaya ini merupakan kemajuan signifikan dalam pengembangan sistem penukar kalor uap ke uap yang kuat dan efisien untuk diaplikasikan pada industri [26].

Selain itu, konfigurasi ini memerlukan parameter penukar kalor *reheater* yang tepat, sehingga didapatkan sifat uap yang memenuhi persyaratan rancangan turbin yang sudah ada. Dari perspektif pemodelan, konfigurasi ini memerlukan modifikasi kompleks yang bersifat permisif guna mengoperasikan model pabrik sebelumnya, yaitu dengan mengganti model *boiler* dengan generator uap dan penukar kalor *reheater*.

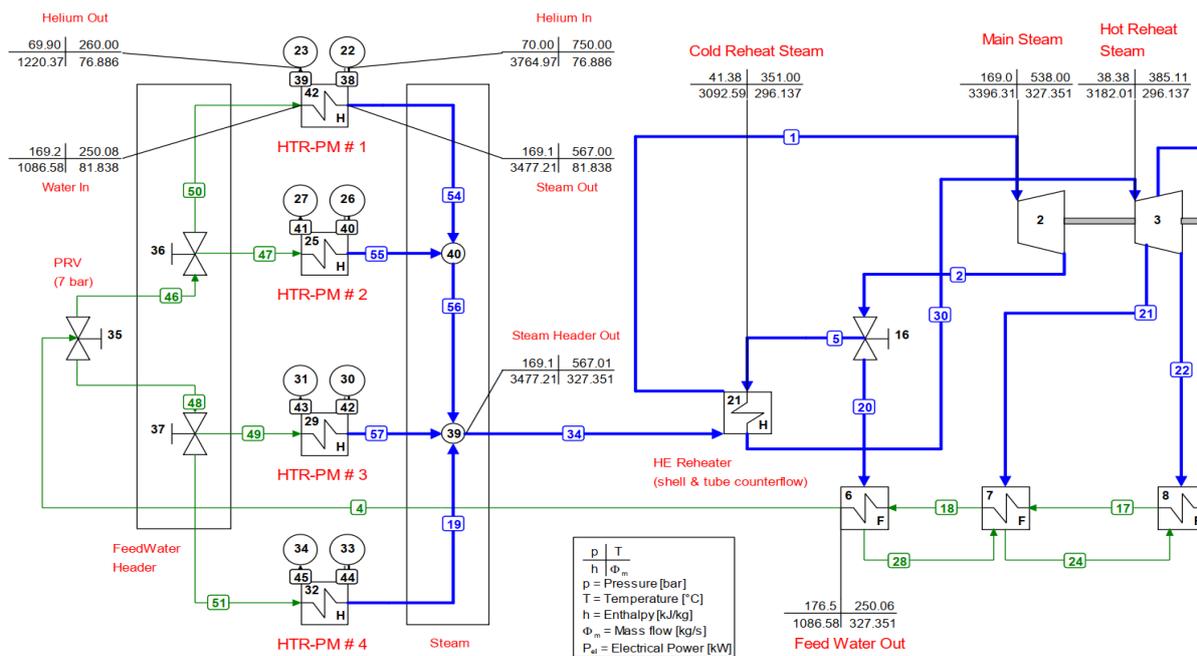
Untuk dua opsi konfigurasi terakhir, simulasi model keseimbangan panas-massa dilakukan menggunakan perangkat lunak Cycle-Tempo. Gambar 4 menunjukkan keseimbangan panas-massa sistem primer helium dengan konfigurasi penukar kalor pada keluaran generator 400 MWe.

