

## DESAIN KONSEPTUAL SISTEM REAKTOR DAYA MAJU KOGENERASI BERBASIS RGTT

Mohammad Dhandhang Purwadi

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir – BATAN  
Kawasan PUSPIPTEK Gd. 80, Serpong, Tangerang Selatan, 15310

### ABSTRAK

**DESAIN KONSEPTUAL SISTEM REAKTOR DAYA MAJU KOGENERASI BERBASIS RGTT.** Pemerintah telah menetapkan kebijakan pemanfaatan energi nuklir secara nasional di masa mendatang. Kebutuhan energi nuklir di luar Pulau Jawa akan mengarah kepada sistem pemasok energi nuklir serba guna dengan sistem kogenerasi yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Di antara reaktor Generasi IV, reaktor berpendingin gas temperatur tinggi (RGTT) adalah reaktor yang kinerja dan ketersediaan teknologinya memungkinkan untuk diimplementasikan di Indonesia dalam waktu sepuluh tahun ke depan. Dalam makalah ini diuraikan analisis desain sistem RGTT kogenerasi untuk produksi hidrogen, pembangkitan listrik dan desalinasi dalam rangka mengantisipasi kebutuhan sistem energi nuklir di Indonesia. Analisis dilakukan dengan pemodelan proses termodinamika sistem, melalui pendekatan metode volume kendali. Semua komponen sistem, meliputi reaktor, *intermediate heat exchanger*, turbin, kompresor, rekuperator, unit produksi hidrogen dan unit desalinasi dimodelkan secara termodinamika sebagai suatu volume kendali dengan model yang mendekati riil melalui suatu pendekatan secara realistis. Untuk keperluan desain konseptual, pemodelan aliran pendingin dalam sistem perpipaan dapat diabaikan. Dari hasil analisis diperoleh desain konseptual sistem reaktor daya kogenerasi berbasis RGTT yang diberi nama RGTT200K dengan distribusi peruntukan daya adalah, daya listrik 57,6 MW, daya termal untuk produksi hidrogen dan desalinasi 59,5 MW dan 81,9 MW. RGTT200K dari hasil desain konseptual ini mempunyai efisiensi termal 29% dan faktor utilisasi energi 63,05%.

Kata Kunci: Sistem Energi Nuklir (SEN), Reaktor Berpendingin Gas, Reaktor Gas Temperatur Tinggi (RGTT), High Temperature Gas-cooled Reactor (HTGR), Sistem Kogenerasi, Produksi Hidrogen, Desalinasi

### ABSTRACT

**CONCEPTUAL DESIGN OF ADVANCED COGENERATION NUCLEAR ENERGY SYSTEM BASED ON THE HTGR.** The government of Indonesia has decided to take benefit from the utilization of nuclear energy in near future. The nuclear energy demand outside of Java Island tends to the multipurpose nuclear energy supply with cogeneration system that would perform more efficient and environmental friendly. Among the generation-IV conceptual designs, the very high temperature reactor (VHTR) is known as a reactor with good performance for cogeneration and well-supported by ready-technology. Therefore it is potential to be deployed in Indonesia within the next decade. This paper describes a design analysis of the cogeneration VHTR for hydrogen production, electricity generation and desalination as the anticipation for the nuclear energy system demand in Indonesia. Analysis was carried out by modeling the thermodynamics processes of the system using the control volume method approximation. All components of the system, consist of reactor, intermediate heat exchanger, turbine, compressor, recuperator, hydrogen production unit, and desalination unit were modeled with the quite real model through the realistic approach. For the conceptual design stage, the fluid flow modeling in the pipe system not necessary to be modeled, so that ignored in the analysis. The analysis resulted a conceptual design of the VHTR based cogeneration reactor, named as RGTT200K, with cogeneration power distribution is 57.6 MWe for electricity, 59.5 MWt and 81.9 MWt subsequently for hydrogen production and desalination. The conceptually designed RGTT200K has thermal efficiency of 29% and energy utilization factor of 63.05%.

Keywords: Nuclear Energy System (NES), Gas Cooled Reactor, Very High Temperature Reactor (VHTR), Temperature Gas-cooled Reactor (HTGR), Cogeneration System, Desalination

### PENDAHULUAN

Sesuai dengan isi Perpres RI No.5 Tahun 2006<sup>[1]</sup>, Pemerintah telah menetapkan sasaran bauran energi primer optimal 2025 yang memberi kesempatan kepada sumber energi baru dan terbarukan (biomassa, nuklir, tenaga air, tenaga

surya, tenaga angin) untuk berkontribusi lebih dari 5%. Selain itu UU RI No.17/2007<sup>[2]</sup> dan 30/2007<sup>[3]</sup> juga memuat tentang opsi pemanfaatan energi nuklir di Indonesia. Kebijakan pemerintah tersebut memberi peluang dan tantangan terhadap penerapan dan pengembangan reaktor nuklir di

Indonesia. Penerapan energi nuklir dalam waktu dekat akan diimplementasikan dalam bentuk penggunaan PLTN LWR untuk ikut berkontribusi dalam memasok listrik pada jaringan JAMALI. Dalam bidang litbang, perlu adanya litbang reaktor nuklir nasional untuk mengurangi ketergantungan terhadap luar negeri dalam memenuhi kebutuhan reaktor nuklir di dalam negeri.

Kebutuhan energi nuklir dalam satu dekade ke depan paska pembangunan PLTN pertama akan mengarah kepada sistem pemasok energi nuklir serba guna dengan siklus kogenerasi yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Dengan demikian era PLTN akan bergeser ke zaman Sistem Energi Nuklir (SEN)<sup>[4]</sup>, suatu sistem pemasok energi nuklir yang aman, ekonomis, ramah lingkungan, dan berkelanjutan, serta dapat memasok energi untuk berbagai kebutuhan, baik untuk pembangkitan listrik maupun energi panas proses industri (meliputi produksi hidrogen, pencairan dan gasifikasi batubara, EOR dan desalinasi). Dengan beroperasinya SEN atau reaktor nuklir generasi ke-4, diharapkan berbagai kebutuhan energi untuk industri yang sebelumnya dipasok oleh energi fosil, oleh karena dampak lingkungan dan atau kelangkaan sumber energi fosil, dapat digantikan dengan energi nuklir.

