

DESAIN KONSEPTUAL SISTEM RGTT 200 MWt SIKLUS TAK LANGSUNG

Mohammad Dhandhang Purwadi

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir (PTRKN) - BATAN
Kawasan PUSPIPTEK Gd. No. 80 Serpong, Tangerang Selatan 15310

e-mail: dhan@batan.go.id

ABSTRAK

DESAIN KONSEPTUAL SISTEM RGTT 200 MWt SIKLUS TAK LANGSUNG. Pemerintah Indonesia telah menetapkan kebijakan pemanfaatan energi nuklir. Dalam mempersiapkan pemanfaatan energi nuklir RPJMN 2010-2014 mengamanatkan untuk melakukan litbang desain konseptual reaktor daya maju kogenerasi. Dalam rangka mengemban amanat ini, telah dikembangkan desain konseptual RGTT200K. Reaktor ini mempunyai kelebihan dapat dimuati dengan bahan bakar uranium, plutonium (MOX) dan thorium. Selain itu reaktor ini bebas dari kecelakaan parah. Sayangnya RGTT200K mempunyai suatu kelemahan, yaitu dalam teras timbul debu karbon yang mengandung karbon-14 yang menyebar hingga sampai turbin gas. Kondisi ini akan menyulitkan perawatan reaktor dan sedikit banyak akan menurunkan tingkat keselamatan operasi reaktor. Untuk menanggulangi kelemahan tersebut, dalam litbang ini dikembangkan sistem RGTT200KT, yaitu varian RGTT200K dengan siklus Brayton tak langsung. Dalam siklus tak langsung debu karbon hanya akan menyebar di untai primer saja. Analisis dalam desain sistem siklus RGTT200KT dilakukan dengan pemodelan proses termodinamika siklus sistem melalui metode volume kendali tetap dengan menggunakan kode komputer CyclePad. Pada pemodelan ini, setiap komponen sistem dimodelkan sebagai satu volume kendali tetap dan di dalamnya diberlakukan persamaan konservasi massa dan energi. Litbang ini menghasilkan suatu desain konseptual sistem RGTT200KT dengan efisiensi termodinamika 25,27% dan EUF 63,6%, serta menghasilkan listrik 50,54 MWe, 222.496 m³/hari gas hidrogen dan 38.327 ton air bersih per hari.

Katakunci: RGTT, VHTR, Sistem Kogenerasi, Produksi Hidrogen, Desalinasi

ABSTRACT

CONCEPTUAL DESIGN OF THE INDIRECT CYCLE RGTT 200 MWt SYSTEM. The Indonesian government has established the policy of nuclear energy utilization. In preparation for the utilization of nuclear energy, RPJMN 2010-2014 mandates to develop a conceptual design of advanced power reactor for cogeneration. In order to carry out this mandate, it has been developed a conceptual design of the RGTT200K. This reactor has the advantage which can be loaded with uranium, plutonium (MOX) and thorium fuel. In addition, this reactor is free from severe accidents. Unfortunately RGTT200K has a weakness, that is in the reactor core there arises the carbon dust that containing carbon-14 radioisotope which is spreads to the gas turbines. This condition would complicates the reactor maintenance, and to some extent will reduce the level of safety of reactor operation. To cope with the weakness, in this research, it was developed RGTT200KT system, which is the variant RGTT200K with indirect Brayton cycle. In the indirect cycle, carbon dust will only be spread in the primary loop only. The analysis in the designing RGTT200KT cycle is done with thermodynamic cycle process modeling system through the control volume method by using CyclePad software. In this modeling, each system component is modeled as fixed control volume and mass and energy conservation law were applied on it. This research resulted in the conceptual design of the RGTT200KT with thermodynamic efficiency is 25.27% and EUF 63.6%, as well as generates 50.54 MWe electricity, 222,496 m³/day hydrogen gas, and 38,327 tons clean water per day.