Reaktor dimodelkan dengan penukar kalor, yang dirancang sedemikian rupa sehingga parameter helium masuk dan keluar mendekati rancangan HTR-PM. *Header* dingin dimodelkan dengan katup serial sebagai tempat pemisah aliran massa helium yang memasuki setiap reaktor. *Header* panas dimodelkan dengan penyerap kalor helium keluar setiap reaktor, serta sumber kalor keluar *header* (dengan aliran massa terakumulasi dari semua penyerap kalor). *Superheater* dimodelkan dengan tiga panel penukar kalor, yang sesuai dengan pengaturan dalam *boiler* yang sudah ada. Panel-panel ini terdiri atas *superheater* akhir, panel subdivisi, dan *superheater* suhu rendah. *Reheater* dimodelkan dengan dua panel penukar kalor, mengikuti pengaturan panel dalam *boiler* yang ada, yang mencakup *reheater* pertama dan *reheater* akhir. Selain itu, dua panel penukar kalor dimodelkan untuk menggantikan fungsi *economizer* dan *evaporator* dalam pengaturan *boiler* sebelumnya. Jadi, secara total, dengan model yang disebutkan sebelumnya, terdapat tujuh model penukar kalor yang digunakan untuk menggantikan empat fungsi pengaturan panel sebelumnya pada *boiler* yang ada, dengan menggunakan rancangan penukar kalor aliran berlawanan.

Gas helium yang keluar dari empat panel penukar kalor diarahkan melalui sirkulator helium. Perangkat ini berfungsi sebagai pengatur laju aliran massa yang memastikan bahwa



Gambar 4. Neraca panas-massa 400 MWe dari sistem primer helium dengan konfigurasi penukar panas.



Gambar 5. Neraca panas-massa HTGR 400 MWe yang dilengkapi dengan konfigurasi generator uap.

kebutuhan panas masing-masing panel penukar kalor terpenuhi dan dipertahankan secara efektif selama proses berlangsung.

Selanjutnya, penelitian ini melakukan neraca massa-panas HTGR yang dilengkapi dengan konfigurasi generator uap pada keluaran generator 400 MWe (Gambar 5). Konfigurasi ini menggunakan empat reaktor HTR-PM, yang masing-masing terintegrasi dengan generator uap. Model ini dilengkapi dengan katup pengurang tekanan (*pressure reduction valve*, PRV) untuk menurunkan tekanan air umpan hingga 7 bar. Katup pemisah digunakan di *header* air umpan untuk mendistribusikan aliran massa air umpan ke setiap generator uap. Uap yang dihasilkan oleh keempat generator uap disimpan di *header* uap, dengan suhu keluarannya lebih tinggi saat uap utama memasuki turbin. Penukar kalor model ini digunakan

untuk perpindahan panas uap dan berfungsi sebagai *reheater* uap panas dingin yang keluar dari turbin tekanan menengah. Parameter keluaran penukar kalor dirancang untuk memenuhi spesifikasi yang diperlukan dari uap utama dan uap *hot reheat* untuk turbin yang ada.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil simulasi model neraca panas-massa untuk setiap konfigurasi yang dilakukan sebelumnya kemudian dianalisis. Sistem primer helium dengan konfigurasi penukar kalor menunjukkan bahwa suhu helium ke reaktor adalah 32,4% lebih tinggi daripada rancangan HTR-PM, yaitu sekitar 331 °C, yang melampaui batas rancangan 250 °C untuk air masuk ke pembangkit uap HTR-PM. Meskipun demikian, tekanan dan

laju aliran massa helium yang masuk dan keluar reaktor tetap konsisten dengan nilai-nilai yang diuraikan dalam rancangan HTR-PM, yang mengonfirmasi keselarasan dengan spesifikasi asli.