Kebutuhan pemasok energi nuklir dengan sistem kogenerasi telah diproyeksikan/ diramalkan oleh Agenda Riset Nasional (ARN) DRN 2006-2009, dan ARN mengamanatkan untuk mulai mengkaji konsep reaktor nuklir kogenerasi tersebut. Teknologi reaktor nuklir generasi ke-4 menyediakan enam tipe reaktor nuklir yang dapat digunakan dalam suatu sistem pemasok energi nuklir dengan sistem siklus kogenerasi. *Very High Temperature Reactor* (VHTR) adalah salah satu kandidat dari enam tipe reaktor yang ketersediaan teknologinya memungkinkan untuk segera diimplementasikan dalam satu dekade ke depan. VHTR adalah pengembangan lanjut dari *High Temperatur Gas-cooled Reactor* (HTGR) yang pernah beroperasi dengan sukses di era tahun 70-an. Sesuai dengan pengalaman operasi HTGR, VHTR akan dapat memakai bahan bakar uranium atau thorium, atau bahkan dapat membakar plutonium dan minor aktinida yang radioaktivitasnya berumur sangat panjang. VHTR akan mewarisi karakter keselamatan HTGR yang sangat tinggi. Desain HTGR meniadakan kemungkinan terjadinya kecelakaan parah seperti yang telah terjadi dalam reaktor Three Mile Island dan Chernobyl. BATAN memilih untuk mengembangkan SEN kogenerasi (VHTR) berbasis pada HTGR (Reaktor Gas Temperatur Tinggi, RGTT) ini.

Setelah kebutuhan energi primer di JAMALI terpenuhi, pemerataan pertumbuhan ekonomi akan berakibat pada peningkatan kebutuhan energi di

luar JAMALI. Kebutuhan listrik di luar JAMALI akan dapat dipenuhi dengan SEN ukuran kecil dengan daya kurang dari 300 MW<sup>[5]</sup>. Untuk mengantisipasi kebutuhan energi nuklir ini, BATAN melakukan penelitian dan pengembangan desain SEN kogenerasi berbasis RGTT dengan daya termal 200 MWt. Tahap awal dari proses litbang desain SEN kogenerasi adalah penelitian dan pengembangan desain konseptual.

Makalah ini membahas tentang analisis perancangan untuk mendapatkan desain konseptual SEN kogenerasi berbasis RGTT dengan daya 200 MWt. Analisis perancangan sistem siklus SEN kogenerasi dilakukan dengan pemodelan proses termodinamika siklus sistem. Semua komponen utama sistem SEN kogenerasi, meliputi reaktor, *intermediate heat exchanger*, turbin gas, kompresor, rekuperator, unit produksi hidrogen dan unit desalinasi dimodelkan secara termodinamika dengan model yang sedekat mungkin dengan kondisi riil, dengan cara menghindari proses ideal seperti proses *reversible* dan isentropis. Dalam pemodelan digunakan pendekatan dengan metode volume kendali (*control volume method*). Setiap komponen sistem dimodelkan sebagai satu volume kendali tetap (*fixed control volume*) dan di dalamnya diberlakukan persamaan kekekalan massa dan energi<sup>[6]</sup>. Untuk keperluan desain konseptual, pemodelan aliran pendingin dalam sistem perpipaan dapat diabaikan. Dengan demikian pemodelan untuk mendapatkan desain konseptual SEN tidak diperumit dengan panjang dan jalur sistem perpipaan, yang merupakan domain/ranah dari tahapan perancangan *basic desain*. Validasi terhadap model siklus kogenerasi yang telah dikembangkan dilakukan dengan memanfaatkan data desain konseptual reaktor GTHTR300 yang dikembangkan oleh *Japan Atomic Energy Agency*<sup>[7]</sup>. Hasil validasi menunjukkan bahwa model siklus kogenerasi yang dikembangkan cukup memadai untuk digunakan dalam analisis perancangan SEN kogenerasi berbasis RGTT.

## DASAR TEORI DAN PEMODELAN

Tahapan pengembangan suatu instalasi sistem energi nuklir dari awal hingga operasi komersial adalah desain konseptual (*conceptual design*), desain dasar (*basic design*), desain detail (*detail design*), demonstrasi instalasi (*plant demonstration*) atau prototipe, dan operasi komersial (*comercial operation*)<sup>[8]</sup>. Desain konseptual adalah tahapan awal dari tahap pengembangan yang merupakan usaha untuk menjawab dan menyelesaikan persoalan yang ada beserta persyaratannya. Pekerjaan utama dalam tahapan perancangan desain konseptual adalah penyusunan diagram alir (*flowsheet*) sistem serta analisis neraca massa dan neraca energi<sup>[8]</sup>. Dalam

analisis neraca massa dan neraca energi diperlukan suatu optimasi agar diperoleh pemanfaatan energi yang paling efisien.

Persoalan utama yang ada dalam litbang teknologi reaktor nuklir di Indonesia adalah memenuhi kebutuhan sistem energi nuklir dalam negeri dengan desain domestik yang memenuhi persyaratan keselamatan dan keandalan tinggi, ekonomis, ramah lingkungan, luwes dalam pemanfaatan industri, efisien dan luwes dalam pemanfaatan bahan bakar, serta menghasilkan limbah yang minim. Sistem energi nuklir (PLTN Generasi-IV) tipe VHTR adalah turunan lanjut dari RGTT (HTGR). Dari pengalaman operasi dari beberapa HTGR di dunia pada tahun 70-an, HTGR telah berhasil dioperasikan dengan bahan bakar uranium maupun thorium tanpa harus mengubah desain struktur teras reaktornya<sup>[9]</sup>. Secara teoritis HTGR dapat digunakan untuk membakar aktinida seperti plutonium, maupun aktinida minor berumur sangat panjang dari limbah bahan bakar PLTN yang sekarang ini banyak beroperasi. Apabila HTGR dimuati dengan bahan bakar thorium, pemanfaatan bahan bakar akan menjadi sangat efisien karena teras HTGR akan dapat dirancang untuk menjadi teras pembiak dengan spektrum neutron termal<sup>[9]</sup>.

