

TINJAUAN TENTANG PEMUNGSIAN SISTEM COGENERATION DENGAN HTGR

Martias Nurdin (*), Robert Manurung dan Saswinadi Sasmojo (**).
(*) Pusat Penelitian Teknik Nuklir - Badan Tenaga Atom Nasional
(**) Pusat Penelitian Energi - Institut Teknologi Bandung.

ABSTRAK

TINJAUAN TENTANG PEMFUNGSIAN SISTEM COGENERATION DENGAN HTGR. Pemfungsian sistem kogenerasi (cogeneration) dengan HTGR (High Temperature Gas Cooled Reactor) merupakan salah satu alur pendekatan yang dapat dipertimbangkan dalam memanfaatkan energi nuklir, sebagai bagian dari sistem penyediaan energi di Indonesia. Pokok-pokok bahasan mencakup: uraian tentang sistem kogenerasi pada umumnya, ulasan tentang HTGR dan perkembangannya, serta segi-segi yang menarik dalam memfungsikan kogenerasi dengan HTGR sebagai penyedia energi primernya. Kesimpulan yang dikemukakan adalah bahwa dalam mempertimbangkan pemanfaatan nuklir sebagai bagian dari sistem penyedia energi masa depan di Indonesia, sistem kogenerasi HTGR mempunyai beberapa segi yang menarik ditinjau dari hukum termodinamika kedua dan konversi sumber daya energi, serta dalam memilih alur upaya untuk pemanfaatan dan penguasaan teknologi di bidang energi nuklir.

ABSTRACT

This paper reviewed the utilization of cogeneration system using HTGR, as an alternative way to employ nuclear energy as apart of energy supply in Indonesia. The basic discription covers cogeneration and HTGR systems, their development and some interesting aspects in utilizing that system as primary energy supply. In considering nuclear utilization as a part in the future energy supply in Indonesia, cogeneration with HTGR system has some advantageous aspects particularly if it is related to the second thermodynamic law, energy resources conservation and the effort to utilize and to manage nuclear technology.

PENDAHULUAN

Diversifikasi energi merupakan langkah-langkah dalam menghadapi kelangkaan bentuk energi. Cadangan minyak dan gas bumi di Indonesia tidaklah besar. Bila ekspor minyak dipertahankan, diperkirakan sekitar tahun 2000 Indonesia perlu mengimpor minyak guna memenuhi kebutuhan tambahan akan bahan bakar cair ini. Bila hal ini terjadi, minyak tidak lagi merupakan sumber devisa yang penting. Bahkan sebaliknya, untuk menambah minyak diperlukan devisa.

Walau saat ini minyak dan gas bumi merupakan dua sumber energi yang dominan, tetapi untuk kurun waktu jangka panjang batu bara dapat dipastikan akan mendominasi kembali. Padahal eksploitasi/ penggunaan bahan bakar padat ini akan menimbulkan pencemaran lingkungan, polusi gas SO₂ dan NO_x serta debu pembakarannya. Bila kebutuhan energi (listrik) di Pulau Jawa akan dipenuhi dari batu bara dengan teknologi konversi yang diterapkan saat ini, dampak negatif yang timbul akan cukup besar. Gejala-gejalanya sudah pernah dialami oleh negara-negara yang mempunyai sumber energi lebih miskin dari Indonesia, misalnya negara-negara di Eropa dan negara maju

pada umumnya. Negara-negara tersebut kemudian memilih energi nuklir guna memenuhi kebutuhan energi mereka.

Kontribusi energi nuklir pada pelistrikan di negara-negara tersebut telah mencapai 70-75% untuk Perancis; sekitar 70% untuk Belgia; sekitar 50% untuk Honggaria, Swedia dan Korea Selatan; sekitar 35% untuk Finlandia, Spanyol, Bulgaria dan Jerman Barat; sekitar 30% untuk Jepang dan Cekoslovakia; serta sekitar 20% untuk Amerika Serikat.

Dengan penggunaannya yang sudah tersebar luas dan intensif tersebut, teknologi nuklir sudah semakin terang. Dan kerjasama regional dan internasional telah membantu perbaikan dan penyempurnaanannya, mulai dari komponen sampai dengan sub-sistem dan bahkan cara pengoperasiannya. Sehingga tenaga nuklir (sebagai salah satu sumber energi di sekitar tahun 2000-an) akan dapat menjadi salah satu pilihan dalam usaha memenuhi kebutuhan energi secara nasional.

Sebagaimana diungkapkan di atas, mengingat potensinya yang besar, maka batu bara akan memegang peranan penting pada masa

mendatang. Di samping faktor dampak terhadap lingkungan, era batu bara yang akan datang akan berbeda dari era sebelum minyak dan gas bumi. Perjalanan dan kebiasaan menggunakan minyak dan gas bumi akan memacu kecenderungan untuk mengubah batu bara menjadi bahan yang berupa gas atau cairan. Untuk itu teknologi tentang gasifikasi batu bara memainkan peran kunci.