Keywords: HTGR, VHTR, Cogeneration System, Hydrogen Production, Desalination

1. PENDAHULUAN

Pemerintah Indonesia melalui UU RI No. 17 Tahun 2007^[1] dan No. 30 Tahun 2007^[2] telah menetapkan kebijakan pemanfaatan energi nuklir. Energi nuklir bersama energi baru dan terbarukan lainnya, yaitu biomassa, tenaga air, tenaga surya, tenaga angin, diharapkan dapat berkontribusi dalam sistem energi nasional dengan memberi sumbangan sebesar 5% pada tahun 2025^[3]. Pada saat

ini sistem energi primer nasional didominasi oleh energi fosil, terutama dari minyak bumi dengan kontribusi mencapai 48%^[4]. Sedangkan untuk pembangkitan energi listrik minyak bumi mendominasi hingga 49%^[4]. Kenaikan harga minyak melebihi 100 dolar AS per barrel akan mengancam keamanan pasokan energi nasional. Pertumbuhan ekonomi dan jalannya pembangunan akan terhambat oleh kondisi ini. Oleh karena itu perlu dicarikan sumber energi alternatif yang dapat mengatasi ancaman pasokan energi nasional pada saat ini.

Salah satu upaya dalam mempersiapkan pemanfaatan energi nuklir di Indonesia, pemerintah melalui Peraturan Presiden No.5 Tahun 2010^[5] tentang Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional (RPJMN 2010-2014) mengamanatkan untuk melakukan penelitian dan pengembangan desain konseptual reaktor daya maju kogenerasi. Dalam rangka mengemban amanat ini, telah dikembangkan desain konseptual reaktor berpendingin gas temperatur tinggi yang dinamai RGTT200K^[6]. RGTT200K adalah reaktor gas temperatur tinggi dengan bahan bakar bola. Reaktor tipe ini mempunyai kelebihan dalam hal fleksibilitas dalam pemanfaatan bahan bakar, sehingga dapat dimuati dengan bahan bakar uranium, plutonium (MOX) dan thorium tanpa harus mengubah desain teras reaktor. Selain itu reaktor ini bebas dari kecelakaan parah yang timbul karena pelelehan teras reaktor^[7]. Sayangnya RGTT berbahan bakar bola ini mempunyai sedikit kelemahan, yaitu dalam teras reaktor timbul debu karbon yang disebabkan oleh karena bahan bakar bola yang saling bergesekan^[8,9]. Dalam sistem RGTT200K dengan gas siklus langsung (siklus Brayton), debu karbon yang membawa radioisotop karbon-14 akan menyebar hingga sampai turbin gas. Kondisi ini akan menyulitkan perawatan reaktor dan sedikit banyak akan menurunkan tingkat keselamatan reaktor.

Dalam litbang ini dikembangkan sistem RGTT200KT, yaitu suatu sistem reaktor berpendingin gas temperatur tinggi varian dari RGTT200K^[6] dengan siklus Brayton tak langsung. Teras reaktor RGTT200KT mempunyai daya termal yang sama dengan RGTT200K, yaitu 200 MWt. Reaktor juga dirancang untuk dapat dikopel dengan sistem kogenerasi untuk pembangkitan panas proses industri (produksi hidrogen, pencairan dan gasifikasi batubara, pengambilan panas lanjut), dan pembangkitan listrik. Perbedaan utama adalah terletak pada sistem siklusnya, RGTT200KT mempunyai untai siklus primer dan sekunder, sedangkan RGTT200K hanya mempunyai untai siklus primer. Solusi terhadap masalah debu ini akan menurunkan efisiensi reaktor secara keseluruhan, tetapi keandalan dan keselamatan pengoperasian reaktor dapat ditingkatkan.

Analisis dan perancangan sistem siklus RGTT200KT dilakukan dengan pemodelan proses termodinamika siklus sistem dengan metode volume kendali tetap (*fixed control volume method*) melalui penggunaan kode komputer CyclePad.

CyclePad adalah suatu paket perangkat lunak *Intelligent Computer Aided Instruction* (ICAI)^[10] yang dikembangkan di Universitas *Northwestern* dan Universitas *Oxford*. Perangkat lunak ini sangat ideal untuk perancangan konseptual dari suatu sistem pembangkit daya (*power plant*). CyclePad dapat digunakan untuk memodelkan sistem kogenerasi dengan baik. Dalam perjalanan pengembangan dan penyempurnaan, perangkat lunak ini telah digunakan dan divalidasi untuk optimasi sistem energi^[11,12,13,14]. Oleh karena itu CyclePad cukup memadai untuk digunakan dalam pengembangan dan optimasi desain konseptual RGTT200KT.