Desain struktur bahan bakar dan teras reaktor yang didominasi oleh bahan grafit dengan densitas termal yang rendah sedemikian rupa sehingga dalam kondisi apapun tidak akan terjadi pelelehan teras<sup>[10]</sup>. Fitur keselamatan desain yang sangat aman ini menimbulkan motivasi untuk memperluas pemanfaatan HTGR dengan peningkatan temperatur luaran reaktor. Pengembangan lanjut HTGR menjadi VHTR dengan meningkatkan temperatur luaran pendingin dari 700 °C menjadi 950 °C memperluas spektrum pemanfaatan VHTR. Peningkatan temperatur luaran pendingin VHTR akan memperluas pelayanan reaktor dalam melayani berbagai kebutuhan energi termal di berbagai industri strategis. Selain sebagai instalasi pembangkit listrik dengan siklus Brayton-Gas Turbin berefisiensi tinggi, VHTR dapat memasok energi termal untuk industri. Beberapa industri strategis yang energi termalnya dipasok oleh pembakaran bahan bakar fosil dapat digantikan dengan energi termal dari VHTR.

Desain komponen SEN VHTR lebih sederhana dengan jumlah komponen utama yang sedikit sehingga teknologinya akan lebih mudah dikuasai dan dilokalisasi secara domestik dengan sumber daya nasional. Afrika Selatan sebagai salah satu negara berkembang telah membuktikan dengan mengembangkan desain SEN VHTR yang diberi nama *Pebble Bed Modular Reactor* (PBMR). Saat ini perancangan PBMR telah mencapai tahapan pembangunan prototipe

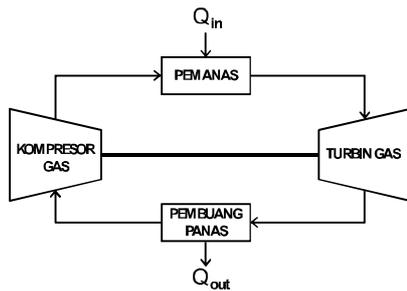
(*demonstration plant*)<sup>[11]</sup>. Selain negara Afrika Selatan, China juga sedang mengembangkan *High Temperature Reactor – Pebble Bed Module* (HTR-PM). Saat ini HTR-PM telah mencapai tahapan desain detail dan siap untuk diimplementasikan dalam instalasi demonstrasi.

Kemampuan SEN tipe VHTR untuk menghasilkan temperatur luaran yang sangat tinggi hingga mencapai 950 °C, akan sangat ideal untuk dikopel dengan sistem kogenerasi. Dengan sistem kogenerasi, reaktor digunakan untuk memasok energi termal dan energi listrik. Efisiensi termal ( $\eta_{ther}$ ) atau efisiensi pembangkitan daya listrik dalam sistem kogenerasi lebih rendah dibandingkan dengan sistem pembangkit daya listrik individual, tetapi nilai faktor pemanfaatan energi termal (*energy utilization factor*, EUF) akan meningkat bahkan dapat mencapai 80%<sup>[12]</sup>, dan 20% panas dibuang ke lingkungan. Nilai EUF yang tinggi akan meningkatkan ekonomi sistem kogenerasi dan efisiensi pemanfaatan cadangan bahan bakar.

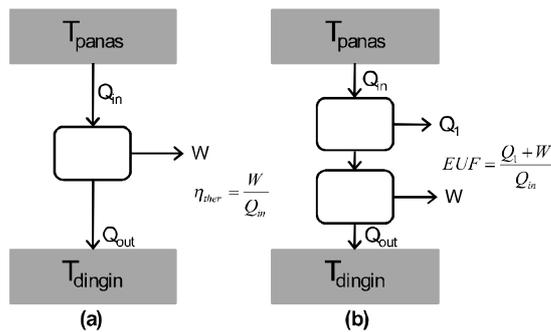
### **Sistem kogenerasi dengan siklus Brayton-Turbin gas<sup>[13]</sup>**

Siklus Brayton adalah siklus termodinamika mesin panas (*heat engine*) dengan medium kerja gas. Gas yang digunakan dapat berupa udara biasa, karbondioksida ataupun helium. Siklus Brayton-Turbin gas yang aktual mempunyai empat proses utama, yaitu proses kompresi adiabatik (*adiabatic compression*), pemanasan mendekati isobarik (*isobaric heat addition*), ekspansi adiabatik (*adiabatic expansion*) dan pembuangan panas mendekati isobarik (*isobaric heat rejection*). Proses kompresi dilakukan dengan kompresor gas, proses penambahan panas (pemanasan) dilakukan dengan pembakaran bahan bakar atau dalam SEN dilakukan dengan reaktor nuklir. Selanjutnya proses ekspansi untuk menghasilkan usaha dilakukan dengan turbin gas, dan proses pengambilan panas dilakukan dengan alat penukar kalor (*heat exchanger*, HE). Usaha/daya yang dihasilkan oleh turbin digunakan untuk memutar kompresor dan generator listrik. Skema implementasi dari siklus Brayton-Turbin gas ditunjukkan pada Gambar 1.

Sistem kogenerasi dengan siklus Brayton-turbin gas adalah suatu sistem termodinamika mesin panas yang selain menghasilkan usaha yang kemudian diubah menjadi daya listrik, juga memasok energi termal untuk kepentingan industri. Sistem ini sering disebut sistem kombinasi panas dan daya (*combine heat and power*, CHP). Skema sistem mesin panas pembangkit daya dan mesin panas kogenerasi dapat digambarkan seperti pada Gambar 2.