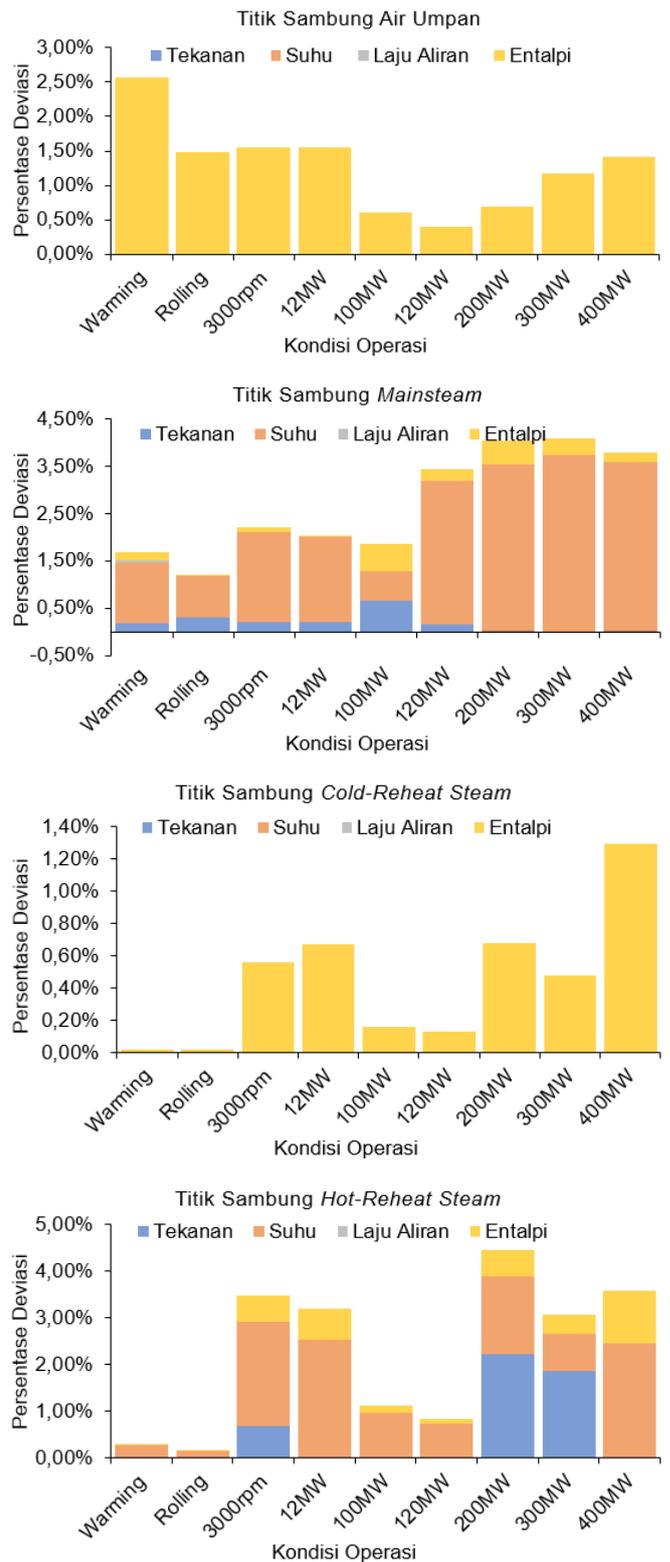
Header air umpan untuk HTGR dengan konfigurasi generator uap menunjukkan empat outlet distribusi aliran massa memiliki laju 81,8 kg/s, yang masih dalam batas rancangan HTR-PM sebesar 94,9 kg/s untuk aliran massa air masuk. Header uap juga menunjukkan bahwa semua nilai aliran massa masuk adalah 81,8 kg/s, yang masih dalam batas rancangan aliran massa uap keluar HTR-PM sebesar 94,9 kg/s. Simulasi model menunjukkan bahwa tekanan air umpan ke generator uap adalah 169,2 bar atau 127% dari nilai rancangan sebesar 132,5 bar. Pada saat yang sama, suhu helium keluar ke reaktor menunjukkan 260 °C atau 104% dari rancangan sebesar 250 °C.

Suhu uap yang keluar dari header cukup tinggi (567 °C) untuk memenuhi kebutuhan uap utama turbin uap bertekanan tinggi yang ada. Oleh karena itu, energi digunakan untuk memanaskan uap *cold-reheat* yang keluar dari turbin bertekanan tinggi melalui penukar kalor yang berfungsi sebagai panel *reheater*, serupa dengan fungsi yang dijalankan oleh *boiler* pada sistem sebelumnya. Keluaran dari penukar kalor *reheater* menunjukkan bahwa uap utama dan uap panas *reheater* yang dihasilkan sesuai dengan spesifikasi yang dibutuhkan oleh turbin uap yang ada, yaitu 538 °C dan 385 °C, pada beban 400 MWe.