Dari uraian-uraian di atas, maka diusulkan bahwa pemenuhan energi dari tenaga nuklir dilaksanakan dengan sistem HTGR. Sistem HTGR ini di samping menghasilkan listrik juga menghasilkan uap (gas) yang bertemperatur tinggi. Uap tersebut dapat dimanfaatkan sebagai proses panas untuk berbagai proses, diantaranya gasifikasi batu bara, *liquifaction* batu bara, dan *oil recovery*. Makalah ini mengkaji proses gasifikasi batubara yang direalisasikan dengan memfungsikan kogenerasi melalui pemanfaatan energi dari HTGR.

Dari kerangka pemikiran di atas, pokok-pokok yang dibahas adalah sebagai berikut:

- Tinjauan tentang teknologi dan penggunaan berbagai bahan bakar untuk tujuan kogenerasi.
- Tinjauan tentang perkembangan HTGR, penampilan keselamatan operasi HTGR dan jalur daur bahan bakar, serta prospek dan status HTGR.
- Pembahasan tentang prospek HTGR untuk tujuan kogenerasi.

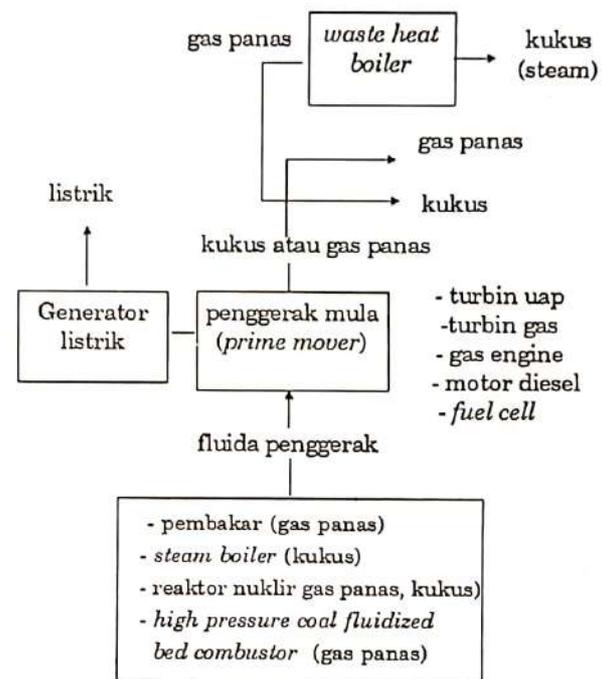
TEKNOLOGI DAN PENGGUNAAN BERBAGAI BAHAN BAKAR UNTUK TUJUAN KOGENERASI

Pengertian umum dari kogenerasi adalah menyatakan suatu proses konversi bagi suatu sumber energi kimiawi atau nuklir yang sekaligus menghasilkan energi listrik dan panas untuk tujuan pemanfaatan keduanya. Panas yang dihasilkan dapat berupa kukus (steam) ataupun cairan lain yang bersuhu tinggi. Bila suhu dan tekanan dari kukus atau cairan panas ini cukup memadai untuk menggerakkan mesin panas lain (turbin) guna menggerakkan generator listrik dan kemudian menghasilkan listrik, maka prosesnya disebut *combined cycle*. Tetapi pembahasan dalam makalah ini hanya ditujukan pada kogenerasi.

Skema umum untuk sistem kogenerasi ini ditunjukkan pada gambar 1.

Gambar 1. menunjukkan bahwa terdapat banyak konfigurasi teknologikal yang dapat untuk mengimplementasikan suatu sistem kogenerasi, yang pada dasarnya ditentukan oleh:

- a. Jenis sumber energi primernya (biomassa, batu bara, bahan bakar minyak, gas, bahan bakar nuklir).
- b. Jenis penggerak mulanya (motor diesel, motor gas, turbin uap, turbin gas, fuel sel, dan sebagainya).
- c. Perbandingan antara listrik dan panas yang diperlukan (diesel memberikan ratio tertinggi sedang turbin uap terendah).
- d. Bentuk energi panas yang dihasilkan (kukus, gas panas).



Gambar 1. Skema umum garis besar suatu sistem cogeneration

Ditinjau dari jenis bahan bakar atau sumber energi primer yang digunakan, terdapat berbagai pilihan: batu bara, gas bumi, bahan bakar minyak, biomassa, gas H₂, gas CO, elemen bakar dari bahan radioaktif, dsb.