Gambar 1. Implementasi siklus Brayton-Turbin gas



Gambar 2. Perbandingan (a) mesin panas pembangkit daya dan (b) mesin panas kogenerasi

### Termodinamika gas ideal

Gas adalah media kerja yang digunakan dalam siklus Brayton. Untuk menyederhanakan analisis, sifat-sifat media kerja gas didekati dengan gas ideal. Gas ideal adalah gas sempurna dengan karakteristik: volume partikel gas sangat kecil (mendekati nol) bila dibandingkan dengan volume ruang yang ditempati oleh gas, tidak ada interaksi diantara partikel gas, dan tumbukan diantara partikel gas bersifat elastis. Tidak ada gas sesempurna gas ideal di alam ini, tetapi gas helium adalah gas nyata yang mempunyai sifat terdekat dengan gas ideal. Gas helium adalah gas dengan partikel mono-atomik, dan ukuran molekulnya terkecil diantara gas yang lain. Atom helium yang berbentuk bola tidak menimbulkan momen dipole sehingga kecil kemungkinan adanya interaksi antar partikel, dan tumbukan antar partikel gas yang berbentuk bola akan selalu dekat dengan sifat elastis. Gas ideal mengikuti persamaan:

$$PV = nRT \quad (1)$$

dengan  $P$  dan  $V$  masing-masing adalah tekanan dan volume, sedangkan  $n$ ,  $R$  dan  $T$  adalah jumlah mol, konstanta gas, dan temperatur absolut.

Proses dalam kompresor dan turbin gas yang akan diuraikan dalam bagian berikut ini tidak lain adalah proses kompresi dan ekspansi gas ideal.

Proses lain dalam siklus Brayton adalah proses perpindahan panas melalui perangkat alat penukar kalor gas ke gas.

Dalam analisis termodinamika siklus Brayton, kondisi temperatur dan tekanan dalam setiap titik yang ditinjau menjadi parameter keadaan yang harus ditentukan, dan dengan dua parameter tersebut, dengan menggunakan tabel dan atau persamaan gas ideal dapat ditetapkan parameter termodinamika lainnya seperti spesifik entalpi, spesifik entropi, kapasitas panas tekanan konstan dan kapasitas panas volume konstan<sup>[14]</sup>.

### 1. Termodinamika kompresor gas<sup>[13]</sup>

Proses termodinamika ideal dalam kompresor adalah proses isentropik. Dalam proses ideal ini medium kerja gas ditekan sehingga tekanannya naik tanpa diikuti oleh adanya penambahan entropi. Pada kenyataannya, terdapat peningkatan temperatur dan tekanan yang diikuti dengan penambahan entropi. Dari analisis volume kendali tetap terhadap kompresor diperoleh persamaan<sup>[6]</sup> termodinamika yang berlaku dalam kompresor aktual, yaitu:

$$\frac{P_2}{P_1} = \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (2)$$

$$T_2 = T_1 \left\{ 1 + \frac{1}{\eta_s} \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \right\} \quad (3)$$

$$\dot{W}_{\text{kompresor}} = \dot{m} c_p (T_2 - T_1) \quad (4)$$

Pada persamaan di atas, subskrip 1 untuk titik masuk dan 2 untuk titik keluar.  $P$  dan  $T$  masing-masing untuk tekanan dan temperatur absolut.  $\dot{W}$ ,  $\dot{m}$ ,  $c_p$ ,  $c_v$  secara berurutan, adalah kerja kompresor spesifik, laju aliran massa, kapasitas panas spesifik tekanan konstan, kapasitas panas spesifik volume konstan, sedangkan  $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$  dan  $\eta_s$  adalah efisiensi isentropis kompresor.

### Termodinamika turbin gas<sup>[13]</sup>

Proses ideal yang terjadi dalam turbin gas adalah proses ekspansi isentropis. Medium kerja gas mengalami proses ekspansi dengan entropi konstan. Pada kondisi nyata, dalam proses ekspansi gas mengalami penurunan temperatur dan tekanan yang disertai dengan penambahan entropi. Sesuai analisis volume kendali pada turbin<sup>[6]</sup>, maka persamaan termodinamika yang berlaku pada proses ekspansi dalam turbin gas dapat dituliskan sebagai:

$$\frac{P_2}{P_1} = \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (5)$$

$$T_2 = T_1 \left\{ 1 + \eta_s \left[ 1 - \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \right\} \quad (6)$$

$$\dot{W}_{\text{turbin}} = \dot{m} c_p (T_1 - T_2) \quad (7)$$

Variabel dalam persamaan (5), (6), dan (7) untuk huruf yang sama dengan persamaan (2), (3), dan (4) mempunyai arti yang sama, perbedaannya hanya untuk kasus dalam turbin dan kompresor.

### Termodinamika alat penukar kalor<sup>[13]</sup>

Dalam alat penukar kalor terjadi pertukaran sejumlah energi termal dari fluida panas (jalur panas pada sketsa alat penukar kalor) ke fluida dingin tanpa melalui pencampuran massa fluida. Terdapat berbagai tipe alat penukar kalor, tetapi untuk penyederhanaan analisis digunakan alat penukar kalor aliran berlawanan dengan bentuk sederhana yang dapat digambarkan dalam sketsa alat penukar kalor di bawah ini.