Dalam litbang ini, semua komponen utama sistem RGTT200KT, meliputi reaktor, *intermediate heat exchanger*, turbin gas, kompresor, blower, resirkulator, rekuperator, unit produksi hidrogen dan unit desalinasi dimodelkan secara termodinamika dengan model proses yang sedekat mungkin dengan proses nyata, yaitu dengan cara menghindari proses ideal seperti proses *reversible*. Setiap individu komponen sistem dimodelkan sebagai satu volume kendali tetap dan di dalamnya diberlakukan persamaan kekekalan massa dan energi. Untuk keperluan desain konseptual, pemodelan aliran pendingin dalam sistem perpipaan dapat diabaikan. Dengan demikian pemodelan untuk mendapatkan desain konseptual RGTT200KT tidak diperumit dengan jalur sistem perpipaan.

2. DASAR TEORI DAN PEMODELAN

Pengembangan suatu desain konseptual meliputi pengembangan diagram alir sistem dan kemudian dilanjutkan dengan analisis dan perhitungan neraca massa dan neraca energi. Analisis dan perhitungan neraca massa dan energi yang dilakukan dalam tahap desain konseptual lebih menekankan pada analisis kondisi tunak (*steady state*). Tahap desain konseptual adalah tahapan awal dari pengembangan suatu produk teknologi dalam usaha untuk menjawab dan menyelesaikan persoalan yang ada beserta persyaratannya.

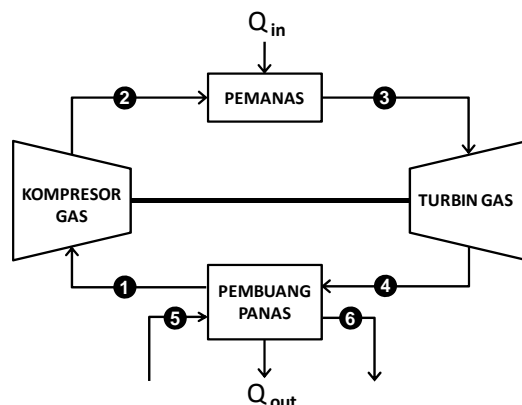
Sistem RGTT200KT dikembangkan dengan mengacu pada siklus Brayton dengan menggunakan gas helium sebagai medium kerja sistem. Gas helium mempunyai sifat sangat baik untuk dijadikan sebagai medium konversi energi. Sifat helium yang selalu berada pada kondisi fase tunggal (fase gas) dalam rentang temperatur yang sangat lebar dan inert akan menunjang kinerja sistem. Selain itu, helium mempunyai sifat termal yang baik dan tidak korosif. Sifat termal helium sangat menunjang kinerja sistem apabila sistem akan dikopel dengan konfigurasi sistem kogenerasi.

Dalam pengembangan desain konseptual RGTT200KT, analisis neraca massa dan energi dilakukan dengan metode volume kendali tetap (*fixed control volume method*). Metode ini telah digunakan secara manual untuk menyusun desain konseptual sistem RGTT200K dengan hasil yang baik^[6]. Metode volume kendali tetap juga dianut dalam perangkat lunak CyclePad dengan berbagai pengembangan untuk mempermudah perancangan dan optimasi sistem pembangkit daya.

2.1. Siklus Brayton Untuk Kogenerasi^[15]

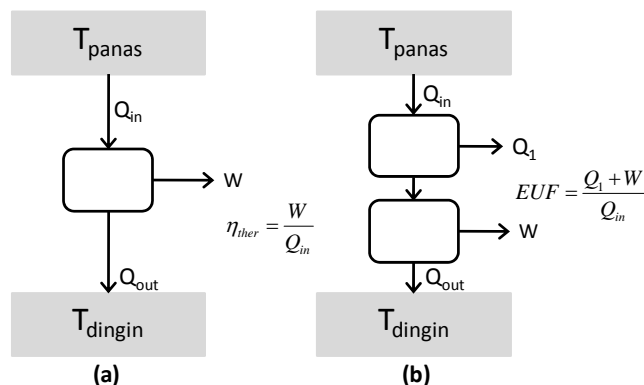
Siklus Brayton adalah suatu siklus termodinamika mesin panas (*heat engine*) dengan medium kerja gas. Gas yang biasa digunakan adalah karbondioksida atau helium. Siklus Brayton sistem tertutup mempunyai empat proses utama, yaitu proses kompresi adiabatik (*adiabatic compression*), pemanasan mendekati isobarik (*isobaric heat addition*), ekspansi adiabatik (*adiabatic expansion*) dan pembuangan panas kuasi isobarik (*isobaric heat rejection*). Proses kompresi dilakukan dengan kompresor gas, proses penambahan panas (pemanasan) dilakukan dengan pembakaran bahan bakar, dalam RGTT200KT dilakukan dengan reaktor nuklir temperatur tinggi berbahan bakar bola. 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 berikut ini.