Satu hal yang mencolok tentang kogenerasi ini sebagaimana terlihat pada gambar 1. adalah bahwa suatu media pembawa energi di dalam pemakaiannya untuk menghasilkan energi yang dapat dimanfaatkan, dilakukan serangkaian proses agar energi yang terkandung tersebut sebanyak mungkin dapat dimanfaatkan. Dengan demikian melalui cara kogenerasi tersebut dapat diperoleh penghematan bahan bakar yang sangat berarti. Tabel 1 menunjukkan perbandingan konversi bahan bakar antara yang melalui proses-proses yang

Tabel 1. Perbandingan beberapa karakteristik performansi pembangkitan listrik dan uap dengan berbagai cara ^(a). (diambil dari WILLIAMS, 1979)

	Sistem pembangkit listrik terpusatkan	Sistem penghasil uap ^(b)	Sistem Cogeneration			
			Turbin uap ^(c)	Turbin gas ^(d)	Turbin gas/uap ^(e)	Mesin diesel
1. Rasio listrik/ uap	-	-	0.24	0.65	1.1	1.3
2. efisiensi Hk. I Thermodinamika	0.33	0.88	0.85	0.75	0.69	0.62
3. efisiensi Hk. II Thermodinamika	0.34	0.27	0.39	0.49	0.48	0.62
4. Penghematan bahan bakar ^(g)	-	-	0.38	0.85	1.31	1.24
5. Indeks harga produk (listrik dan kukus) dalam dolar per juta BTU bahan bakar yang dikonsumsi ^(h) :						
L rendah/ K rendah	2.1	1.3	1.9	2.4	2.6	2.5
L rendah/ K tinggi	2.1	2.2	2.6	2.9	2.9	2.7
L tinggi/ K rendah	3.2	1.3	2.4	3.3	3.7	3.5
L tinggi/ K tinggi	3.2	2.2	3.1	3.7	4.0	3.8

bukan kogenerasi dengan proses-proses kogenerasi, dan dapat dilihat adanya penghematan yang sangat berarti pada proses kogenerasi.

Catatan :

- (a) Data berdasar penggunaan bahan bakar distilat minyak No.2.
- (b) Kukus jenuh proses pada 50 psig.
- (c) Untuk turbin uap *back pressure* mengkonversi 16 % bahan bakar yang dikonsumsi menjadi listrik dan menghasilkan kukus 50 psig sebagai proses panas termal.
- (d) Berdasar pada turbin Gas General Elektrik 65.95 Mw (e), dengan produk samping kukus 265 psig di WHB.
- (e) Berdasar pada kombinasi turbin gas/uap general elektrik 80.35 Mw (e), yang menghasilkan kukus 50 psig sebagai proses termal.
- (f) Mesin diesel yang mengkonversi 35% bahan bakar menjadi energi listrik dengan produk samping kukus 50 psig di WHB.
- (g) Penghematan bahan bakar yang didasarkan pada bahan bakar yang dihemat, yaitu melalui penggantian pembangkit listrik dari sistem terpusatkan per satuan energi proses kukus.

- (h) Ratio L/K yang tinggi menghasilkan nilai produk yang lebih tinggi dibanding ratio L/K yang rendah, karena listrik merupakan bentuk energi dengan kualitas yang lebih tinggi (lebih bernilai guna) dibanding kukus, bertekanan rendah, dan perbandingan harga listrik (rendah dan tinggi masing-masing adalah 0.02 \$ US dan 0.03 \$ US per kWh, atau \$ 5.90 dan \$ 8.80 per juta BTU) dan harga kukus (rendah dan tinggi masing-masing \$ 1.50 dan \$ 2.50 per juta BTU).

Pada tabel 2 ditunjukkan parameter operasi HTGR-900 (yaitu salah satu contoh disain HTGR komersial di Jerman Barat) untuk pengoperasian yang menghasilkan listrik saja serta bila dihasilkan listrik dan kukus untuk proses panas.

Dari tabel 2 terlihat bahwa usaha pemanfaatan kukus dari energi termal yang tersedia akan mengurangi potensi listrik yang dapat dibangkitkan, sehingga efisiensi secara keseluruhan akan menghasilkan listrik hanya sekitar 40 %. Sedang apabila kukus yang dihasilkan dimanfaatkan kembali, efisiensi energi total dapat mencapai 57 %.