Gambar 3. Sketsa alat penukar kalor aliran berlawanan

Dari hasil analisis metode volume kendali<sup>[6]</sup>, diperoleh beberapa persamaan penting yang dapat digunakan dalam analisis alat penukar kalor, persamaan tersebut dapat ditulis sebagai berikut.

$$\dot{m}_{\text{pan}} c_{p\text{-pan}} (T_1 - T_2) = \dot{m}_{\text{din}} c_{p\text{-din}} (T_4 - T_3) \quad (8)$$

$$P_2 = P_1 (1 - \Delta P_{\text{pan}}) \quad (9)$$

$$P_4 = P_3 (1 - \Delta P_{\text{din}}) \quad (10)$$

$$LMTD = (\Delta T_{\text{pan}} - \Delta T_{\text{din}}) / \ln \left( \frac{\Delta T_{\text{pan}}}{\Delta T_{\text{din}}} \right) \quad (11)$$

Pada persamaan diatas simbol  $P$ ,  $T$ ,  $\dot{m}$ ,  $c_p$  masing-masing adalah untuk tekanan, temperatur absolut, laju aliran massa dan kapasitas panas spesifik.  $LMTD$  adalah *log mean temperature difference* untuk alat penukar kalor.

Pemodelan aliran fluida dalam sistem perpipaan tidak dipertimbangkan dalam analisis perancangan ini. Oleh karena itu, di dalam pipa media kerja tidak mengalami proses

termodinamika apapun sehingga keadaan media kerja gas, yaitu temperatur dan tekanan, adalah tetap. Asumsi ini sangat memudahkan litbang tahapan perancangan desain konseptual sistem SEN kogenerasi, karena dalam tahap ini tidak diperlukan data tentang panjang dan rute jalur perpipaan, yang sebenarnya data tersebut dikembangkan dalam tahapan lebih lanjut dari tahapan desain konseptual, yaitu tahapan desain dasar (*basic design*).

## HASIL DAN PEMBAHASAN

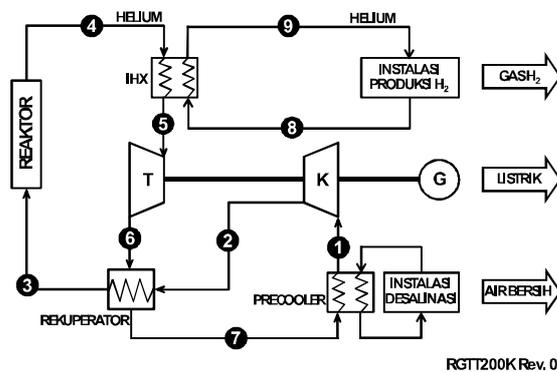
### Desain konseptual sistem SEN kogenerasi RGTT200K

Seperti diuraikan pada bagian pendahuluan, tujuan dari penelitian kali ini adalah litbang desain konseptual sistem SEN sebagai kandidat desain SEN nasional untuk memenuhi kebutuhan terhadap sistem energi nuklir domestik yang memenuhi persyaratan keselamatan dan keandalan tinggi, ekonomis, ramah lingkungan, luwes dalam pemanfaatan di industri, efisien dan luwes dalam pemanfaatan bahan bakar, serta menghasilkan limbah yang minim. Sesuai dengan kondisi pertumbuhan listrik nasional<sup>[5]</sup>, daya termal reaktor SEN yang sesuai adalah 200 MWt. Dengan memanfaatkan siklus Brayton-Turbin gas, daya termal sebesar ini akan dapat menghasilkan daya listrik yang memadai untuk kebutuhan listrik di luar JAMALI. Sistem kogenerasi harus diterapkan agar diperoleh SEN yang dapat memenuhi persyaratan di atas. Tipe reaktor VHTR dipilih agar diperoleh opsi pemanfaatan bahan bakar yang lebih leluasa dan menghasilkan limbah nuklir yang minimal, serta mempunyai tingkat keselamatan dan keandalan tinggi.

Negara Indonesia adalah negara kepulauan, yang mana luas negara didominasi oleh area lautan, oleh karena itu kebutuhan air bersih akan menjadi tuntutan. Dengan pertimbangan ini, sistem kogenerasi pembangkit daya listrik dan desalinasi menjadi prasyarat. Selain itu, kemampuan reaktor tipe VHTR yang mampu memasok energi pada temperatur tinggi (950 °C), memotivasi untuk mempertimbangkan kogenerasi dengan proses industri strategis masa depan, yaitu produksi hidrogen termokimia. Dengan mempertimbangan berbagai kondisi nasional dan kecenderungan sistem kogenerasi di masa depan, akhirnya diputuskan desain konseptual sistem SEN kogenerasi berbasis RGTT yang diberi nama RGTT200K dengan diagram alir seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 4.

Diagram alir pada Gambar 4 masih merupakan diagram alir yang mentah, dan belum mempunyai arti sebagai suatu desain konseptual apabila neraca massa dan energi di dalam setiap komponennya belum teranalisis. Untuk itu setiap

komponen (reaktor, IHX, turbin gas, rekuperator, *precooler*, kompresor gas, instalasi desalinasi dan instalasi produksi hidrogen) dimodelkan sebagai satu volume kendali tetap. Pada kedua ujung masuk dan keluar dari volume kendali terdapat titik node atau nodal (terdapat 9 nodal dalam Gambar 4). Pada titik node (nodal) tersebut dilakukan penentuan nilai tekanan dan temperatur untuk menghitung neraca massa dan energi dari setiap volume kendali. Sembilan nodal tersebut dalam penelitian ini disebut sebagai titik pengamatan, karena parameter keadaan pada nodal (temperatur dan tekanan) tersebut selalu diamati untuk pertimbangan dalam analisis setiap volume kendali yang diapitnya.