Analisis neraca massa-panas menunjukkan bahwa kebutuhan energi turbin uap yang ada sepenuhnya sesuai dengan spesifikasi rancangan pada tahap sebelumnya. Hal ini menunjukkan kesesuaian parameter utama, seperti laju aliran massa, serta nilai suhu dan tekanan untuk uap utama dan uap pemanas ulang, yang seluruhnya selaras dengan kondisi operasional yang diharapkan sebagaimana diuraikan pada rancangan awal.

Berdasarkan simulasi model neraca massa-panas pada keluaran generator 400 MWe, konfigurasi akhir memberikan hasil yang lebih baik dan tetap berada dalam batas rancangan sistem HTR-PM. Disimpulkan bahwa konfigurasi ini lebih cocok untuk konversi dua PLTU batu bara 400 MWe untuk beroperasi dengan reaktor nuklir HTR-PM. Hasil simulasi menunjukkan bahwa konfigurasi ini akan kompatibel dengan skenario transisi, sehingga menawarkan pendekatan yang lebih layak untuk mengintegrasikan teknologi nuklir ke dalam infrastruktur PLTU batu bara yang ada. Konfigurasi tersebut kemudian divalidasi dengan menstimulasikan model neraca massa-panas pada berbagai kondisi operasi sesuai dengan operasi PLTU batu bara yang ada, termasuk pemanasan, putaran turbin, kecepatan nominal turbin, beban awal 12 MWe, beban 100 MWe, beban 120 MWe, beban 200 MWe, beban 300 MWe, hingga beban nominal 400 MWe.

Gambar 6 menyajikan diagram batang validasi yang menunjukkan persentase deviasi antara nilai simulasi dan referensi dari rancangan PLTU Paiton dan data operasional. Nilai referensi PLTU Paiton tersebut digunakan sebagai standar untuk menghitung persentase deviasi. Validasi dilakukan pada parameter tekanan, temperatur, aliran massa, dan entalpi. Validasi dilakukan pada sistem utama *tapping* konversi, yang meliputi air umpan, uap utama, uap *cold reheat*, dan uap *hot reheat*. Parameter hasil simulasi diperoleh menggunakan *point kinetics* dan perhitungan neraca massa-panas.



Gambar 6. Deviasi parameter yang disimulasikan.

Hasil simulasi model pada sembilan kondisi operasi yang berbeda menunjukkan deviasi suhu uap utama sekitar 3% dari nilai rancangan, dimulai pada 120 MWe ke atas. Akumulasi deviasi terbesar dari parameter simulasi diamati pada titik *tapping* uap *hot reheat* dengan beban 200 MW. Namun, nilai deviasi yang terakumulasi tersebut masih di bawah 4,5%, dengan deviasi paling substansial dari nilai tekanan simulasi. Penyetelan dianggap tepat untuk formulasi model yang diperoleh dari persamaan regresi yang dihitung

Meskipun demikian, semua parameter lain dari hasil simulasi konversi menghasilkan deviasi yang sangat kecil, yaitu hingga sebesar 3%. Deviasi ini masih berada dalam batas yang dapat diterima oleh parameter operasi air umpan dan uap yang umumnya ditetapkan di PLTU Paiton. Parameter tersebut meliputi aliran massa dan entalpi di semua titik *tapping* pada semua sembilan variasi kondisi operasional serta tekanan di titik *tapping* uap utama. Deviasi tersebut sejalan dengan kondisi operasional aktual PLTU yang ada. Hasil simulasi yang paling mendekati kondisi aktual operasi dan rancangan PLTU adalah kondisi operasi di bawah 120 MWe, khususnya selama kondisi awal *start-up*, termasuk pemanasan, putaran turbin, dan beban awal.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa studi simulasi konversi PLTU menjadi konfigurasi reaktor nuklir telah berhasil memenuhi hasil yang diharapkan, yaitu reaktor nuklir dapat menerima masukan parameter air umpan dan uap panas dingin yang ada. Selain itu, hasil lain yang diharapkan adalah pembangkit uap dapat menghasilkan uap utama dan uap panas sesuai dengan kebutuhan turbin uap yang sudah ada.