Gambar 1. Implementasi siklus Brayton-Turbin gas

Sistem kogenerasi adalah suatu sistem termodinamika mesin panas yang selain menghasilkan usaha yang kemudian diubah menjadi daya listrik, juga memasok energi termal untuk kepentingan industri. Perlu diketahui bahwa dalam sistem kogenerasi selain efisiensi termodinamika terdapat faktor utilisasi energi termal (*energy utilization factor, EUF*) untuk mengukur kinerja sistem secara keseluruhan. Efisiensi termodinamika semata hanya untuk mengukur kinerja sistem dalam pembangkitan daya listrik, sedangkan EUF digunakan untuk mengukur kinerja sistem kogenerasi dalam pemanfaatan energi termal. Penjelasan lebih rinci dari EUF didiskripsikan dalam Gambar 2.



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

Gas yang digunakan dalam desain RGTT200KT adalah gas helium. Gas helium adalah suatu gas yang sifat-sifatnya sangat dekat dengan gas ideal, bahkan dari berbagai gas yang digunakan dalam mesin panas berbasis siklus Brayton, gas helium mempunyai sifat paling dekat dengan gas ideal dan mempunyai sifat termal yang sangat baik. 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 sempurna 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:

$$P V = n R T \quad (1)$$

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

2.2. Kompresor gas^[15]

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^[16]. 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. Penerapan hukum kekekalan massa dan energi pada volume kendali kompresor menghasilkan persamaan sebagai berikut.

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

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

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

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 η_s adalah efisiensi isentropis kompresor.

2.3. Turbin gas^[15]

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. Hukum konservasi massa dan energi pada volume kendali turbin gas menghasilkan persamaan berikut ini.

$$\frac{P_4}{P_3} = \left(\frac{T_4}{T_3} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (5)$$

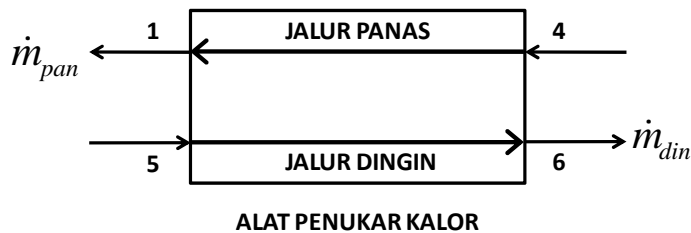
$$T_4 = T_3 \left\{ 1 + \eta_s \left[1 - \left(\frac{P_3}{P_4} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \right\} \quad (6)$$

$$\dot{W}_{\text{turbin}} = \dot{m} c_p (T_3 - T_4) \quad (7)$$

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.

2.4. Alat penukar kalor^[15]

Alat penukar kalor digunakan untuk mentransfer energi panas dari satu sistem fluida ke sistem fluida yang lain tanpa terjadi pencampuran massa fluida. Dalam desain RGTT200KT, alat penukar kalor digunakan sebagai alat penukar kalor biasa (HX), *Intermediate Heat Exchanger* (IHX), dan Rekuperator. 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 Gambar 3.



Gambar 3. Sketsa alat penukar kalor aliran berlawanan

Persamaan penting yang digunakan dalam analisis alat penukar kalor dapat ditulis sebagai berikut.

$$\dot{m}_{\text{pan}} c_{p-\text{pan}} (T_4 - T_1) = \dot{m}_{\text{din}} c_{p-\text{din}} (T_6 - T_5) \quad (8)$$

$$P_1 = P_4 (1 - \Delta P_{\text{pan}}) \quad (9)$$

$$P_6 = P_5 (1 - \Delta P_{\text{din}}) \quad (10)$$

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

Pada persamaan di atas 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.

2.5. Pemodelan komponen sistem dalam CyclePad

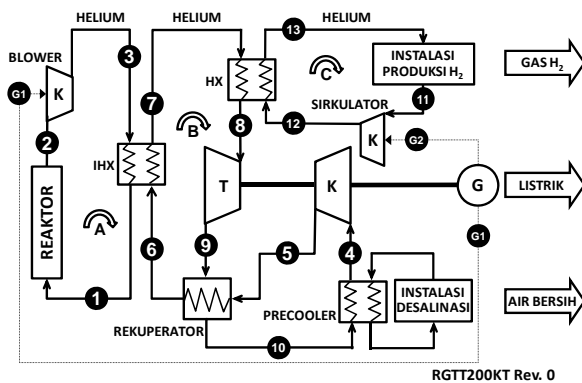
Dalam perangkat lunak CyclePad, reaktor nuklir dimodelkan sebagai pemanas yang bersifat non-isobarik dan non-isokorik, dengan demikian dimungkinkan mensimulasikan kondisi yang mana terjadi adanya perubahan tekanan dan densitas gas pada model volume kendali tetap dari reaktor.