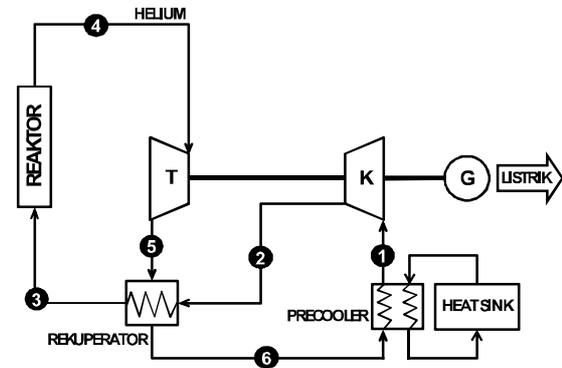


Gambar 4. Digaram alir desain konseptual sistem SEN kogenerasi RGTT200K

### Validasi model proses termodinamika

Untuk menganalisis desain konseptual sistem SEN kogenerasi berbasis RGTT seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4, dibuat pemodelan proses termodinamika sistem secara matematis dengan menggunakan program *Spreadsheet* dan *Visual Basic*. Hasil analisis volume kendali tetap, yaitu persamaan (1) sampai dengan (11), menjadi tulang punggung dalam pemodelan matematis ini. Pemodelan meliputi model proses termodinamika dalam reaktor nuklir sebagai pemanas non-isobarik (tetapi mendekati isobarik), proses termodinamika kompresi gas non-isentropis dalam kompresor, proses termodinamika ekspansi gas non-isentropis dalam turbin gas, dan proses termodinamika perpindahan panas non-isobarik dalam IHX (*intermediate heat exchanger*) dan rekuperator. Untuk tujuan melakukan validasi, terhadap model proses termodinamika yang telah disusun tersebut, maka program digunakan untuk menghitung desain konseptual sistem serupa, yaitu desain konseptual sistem GTHTR300 yang telah dikembangkan oleh *Japan Atomic Energy Agency (JAEA)*<sup>[7]</sup> dengan diagram alir ditunjukkan pada Gambar 5. Dalam validasi ini, diagram alir sistem GTHTR300 pada Gambar 5 dibagi menjadi 5 volume kendali dengan 6 buah nodal (atau 6 titik

pengamatan). Masing-masing nodal mengapit satu volume kendali yaitu volume kendali untuk reaktor, turbin, rekuperator, *precooler* dan kompresor. Hasil yang diperoleh dari proses validasi ini ditunjukkan dengan perbandingan parameter keadaan untuk 6 titik pengamatan ( $T_1$  s.d  $T_6$  dan  $P_1$  s.d  $P_6$ ) seperti terlihat pada Tabel 1.



Gambar 5. Desain konseptual sistem GTHTR300

Tabel 1. Perbandingan parameter keadaan (T dan P), laju aliran massa dan daya listrik untuk 9 titik pengamatan pada GTHTR300<sup>[7]</sup> dan Model SEN

Parameter	Nilai parameter		Kesalahan relatif (%)
	GTHTR300	Model	
$T_1, ^\circ\text{C}$	28	28	0,0
$P_1, \text{MPa}$	3,59	3,59	0,0
$T_2, ^\circ\text{C}$	137	137	1,5
$P_2, \text{MPa}$	7,11	7,11	0,0
$T_3, ^\circ\text{C}$	587	586	0,17
$P_3, \text{MPa}$	7,0	7,0	0,0
$T_4, ^\circ\text{C}$	850	850	0,0
$P_4, \text{MPa}$	6,88	6,88	0,0
$T_5, ^\circ\text{C}$	618	618	0,0
$P_5, \text{MPa}$	3,68	3,68	0,0
$T_6, ^\circ\text{C}$	167	167	0,0
$P_6, \text{MPa}$	3,61	3,61	0,0
$m, \text{kg/det}$	439	439	0,0
$P, \text{MWe}$	275	284	3,2
$\eta_{\text{ther}}, \%$	45,8	47,1	2,8

Dari tabel hasil validasi model termodinamika terhadap data GTHTR300 di atas, terlihat bahwa kesalahan relatif terbesar hanya 3,2%, dan masih lebih kecil dari 5% (pada umumnya kesalahan relatif hingga 10% dianggap masih wajar). Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa model termodinamika siklus Brayton-Turbin gas yang telah dibuat (dengan program *Spreadsheet* dan *Visual Basic*) cukup memadai dan valid untuk digunakan dalam analisis perancangan desain konseptual sistem SEN kogenerasi RGTT200K.

### Analisis sistem SEN kogenerasi RGTT200K

Diagram alir dari sistem SEN kogenerasi RGTT200K yang telah dikembangkan dalam litbang ini ditunjukkan pada Gambar 4. Sistem kogenerasi yang diterapkan adalah kogenerasi produksi hidrogen ( $H_2$ ), pembangkit listrik dan desalinasi. Dalam rancangan diagram alir tersebut, hanya beberapa parameter keadaan sistem yang telah diketahui. Parameter keadaan sistem tersebut diperoleh dari persyaratan kebutuhan, yaitu: daya termal reaktor 200 MWt, temperatur luaran pendingin dari teras reaktor  $950\text{ }^\circ\text{C}$  (agar dapat dikopel dengan sistem produksi hidrogen), tekanan pendingin (fluida kerja) masuk turbin 5 – 7 MPa (menyesuaikan dengan ketersediaan dan kecenderungan/*trend* desain turbin gas poros tunggal berefisiensi tinggi dengan putaran yang memadai untuk memutar generator listrik)<sup>[14]</sup>, fluida yang digunakan sebagai medium kerja adalah gas helium (karena mempunyai sifat termodinamika yang baik sebagai pendingin, dan kompatibel dengan struktur sifat dan material teras reaktor).

Selanjutnya analisis perancangan desain konseptual SEN kogenerasi dilakukan dengan perhitungan uji coba (*trial calculation*), yaitu dengan cara memvariasikan masukan keadaan sistem (terutama temperatur dan tekanan) di semua titik pengamatan (terdapat 9 titik pengamatan dalam Gambar 4). Dari kondisi temperatur dan tekanan tebakan yang telah ditetapkan untuk tujuan uji coba tersebut, dapat ditentukan parameter termodinamika gas helium (densitas, entalpi spesifik, entropi spesifik, kapasitas panas tekanan konstan, kapasitas panas volume konstan dan sifat termal lainnya). Asumsi temperatur dan tekanan di 9 titik pengamatan harus diuji dengan memasukkan nilai laju alir massa ke semua persamaan proses termodinamika terkait, yaitu persamaan (2) sampai (11). Kesalahan hasil perhitungan dan asumsi awal dikoreksi secara bertahap untuk mendapatkan nilai temperatur dan tekanan di 9 titik pengamatan yang konvergen. Laju aliran massa juga harus divariasikan sedemikian rupa sehingga diperoleh sirkulasi massa yang sesuai untuk turbin gas dan kompresor gas agar menghasilkan nilai EUF yang tinggi. Untuk mendapatkan desain konseptual yang optimal, proses perhitungan coba-coba (*trial calculation*) ini harus dilakukan oleh seseorang yang mempunyai kemampuan justifikasi rekayasa (*engineering judgement*) dan memerlukan waktu serta membutuhkan perhatian khusus.