Penelitian ini memperoleh hasil perbandingan antara PLTU yang ada dengan PLTU konversi C2N. Bahan bakar PLTU yang ada sebelumnya menggunakan batu bara subbitumen, dengan kandungan karbon 35%–45%, yang tergolong batu bara *low range coal* (LRC) sampai *medium range coal* (MRC).

Untuk PLTU hasil konversi C2N, bahan bakar diganti sesuai dengan yang digunakan oleh reaktor HTR-PM, yaitu *low enriched uranium-235* (LEU-235) sebesar 8,5%, yang berupa elemen bulat dengan lapisan TRISO. Sebelumnya, sumber panas PLTU batu bara menggunakan *boiler* batu bara bubuk dengan tipe drum tunggal, *balance draft*, dan *radiant reheat* sirkulasi kendali. Sumber panas simulasi PLTU konversi C2N kemudian diganti dengan empat unit HTGR modular bola kerikil, yang masing-masing dilengkapi dengan generator uap. Selain itu, satu unit penukar kalor digunakan untuk memanaskan ulang sistem yang dibutuhkan oleh turbin uap yang sudah ada.

Sementara itu, PLTU membutuhkan sistem pendukung pembakaran *boiler*. Sistem tersebut meliputi sistem gas buang dan udara, dengan alat utama yang terdiri atas *primary air fan* (PAF), *forced draft fan* (FDF), *induced draft fan* (IDF), *primary air heater* (PAH), *secondary air heater* (SAH), dan *electro-static precipitator* (ESP) sebagai alat utama untuk menangkap partikulat sebagai hasil pembakaran. Sistem penanganan batu bara dan abu juga diperlukan, mencakup peralatan utama konveyor untuk batu bara, bongkar muat kapal, dan area untuk tempat penyimpanan atau timbunan batu bara. Namun, untuk PLTU yang dikonversi menjadi C2N, sistem dan fasilitas tersebut tidak lagi diperlukan, sehingga peralatan yang dibutuhkan jauh lebih sedikit. Mengingat reaktor HTR-PM menggunakan gas helium sebagai sistem utamanya, hanya diperlukan sistem pemurnian helium tambahan serta *reactor cavity cooling system* (RCCS) sebagai pendingin tambahan penahanan inti reaktor.

Namun, berdasarkan perbandingan yang telah dilakukan, penelitian ini menunjukkan temuan kunci bahwa konversi C2N dapat dilakukan menggunakan sistem air dan uap yang sudah digunakan PLTU. Sistem air yang ada, yang tidak mengalami perubahan dan dapat digunakan, mencakup sistem kondensat dan air umpan dengan peralatan utama berupa kondensor, *condensate extraction pump* (CEP), *low-pressure heater* (LPH), *deaerator*, *boiler feedwater pump* (BFP), dan pemanas tekanan tinggi (*high-pressure heater*, HPH). Sementara itu,

sistem uap yang tidak mengalami perubahan terdiri atas komponen utama turbin uap tandem *compound*, sistem *reheat*, serta generator utama yang ada dengan jenis generator sinkron tiga fase tipe berkapasitas 473 MW/18 kV.

Penelitian ini memberikan kontribusi terhadap penelitian sebelumnya yang telah mengeksplorasi berbagai konfigurasi guna mengadaptasi sistem turbin uap yang ada ke kondisi SMR. Salah satu studi mengenai *repowering* PLTU batu bara berkapasitas 460 MW dengan teknologi SMR berjenis reaktor air bertekanan menunjukkan bahwa penggantian bagian tekanan menengah yang ada dengan tahap turbin tekanan tinggi yang baru merupakan opsi yang paling menguntungkan secara ekonomi [8]. Pertimbangan utama untuk turbin uap SMR meliputi ekspansi uap basah, pengurangan erosi air, dan standarisasi untuk mengurangi waktu dan biaya konstruksi [27].