Turbin gas dimodelkan sebagai alat ekspansi yang bersifat non-isentropis dan non-isotermal. Sedangkan untuk kompresor, blower dan sirkulator gas dalam CyclePad sebagai volume kendali tetap dengan sifat politropik, non-isotermal dan adiabatik.

Komponen sistem dengan prinsip sebagai alat penukar kalor dimodelkan sebagai suatu volume kendali tetap dengan sifat non-isokhorik dan non-isobarik pada kedua sisinya dengan pola aliran fluida berlawanan (*counter flow*)

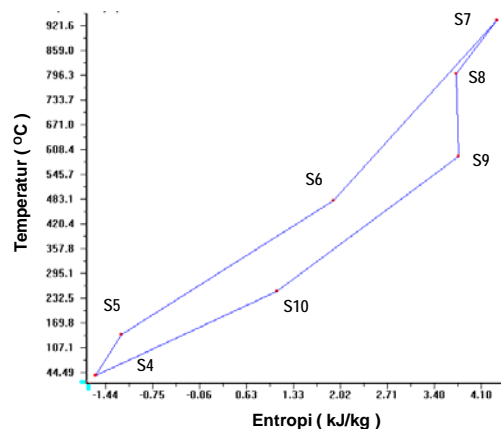
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Tujuan dari litbang ini adalah mendapatkan desain konseptual reaktor berpendingin gas temperatur tinggi (RGTT) dengan siklus Brayton tak langsung untuk kogenerasi. Desain sistem ini disebut sebagai RGTT200KT (Reaktor Gas Temperatur Tinggi 200 MWt untuk Kogenerasi dengan siklus Tak-langsung). Dalam perancangan sistem RGTT200KT dipertimbangkan beberapa aspek keselamatan untuk menahan penyebaran produk fisi ke lingkungan. Hasil pengembangan desain konseptual, yaitu berupa diagram alir RGTT200KT beserta neraca massa dan energinya ditunjukkan pada Gambar 4, 5 dan Tabel 1.



Gambar 4. Diagram alir sistem RGTT200KT Revisi 0

Gambar 4 menunjukkan bahwa sistem RGTT200KT mempunyai dua untai pendingin yaitu untai pendingin primer (untai A) yang bersentuhan langsung dengan teras reaktor nuklir berbahan bakar bola (*pebble bed*), dan untai pendingin sekunder (untai B) yang mengemban tugas untuk mengkonversi energi termal menjadi energi listrik melalui suatu turbin gas. Diagram T-S dari siklus termodinamika untai B (untai sekunder) ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Diagram T-S sistem RGTT200KT

Nilai parameter kondisi (tekanan dan temperatur) dari titik-titik penting (node) dalam diagram alir diuraikan dalam bentuk tabulasi pada Tabel 1 berikut ini.

Tabel 1. Parameter kondisi pada titik-titik penting dalam diagram alir RGTT200KT

| Nomor titik | Temperatur (°C) | Tekanan (MPa) |
|-------------|-----------------|---------------|
| 1 | 500,8 | 5,10 |
| 2 | 950,0 | 5,00 |
| 3 | 969,4 | 5,20 |
| 4 | 37,0 | 3,49 |
| 5 | 140,0 | 5,95 |
| 6 | 480,0 | 5,90 |
| 7 | 935,0 | 6,00 |
| 8 | 800,0 | 5,95 |
| 9 | 590,0 | 3,39 |
| 10 | 250,0 | 3,54 |
| 11 | 564,6 | 6,20 |
| 12 | 570,0 | 6,30 |
| 13 | 900,0 | 6,25 |

Untai C pada Gambar 4 menunjukkan untai sirkulasi helium untuk memasok energi panas pada sistem perangkat produksi gas hidrogen. Dari Tabel 1 di atas, terlihat bahwa tekanan untai sistem primer (untai A) lebih rendah dari tekanan pada untai sekunder (untai B). Dengan demikian bila terjadi kebocoran pada perangkat IHX, maka tidak akan terjadi pembebasan gas helium dari untai primer ke untai sekunder, tetapi sebaliknya gas helium dari untai sekunder akan masuk ke untai primer. Desain konseptual RGTT200KT dengan siklus Brayton tak langsung ini, sesuai dengan teori termodinamika akan mempunyai EUF yang lebih rendah daripada siklus Brayton langsung, fenomena ini dapat dilihat dengan mengamati Diagram T-S (Gambar 5). Diagram ini juga menunjukkan bahwa proses kompresi dan ekspansi berlangsung tidak secara isentropis (mendekati proses nyata/riil).