Tabel 2. Distribusi parameter keadaan pada 9 titik pengamatan sistem RGTT200K

Titik pengamatan	Parameter keadaan	
	Temperatur, $^\circ\text{C}$	Tekanan, MPa
1	30	2,38
2	141,6	5,2
3	614,1	5,1
4	950	5,0
5	850	4,9
6	640	2,5
7	167,5	2,39
8	516,7	5,18
9	900	5,15

Hasil desain konseptual sistem SEN kogenerasi yang diperoleh dari beberapa kali perhitungan model proses termodinamika ditunjukkan pada Tabel 2, dalam bentuk distribusi temperatur dan tekanan di sembilan titik pengamatan. Kondisi neraca energi dalam komponen utama sistem (yaitu: reaktor, IHX, turbin gas, rekuperator, kompresor, unit instalasi produksi hidrogen, unit instalasi desalinasi) ditampilkan dalam Tabel 3.

Tabel 3. Distribusi daya termal pada komponen utama sistem RGTT200K

Komponen utama sistem RGTT200K	Daya termal, MWt
Reaktor	200
<i>Intermediate Heat Exchanger</i>	59,5
Turbin gas	124,9
Kompresor	66,46
Rekuperator	281,3
Instalasi Produksi Hidrogen	59,5
Instalasi Desalinasi	81,88

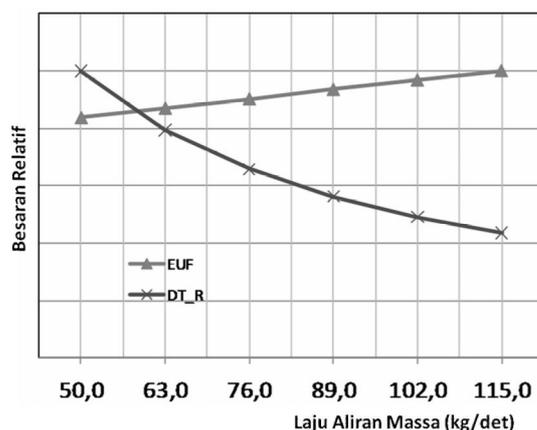
Data dalam tabel 2 dan Tabel 3 diperoleh dengan menentukan laju aliran massa sebesar 115 kg/det (dari hasil beberapa kali *trial calculation*). Daya mekanik yang tersedia untuk menghasilkan listrik adalah selisih antara daya turbin dan kompresor, yaitu  $124,9\text{ MW} - 66,46\text{ MW} = 58,46\text{ MW}$ . Bila efisiensi generator listrik 98,6%, maka daya listrik yang dihasilkan oleh sistem RGTT200K adalah  $0,986 \times 58,46\text{ MW} = 57,6\text{ MWe}$ . Dengan demikian sistem RGTT200K mempunyai efisiensi termal  $57,6/200 \times 100\% = 28,8\%$ .

Produksi hidrogen termokimia mempunyai efisiensi maksimum 52%<sup>[16]</sup>, dan untuk setiap MW daya termal akan mampu memproduksi hidrogen sebanyak 6800  $\text{Nm}^3/\text{hari}$ . Dengan demikian desain sistem SEN kogenerasi RGTT200K akan mampu memproduksi hidrogen dengan kapasitas  $0,52 \times 59,5\text{ MW} \times 6800\text{ (Nm}^3/\text{hari)}/\text{MW} = 210.392\text{ Nm}^3/\text{hari}$ .

Unit instalasi desalinasi hanya memanfaatkan energi panas sisa yang seharusnya dibuang ke

lingkungan. Untuk unit instalasi desalinasi, desain sistem SEN kogenerasi RGTT200K menyediakan energi termal dengan daya 81,88 MW. Efisiensi pemanfaatan termal rata-rata dari unit proses desalinasi dengan sistem *multi stage flashing* (MSF) adalah 45%, dan setiap MW energi termal akan dapat menghasilkan air bersih 870 ton/hari. Dengan demikian, RGTT200K akan dapat menghasilkan air bersih dengan kapasitas  $0,45 \times 81,88 \text{ MW} \times 870 \text{ (ton/hari)/MW} = 32.056 \text{ ton/hari}$ .

Efisiensi termal pembangkitan listrik untuk desain konseptual sistem RGTT200K akan mencapai  $57,6 \text{ MW} / 200 \text{ MW} = 29 \%$ . Sedangkan faktor pemanfaatan energi termal EUF mencapai  $= (0,52 \times 59,53/200) + (58,46/200) + (0,45 \times 81,88/200) = 63,05 \%$ . Nilai EUF yang dihasilkan oleh desain konseptual sistem RGTT200K sudah melebihi efisiensi termal dari PLTN yang menggunakan siklus Rankine (efisiensi termal rata-rata lebih kurang 30%), tetapi sesungguhnya jika dilakukan perhitungan *trial* lagi EUF mungkin dapat ditingkatkan hingga mencapai nilai di atas 70%<sup>[12]</sup>. Kemungkinan untuk mendapatkan peningkatan EUF ditunjukkan oleh Gambar 6. Gambar 6 menunjukkan kecenderungan adanya peningkatan EUF bersamaan dengan kenaikan laju aliran massa, tetapi aliran massa yang tinggi akan menyebabkan temperatur luaran pendingin reaktor menurun, karena  $\Delta T$  pendingin reaktor menurun dengan meningkatnya laju aliran massa pendingin. Gambar 6 diperoleh dari data perhitungan selama proses *trial calculation* dalam penelitian ini, hingga pada akhirnya diperoleh laju aliran massa 115 kg/det.