Studi ini membahas gap penelitian yang diidentifikasi dalam penelitian tersebut di atas. Studi ini menghasilkan model simulasi untuk proses konversi sistem pembakaran batu bara ke pengaturan reaktor nuklir modular dengan tetap mempertahankan infrastruktur turbin uap dan generator yang sudah digunakan. Sistem air umpan dan turbin uap yang ada masih dapat digunakan seperti sebelumnya, tanpa membutuhkan peningkatan atau penyempurnaan peralatan secara signifikan. Meskipun makalah ini tidak membahasnya secara mendalam, faktor-faktor penting lainnya seperti penerimaan publik, pengelolaan bahan bakar bekas, keamanan infrastruktur, dan transfer teknologi juga harus dipertimbangkan [28]. Perlu ditekankan bahwa perombakan sistem yang ada dengan SMR dimaksudkan untuk melengkapi, bukan menggantikan, rencana awal PLTN, baik dari segi pengembangan maupun perannya pada sistem energi. Pertimbangan utama lainnya adalah perlindungan lingkungan. Penilaian dampak lingkungan yang komprehensif untuk pembangkit nuklir SMR harus dilakukan guna mengevaluasi dampak secara menyeluruh. Penilaian ini harus secara aktif melibatkan partisipasi publik dan mencakup dampak lintas batas. Meskipun studi-studi ini akan ditentukan secara individual [29], saat ini studi-studi ini berada di luar cakupan makalah ini.

V. KESIMPULAN

Studi ini menyimpulkan bahwa transformasi C2N merupakan pendekatan yang menjanjikan untuk transisi energi karena memanfaatkan infrastruktur PLTU batu bara yang sudah ada. Dengan mengganti *boiler* berbahan bakar batu bara menjadi reaktor nuklir, studi simulasi menunjukkan bahwa parameter operasional sangat sesuai dengan kondisi sebelumnya. Hasil ini menunjukkan bahwa simulasi konversi C2N dalam studi ini dapat mempertahankan sistem yang ada, terutama sistem air umpan, turbin uap, dan generator.

Pendekatan yang dikembangkan dalam studi ini berfokus pada revitalisasi aset PLTU batu bara dengan mengubahnya menjadi fasilitas berbasis nuklir, sehingga memberikan alternatif yang lebih berkelanjutan daripada membangun pembangkit listrik tenaga nuklir yang baru. Dengan memanfaatkan infrastruktur yang ada, pendekatan ini mempercepat transisi ke energi nuklir tanpa memerlukan sumber daya yang besar dalam pengembangan pembangkit baru.

Penelitian ini menekankan nilai model simulasi tersebut dalam mendorong penerapan teknologi energi bersih, yang dengan demikian mendukung tujuan jangka panjang Indonesia

untuk mencapai masa depan energi berkelanjutan rendah karbon. Kontribusi ini khususnya relevan dengan upaya berkelanjutan Indonesia untuk bergerak menuju masa depan yang lebih berkelanjutan dan rendah karbon dengan mengurangi ketergantungannya pada bahan bakar fosil serta meningkatkan peran energi nuklir dalam bauran energinya.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan terkait publikasi makalah ini. Tidak ada hubungan keuangan atau pribadi yang dapat memengaruhi penelitian, analisis, atau hasil yang dilaporkan dalam studi ini. Penelitian ini dilakukan secara independen dari afiliasi atau entitas komersial mana pun yang dapat memperoleh manfaat dari temuan tersebut.

KONTRIBUSI PENULIS

Konseptualisasi, Irfan Eko Budiyanto dan Sinta Uri El Hakim; metodologi, Irfan Eko Budiyanto; perangkat lunak, Irfan Eko Budiyanto; validasi, Irfan Eko Budiyanto dan Sinta Uri El Hakim; analisis formal, Irfan Eko Budiyanto; investigasi, Irfan Eko Budiyanto; sumber daya, Irfan Eko Budiyanto; kurasi data, Irfan Eko Budiyanto; penulisan—penyusunan draf asli, Irfan Eko Budiyanto; penyusunan—peninjauan dan penyuntingan, Irfan Eko Budiyanto dan Sinta Uri El Hakim; visualisasi, Irfan Eko Budiyanto; administrasi proyek, Irfan Eko Budiyanto.