Analisis neraca massa dan energi selain menghasilkan data kondisi di semua titik penting (nodal) pada diagram alir Gambar 4, juga menghasilkan distribusi pembagian energi pada tiga sistem kogenerasi yang dikopel padanya (HX produksi hidrogen, HX desalinasi dan turbin gas). Berikut ini secara berturut-turut adalah tabel sifat-sifat penting dari turbin gas, kompresor, perangkat produksi hidrogen dan desalinasi.

Tabel 2. Karakteristika Komponen Sistem

| Parameter | Satuan | Nilai |
|----------------------------------|--------|--------|
| TURBIN | | |
| - Daya poros | MW | 96,29 |
| - Efisiensi isentropis | % | 97,0 |
| - Laju aliran massa | kg/det | 88,58 |
| - Rasio tekanan | - | 1,75 |
| KOMPRESOR | | |
| - Daya poros | MW | -35,25 |
| - Laju penambahan panas | kJ/kg | 135,2 |
| - Laju aliran massa | Kg/det | 88,58 |
| - Rasio tekanan | - | 1,70 |
| PERANGKAT PROD. H2 | | |
| - Penurunan tekanan | MPa | -0,05 |
| - Daya termal | MW | 62,92 |
| - Laju aliran massa | kg/det | 36,24 |
| - LMTD HX | °C | 103,6 |
| PERANGKAT DESALINASI | | |
| - Energi termal | MW | 97,67 |
| - Laju aliran massa | kg/det | 88,58 |
| - Laju pemanfaatan energi termal | kJ/kg | 1,103 |
| - Penurunan tekanan | MPa | 0,05 |

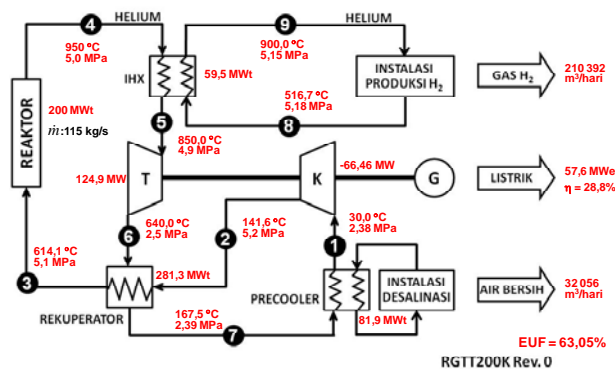
Tabel 3. Distribusi energi siklus

| Komponen | Daya, MW | Keterangan |
|---------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| Untai A (Untai primer) | | |
| - Reaktor | 200,00 | |
| - Blower | 8,64 | Daya dari G1 |
| - IHX | 208,60 | |
| Untai B (Untai sekunder) | | |
| - IHX | 208,60 | |
| - HX | 61,90 | |
| - Turbin - Kompresor | $96,29 - 35,25 = 61,04$ | $\eta_{\text{Generator}} = 98,5\%$ |
| - Daya G1 dan G2 | $-8,64 - 1,01 = -9,64$ | |
| - Listrik | $61,04 \times 0,985 - 9,64 = 50,48$ | $\eta_{\text{Generator}} = 98,5\%$ |
| - Perangkat desalinasi | 97,67 | |
| Untai C | | |
| - HX | 61,90 | |
| - Sirkulator | 1,01 | Daya dari G2 |
| - Perangkat produksi H2 | 62,92 | |

Sistem RGTT200KT akan menghasilkan energi listrik sebesar $61,04 \times 0,986 = 60,19$ MWe. Daya listrik ini akan digunakan sebagian untuk memasok energi ke Blower 8,64 MW dan ke Sirkulator 1,01 MW, dengan demikian daya listrik neto yang dihasilkan oleh sistem adalah sebesar

60,19 – 8,64 – 1,01 = 50,54 MWe. Efisiensi termodinamika siklus RGTT200KT adalah $50,54/200 \times 100\% = 25,27\%$. Dalam perhitungan desain konseptual ini, efisiensi Blower dan sirkulator diasumsikan 100% sehingga seluruh energi yang diterimanya dari luar (G1 dan G2 pada gambar diagram alir RGTT200KT) ditransformasikan ke fluida kerja pada untai A (8,64 MW) dan pada untai C (1,01 MW). Efisiensi termodinamika RGTT200KT lebih kecil 3,73% apabila dibandingkan dengan RGTT200K (29%)^[6].