Gambar 6. Kurva kecenderungan nilai EUF dan  $\Delta T$  pendingin reaktor (DT\_R) vs laju aliran massa

Sudah tentu untuk mendapatkan nilai EUF yang maksimum akan diperlukan waktu yang cukup lama dan usaha serius. Pemanfaatan kode komputer yang memadai seperti FLOWNEX<sup>[17]</sup> akan dapat membantu mempercepat untuk mendapatkan desain konseptual RGTT200K yang optimal.

## KESIMPULAN

Dari litbang ini diperoleh desain konseptual sistem siklus kogenerasi untuk SEN kogenerasi berbasis RGTT dengan daya termal 200 MWt yang diberi nama RGTT200K, dengan arti Reaktor Gas Temperatur Tinggi 200 MWt untuk Kogenerasi. Sistem kogenerasi dari RGTT200K adalah untuk produksi gas hidrogen, pembangkitan listrik dan desalinasi air laut menjadi air bersih. Energi termal sistem SEN kogenerasi RGTT200K dipasok oleh reaktor nuklir tipe VHTR dengan daya termal 200 MWt. Distribusi daya dari masing-masing proses pasokan energi adalah 59,5 MWt untuk produksi gas hidrogen, 57,6 MWe untuk pembangkitan listrik, dan 81,9 MWt untuk desalinasi. Desain konseptual siklus sistem kogenerasi RGTT200K mempunyai efisiensi termal (untuk pembangkitan listrik) 29% dan faktor utilisasi energi (*energy utilization factor*, EUF) 63%. Dengan demikian 37% dari 200 MWt energi panas yang dibangkitkan dalam reaktor dibuang ke lingkungan. Peningkatan nilai EUF lebih lanjut, dapat dilakukan dengan lebih baik dan efisien jika memanfaatkan alat bantu perangkat lunak yang memadai.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Anonim, "Kebijakan Energi Nasional", Peraturan Presiden RI Nomor 5 Tahun 2006.
2. Anonim, "Rencana Pembangunan Jangka Panjang Nasional", Undang Undang RI Nomor 17 Tahun 2007.
3. Anonim, "Energi", Undang Undang RI Nomor 30 tahun 2007.
4. Anonymous, "Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy System" US DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and Generation IV International Forum, 2002.
5. Anonim, "Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik PT PLN (Persero) 2009-2018", Direktorat Perencanaan dan Teknologi, PT PLN (Persero), ISBN 978-979-1203-13-5, 2009.
6. CENGEL, A.Y., BOLES, A.M., "Thermodynamics: An Engineering Approach 6th Edition", Mc Graw Hill Higher Education, 2007.
7. KUNITOMI K., et.al., "Research and Development for Gas Turbine System in GTHTR300", JSME International Journal, Series B, Vol.47, No.2, 2004.
8. DIMIAN A. C., "Integrated Design And Simulation of Chemical Processes", Elsevier, Amsterdam, 2003.
9. Anonymous, "Thorium Fuel Cycle—Potential Benefits and Challenges", IAEA-TECDOC

- 1450, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2005.
10. WESSMAN, G. L. AND MOFFETTE, T.R., "HTGR Plant Safety Design Bases", Nuclear Engineering and Design, Vol.26, Issue 1, 1974.
  11. MATZNER, D., "PBMR Project Status and The Way Ahead", Proceedings of 2nd International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology, Beijing, China, 2004.
  12. SAITO, S., "Nuclear Energy and Hydrogen Production-The Japanese Situation", Policy Debate on The Potential Contribution of Nuclear Energy to Production of Hydrogen, OECD/NEA, 15 October 2004.
  13. HORLOCK, J. H., "Advanced Gas Turbine Cycles", Pergamon, Amsterdam, 2003.
  14. ARP D.V. AND MCCARTY R.D., "Thermophysical Properties of Helium-4 from 0.8 to 1500 K and With Pressure to 2000 MPa", National Institute of Standard and Technology, US Department of Commerce, 1989.
  15. GIAMPAOLO, A., "Gas Turbine Handbook-Principles and Practices", 3rd edition, CRC Press, USA, 2006.
  16. BROWN L.C. et.al., "High Efficiency Generation of Hydrogen Fuel Using Nuclear Power", GA-A24285, Nuclear Energy Research Initiative (NERI) Program for US-DOE, 2003.
  17. VAN RAVENSWAAY J. P., et.al., "Verification and Validation of the HTGR Systems CFD Code FLOWNEX", Proceeding of 2nd International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology, Beijing, China, 2004.
- berkelanjutan (*sustainability*) dan NPT *resistance*.
2. Daya RGTT 200K sebesar 200 MWth disesuaikan dengan kebutuhan energi di propinsi potensial pada tahun 2025.
  3. Beban puncak diperoleh dari perkiraan beban puncak tahun 2025 yang datanya diambil dari dokumen PLN.
  4. Akan kami usahakan agar data-data litbang ini dapat mendukung *FS Babel SMR for co-generation*.

## TANYA JAWAB

### Pertanyaan :

1. Apa saja improvement dari reaktor generasi IV dibandingkan generasi sebelumnya?
2. Reaktor yang disampaikan dayanya 200 MWth. Berapa hasil perhitungan Mwe-nya?
3. Bagaimana menghitung beban puncak?  
(Suroso, PTRKN BATAN)
4. Harap hasil konseptual desain ini dapat langsung digunakan untuk melengkapi Pre FS Babel SMR for Co-generation.  
(Adiwardojo, Deputy PTEN BATAN)

### Jawaban :

1. Reaktor generasi IV mempunyai sifat yang memenuhi kriteria: aman, handal, ekonomis,