REFERENSI

[1] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, "Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik PT Perusahaan Listrik Negara (Persero) Tahun 2021 sampai dengan Tahun 2030," PT Perusahaan Listrik Negara (Persero), 2021.

[2] S. Xu dkk., "Repowering coal power in China by nuclear energy—Implementation strategy and potential," *Energies*, vol. 15, no. 3, hal. 1–27, Feb. 2022, doi: 10.3390/en15031072.

[3] W. Kosman dan A. Rusin, "The application of molten salt energy storage to advance the transition from coal to green energy power systems," *Energies*, vol. 13, no. 9, hal. 1–18, Mei 2020, doi: 10.3390/en13092222.

[4] V. Kindra dkk., "Thermodynamic analysis and comparison of power cycles for small modular reactors," *Energies*, vol. 17, no. 7, hal. 1–22, Apr. 2024, doi: 10.3390/en17071650.

[5] M. Dudek, M. Jaszczur, dan Z. Kolenda, "Thermodynamic analysis of modular high-temperature nuclear reactor coupled with the steam cycle for power generation," *Arch. Thermodyn.*, vol. 40, no. 4, hal. 49–66, Des. 2019, doi: 10.24425/ather.2019.130007.

[6] Ł. Bartela dkk., "Repowering a coal power unit with small modular reactors and thermal energy storage," *Energies*, vol. 15, no. 16, pp. 1–28, Aug. 2022, doi: 10.3390/en15165830.

[7] H. Łukowicz, Ł. Bartela, P. Gładysz, and S. Qvist, "Repowering a coal power plant steam cycle using modular light-water reactor technology," *Energies*, vol. 16, no. 7, pp. 1–25, Apr. 2023, doi: 10.3390/en16073083.

[8] Ł. Bartela dkk., "Techno-economic assessment of coal-fired power unit decarbonization retrofit with KP-FHR small modular reactors," *Energies*, vol. 14, no. 9, hal. 1–25, Mei 2021, doi: 10.3390/en14092557.

[9] K. Prantikos, S. Chatzidakis, L.H. Tsoukalas, dan A. Heifetz, "Physics-informed neural network with transfer learning (TL-PINN) based on domain similarity measure for prediction of nuclear reactor transients," *Sci. Rep.*, vol. 13, hal. 1–13, Okt. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-43325-1.

[10] X. Chen dan A. Ray, "On singular perturbation of neutron point kinetics in the dynamic model of a pwr nuclear power plant," *Sci.*, vol. 2, no. 2, hal. 1–10, Jun. 2020, doi: 10.3390/sci2020030.

[11] J. Li, "Computational perturbation methods for moderator and Doppler temperature coefficients in the european pressurized reactor core analysis," dalam *2020 Int. Conf. Comput. Electron. Commun. Eng. (ICCECE)*, 2020, hal. 201–204, doi: 10.1109/iccece49321.2020.9231053.

[12] Z. Zhang dkk., "Current status and technical description of Chinese 2 × 250 MWth HTR-PM demonstration plant," *Nucl. Eng. Des.*, vol. 239, no. 7, hal. 1212–1219, Jul. 2009, doi: 10.1016/j.nucengdes.2009.02.023.

[13] Z. Chen, Y. Wang, dan Y. Zheng, "Discussion on the accident behavior and accident management of the HTGR," *Nucl. Eng. Des.*, vol. 360, hal. 1–11, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.nucengdes.2019.110497.

[14] International Atomic Energy Agency, "Advances in small modular reactor technology development. A supplement to: IAEA advance reactor information system (ARIS) 2022 edition." Tanggal akses: 18-Sep-2024. [Online]. Tersedia: https://aris.iaea.org/publications/SMR_booklet_2022.pdf

[15] P. Bhatnagar, S. Siddiqui, I. Sreedhar, dan R. Parameshwaran, "Molten salts: Potential candidates for thermal energy storage applications," *Int. J. Energy Res.*, vol. 46, no. 13, hal. 17755–17785, Jul. 2022, doi: 10.1002/er.8441.