Pada perangkat produksi gas hidrogen, efisiensi termal tertinggi dari perangkat adalah 52% dan perangkat desalinasi adalah 45%^[6]. Dengan demikian energi yang dimanfaatkan oleh perangkat produksi gas hidrogen adalah $62,92 \times 52\% = 32,72$ MW. Energi ini akan menghasilkan gas hidrogen sebanyak $32,72 \text{ MW} \times 6800 \text{ (Nm}^3\text{/hari)/MW} = 222.496 \text{ Nm}^3\text{/hari}$. Perangkat desalinasi akan memanfaatkan energi panas sebesar $97,67 \times 45\% = 43,95$ MW. Energi ini akan mampu menghasilkan air bersih sebanyak $43,95 \text{ MW} \times 870 \text{ (ton/hari)/MW} = 38.327 \text{ ton/hari}$. Total energi neto yang dapat bermanfaat dari sistem RGTT200KT adalah $(50,54 + 37,72 + 43,95) = 127,21$ MW, dan energi yang dibuang ke lingkungan (karena inefisiensi turbin-kompresor, proses produksi hidrogen dan desalinasi) adalah $200 - 127,21 = 72,79$ MW, atau dengan kata lain sistem RGTT200KT akan mempunyai Faktor Pemanfaatan Energi (*Energy Utilization Factor, EUF*) sebesar $127,21 / 200 = 63,6\%$.



Gambar 6. Desain RGTT200K^[6], sebagai acuan

Litbang ini menghasilkan suatu desain konseptual reaktor gas temperatur tinggi dengan siklus Brayton tak langsung, yaitu RGTT200KT. Sistem ini cukup unik, karena baik pada untai pendingin primer maupun sekunder digunakan gas helium. Desain RGTT siklus tak langsung lain yang ada di Dunia (seperti HTR-PM China, dan PBMR Afrika Selatan) menggunakan pendingin air pada untai keduanya, sehingga siklus termodinamika yang digunakan adalah kombinasi siklus Brayton dan Rankine.

Efisiensi daya RGTT200KT lebih rendah dari RGTT200K yang ditunjukkan dalam Gambar 6, sedangkan faktor pemanfaatan energi RGTT200KT sebesar 63,6% sedikit lebih baik dari RGTT200K, yaitu 63,05%^[6]. Secara teoritis efisiensi daya (termodinamika) dan EUF sistem siklus tak langsung RGTT200KT akan lebih rendah dari sistem siklus langsung RGTT200K. Mengenai fakta yang ada dari hasil litbang ini, bahwa ternyata siklus Brayton tak langsung dapat mempunyai

EUF yang sedikit lebih tinggi dari siklus Brayton langsung, kemungkinan disebabkan oleh karena perhitungan desain RGTT200K yang belum optimal. Perlu dicatat bahwa perhitungan desain RGTT200K dilakukan dengan tanpa menggunakan kode komputer^[6].