[16] W.N.A.W. Muhammad, M.N.A. Mohamad, dan M.F. Tukimon, "Characterization and heat transfer performance of quaternary nitrate based molten salts," *J. Adv. Res. Fluid Mech. Therm. Sci.*, vol. 97, no. 1, hal. 35–46, Sep. 2022, doi: 10.37934/arfmts.97.1.3546.

[17] P. Pei dkk., "Two new chloride eutectic mixtures and their thermo-physical properties for high temperature thermal energy storage," dalam *Int. Conf. Appl. Energy 2019*, 2019, hal. 1–5, doi: 10.46855/energy-proceedings-4058.

[18] J.M. Sala, "Thermal energy storage systems for cogeneration and trigeneration systems," dalam *Woodhead Publishing Series in Energy, Advances in Thermal Energy Storage Systems (Second Edition)*, Cambridge, Inggris: Woodhead Publishing, 2020.

[19] S.H. Ghazaei dkk., "On the use of advanced nuclear cogeneration plant integrated into latent heat storage for district heating," *Sustain. Energy Technol. Assess.*, vol. 50, hal. 1–14, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.seta.2021.101838.

[20] S. Liu, X. Gu, S. Yang, dan Y. Qian, "Can green hydrogen and waste heat utilization improve energy conservation and emission reduction of coal-based cogeneration processes?," *J. Clean. Prod.*, vol. 389, hal. 1–12, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.136045.

[21] G. Min, S. Choi, dan J. Hong, "A review of solid oxide steam-electrolysis cell systems: Thermodynamics and thermal integration," *Appl. Energy*, vol. 328, hal. 1–26, Des. 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2022.120145.

[22] Z. Dong, Z. Zhang, Y. Dong, dan X. Huang, "Cascaded HTGR power-level control only by regulating primary helium flow rate," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 67, no. 8, hal. 1780–1790, Agu. 2020, doi: 10.1109/tns.2020.2995704.

[23] K. Singh, I. Rampall, dan J. Rajkumar, "On the thermal-hydraulic essentials of the Holtec inherently safe modular underground reactor (HI-SMUR) system," dalam *Proc. ASME 2011 Small Modul. React. Symp.*, 2011, hal. 95–106, doi: 10.1115/SMR2011-6633.

[24] S. Mahmoudinezhad, M. Sadi, H. Ghiasirad, dan A. Arabkoohsar, "A comprehensive review on the current technologies and recent developments in high-temperature heat exchangers," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 183, hal. 1–16, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.rser.2023.113467.

[25] A. Barakat dan B. Sun, "Enhanced convective heat transfer in new triply periodic minimal surface structures: Numerical and experimental investigation," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 227, hal. 1–12, Agu. 2024, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125538.

[26] S. Muthukrishnan dkk., "Support vector machine for modelling and simulation of heat exchangers," *Therm. Sci.*, vol. 24, no. 1, hal. 499–503, 2020, doi: 10.2298/tsci190419398m.

[27] S. Ray, "Steam turbine development for small modular reactors," dalam *Proc. ASME Turbo Expo 2023, Turbomach. Tech. Conf. Expo.*, 2023, hal. 1–6, doi: 10.1115/gt2023-103401.

[28] S. Hong, C.J.A. Bradshaw, dan B.W. Brook, "Global zero-carbon energy pathways using viable mixes of nuclear and renewables," *Appl. Energy*, vol. 143, hal. 451–459, Apr. 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.01.006.

[29] Nuclear Energy Agency, "Small modular reactors: Challenges and opportunities, nuclear technology development and economics." Tanggal akses: 18-Sep-2024. [Online]. Tersedia: https://www.oecd-ne.org/upload/docs/application/pdf/2021-03/7560_smr_report.pdf