4. KESIMPULAN

Dalam litbang ini telah dilakukan pengembangan desain konseptual sistem reaktor gas temperatur tinggi 200 MWt untuk kogenerasi dengan siklus Brayton tak langsung yang diberi nama RGTT200KT. Sistem kogenerasi yang diterapkan pada RGTT200KT adalah produksi hidrogen, pembangkitan listrik dan desalinasi. Energi termal sistem RGTT200KT dipasok oleh reaktor nuklir tipe VHTR dengan daya termal 200 MWt. Distribusi daya dari masing-masing proses pasokan energi adalah 62,92 MWt untuk produksi hidrogen, 50,54 MWe untuk pembangkitan listrik, dan 97,67 MWt untuk desalinasi. Desain konseptual siklus kogenerasi RGTT200KT mempunyai efisiensi termal (untuk pembangkitan listrik) 25,27% dan faktor utilisasi energi (*energy utilization factor*, EUF) 63,6%. Dengan demikian 72,79 MW dari 200 MWt energi panas yang dibangkitkan dalam reaktor dibuang ke lingkungan. RGTT200KT akan mampu menghasilkan gas hidrogen 222.496 Nm³/hari dan air bersih dari proses desalinasi sebanyak 38.327 ton/hari.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Anonim, "*Rencana Pembangunan Jangka Panjang Nasional*", Undang-Undang RI Nomor 17 Tahun 2007.
- [2]. Anonim, "*Energi*", Undang Undang RI Nomor 30 tahun 2007.
- [3]. Anonim, "*Kebijakan Energi Nasional*", Peraturan Presiden RI Nomor 5 Tahun 2006.
- [4]. Anonim, "*Buku Putih Penelitian, Pengembangan, dan Penerapan Iptek 2005-2025 – Bidang Teknologi Energi*", Edisi Revisi 2010, Kementrian Riset dan Teknologi, 2010.
- [5]. Anonim, "*Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional 2010-2014*", Peraturan Presiden RI Nomor 5 Tahun 2010.
- [6]. M. Dhandhang Purwadi, "*Desain Konseptual Sistem Reaktor Daya Maju Kogenerasi Berbasis RGTT*", Proseding Seminar TKPFN-16 Surabaya, 2010.
- [7]. Lohnert, G.H., et.al., "*The Fuel Element of The HTR-Modul, A Prerequisite of Inherently Safe Reactor*", Nuclear Engineering Design 109(1988), 257-263, North-Holland, Amsterdam, 1988.
- [8]. Cogliati J.J., Ougouag A.M., Ortensi J., "*Survey of Dust Production in Pebble Bed Reactors Cores*", Nucl. Eng. Des. (2011), doi:10.1016/j.nucengdes.2011.03.023.
- [9]. Cogliati J.J. and Ougouag A.M., "*Pebble Bed Reactor Dust Production Model*", Proceed. Of the 4th International Topical Meeting on HTR Technology, September 2008, Washington, DC, USA.
- [10]. C. Wu, "*Intelligent Computer Aided Optimization of Power and Energy Systems*", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A (Power and Energy) Vol 213 No.1, 1999.

- [11]. C. Wu and M.A. Carr, “*Intelligent Computer-aided Design Optimization of Heat Pumps*”, Journal of the International Society for Structural and Multidisciplinary Optimimization (ISSMO) Springer-Verlag 24, 457-463, 2003.
- [12]. C. Wu, “*Intelligent Computer-aided Simulation, Design and Improvement of Heat Pumps*”, Transaction of The Society for Modeling and Simulation International, Simulation Vol.74, No.1, p18-27, 2000.
- [13]. S. Bhattacharyya, “*Examining Stage Enhancements for Thermodynamic Cycles to Improve Performance Using an Intelligent Instruction Software*”, Int. J. Engng. Ed. Vol. 16, No. 4, p340-350, 2000.
- [14]. H. Ai, R. Kumar, D. Nguyen, et.al., “*Exploring the Effectiveness of Social Capabilities and Goal Alignment in Computer Supported Collaborative Learning*”, Proceeding of 10th International Conference in Intelligent Tutoring System, ITS 2010 Part II, LNCS 6095 p134-143, USA, June 2010, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010.
- [15]. Horlock, J. H., “*Advanced Gas Turbine Cycles*”, Pergamon, Amsterdam, 2003.
- [16]. 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.

DISKUSI/TANYA-JAWAB:

1. PERTANYAAN: (Suroso, PTRKN-BATAN)

- Mohon penjelasan, mengapa dipilih daya 200 MWt ?.

JAWABAN: (M. Dhandhang P., PTRKN-BATAN)

- Daya termal reaktor RGTT disesuaikan dengan kapasitas grid listrik di propinsi luar Jawa, yang mana hanya membutuhkan daya listrik 40-80 MWe. Daya reaktor RGTT 200MWt ini dapat menghasilkan daya listrik pada kisaran 40-80MWe.

2. PERTANYAAN: (Sukmanto Dibyo, PTRKN-BATAN)

- Dalam *flowsheet* ini, apakah dalam perhitungan neraca massa dan energi semua proses dianggap adiabatik? Adakah *heat loss* tiap komponennya?. Mohon penjelasan.

JAWABAN: (M. Dhandhang P., PTRKN-BATAN)

- Hanya komponen turbin aja yang dalam perhitungan konseptual ini dianggap adiabatik. Selain turbin *heat loss* komponen diperhitungkan. Anggapan turbin adiabatik diambil agar dalam perhitungan dapat diperoleh daya turbin maksimum.