Tabel 2. Parameter operasi HTGR-900 yang memberikan keluaran listrik dan uap panas

Daya energi termal	: 2250 MWt
Daya energi listrik (<i>netto</i>)	: 892 MWe tanpa produk kukus 672 MWe dengan produk kukus
Kukus yang dihasilkan pada dua tingkat	: 1. Kondisi uap 9 MPa/ 420°C laju aliran 142,2 kg/ second
	: 2. Kondisi uap 4 MPa/ 360°C laju aliran 59,4 kg/ second
Efisiensi (tanpa <i>cogeneration</i>)	: 39,6%
Efisiensi (dengan <i>cogeneration</i>)	: 57,4 %
Tekanan helium	: 6,5 MPa
Temperatur helium di teras reaktor	: 284/ 700°C
Laju alir helium	: 1041 kg/ s
Kondisi uap pada outlet generator	: 19 MPa/ 53°C
Temperatur umpan air	: 200°C

REAKTOR DENGAN PENDINGIN GAS BERTEMPERATUR TINGGI (HTGR)

Reaktor dengan pendingin gas bertemperatur tinggi (High Temperature Gas Cooler Reactor, HTGR) merupakan generasi lanjutan dari reaktor-reaktor gas tipe MAGNOX dan AGR di Inggris, UNGG di Perancis dan Peach BOTTOM di USA. Reaktor gas generasi pertama itu dikembangkan sejak tahun 1950-an. Pengembangan serupa di USSR, Jerman Barat, Swiss dan Jepang.

Pengembangan di banyak negara didasarkan pada konsep teras reaktor (fuel assembly) yang hampir sama, tetapi di Jerman Barat prototip HTGR yang disebut AVR (13 MW) bahan bakarnya berupa bola-bola yang berlapis bahan pencegah keluarnya gas hasil fisi (pebble bed reactor). Reaktor AVR 13 MW telah dikembangkan dan menghasilkan sebuah HTGR prototip berskala komersil, yaitu THTR 300.

Generasi selanjutnya dari HTGR tersebut diatas adalah *Gas Cooled Breeder Reactor*, suatu jenis reaktor pembiak yang beroperasi dengan neutron termis. Konsepsi pengembangannya sudah dimulai sejak tahun 1970-an, baik di Eropa begitu pula di Amerika.

Penampilan keselamatan operasi HTGR

High Temperatur Gas Cooled reactor Peach Bottom dan *Forth St. Vrain* telah dioperasikan di Amerika, masing-masingnya sejak tahun 1960-an dan 1970-an. HTGR Pebble bed, AVR 15 MW dan THTR 300 telah pula dioperasikan di Jerman Barat sejak tahun 1968 dan tahun 1986. Kondisi-kondisi operasi AVR, THTR dan Peach Bottom ditunjukkan pada tabel 3 dan 4.

Tabel 3. Kondisi operasi AVR dan THTR

	AVR	THTR 300
Daya panas (MWth)	46	700
Daya listrik <i>netto</i> (MWe)	13	300
Tekanan gas helium	1,09 MPa	3,9 MPa
Temp. keluar helium	950°C	750°C
Temperatur superheated	550°C	550/ 535°C

Tabel 4. Kondisi operasi Peach Bottom

Daya panas (MWt)	115 MW (th)
Daya listrik <i>netto</i> (MWe)	40 MWe
Efisiensi <i>netto</i>	34,6%
Temp. masuk helium	344°C
Temp. keluar helium	738°C
Tekanan	2,4 MPa
Steam temperatur	538°C
Tekanan uap	10,0 MPa

PLTN HTGR di Amerika telah menunjukkan penampilan keselamatan operasi yang sangat baik, di mana dosis tahunan untuk para pekerja hanya sekitar 3 man-rem pada PLTN-PLTN air ringan (LWR?).

THTR 300 di Jerman Barat juga telah memberikan harapan baru, seperti terlihat dari penampilan buangan dari reaktor yang diringkas pada tabel 5.

Tabel 5. Data pembuangan gas bahan radioaktif dari THTR 300

BAHAN GAS	Aktifitas paparan sebagai prosentase (%) harga yang diizinkan.	
	1986	1987
Noble gas	0.05	0.02
Aerosols	42.3	11.2
I-131	1.6	4.1
Carbon	0.54	0.62
Tritium	15.3	56.2
BAHAN CAIR		
Produk aktivasi	0.04	0.05
Tritium	3.1	9.1

Di samping karakteristik keselamatan (penampilan) yang baik, pada kecelakaan hipotetis dengan paparan radioaktif yang begitu rendah maka evakuasi penduduk yang berada disekitar PLTN tidak diperlukan.

Dari konsepsi bahan bakar khususnya dan teras reaktor pada umumnya, disain THTR ini mempunyai *inherent safety* berikut:

- koefisien temperatur yang negatif berperan dalam menjaga stabilitas operasi dan mencegah peningkatan daya secara otomatis
- bahan teras dan bahan bakar yang berupa keramik mampu menahan temperatur tinggi dan pelelehan pada teras
- ratio yang rendah dari densitas daya terhadap kapasitas panas, menyebabkan kenaikan temperatur dengan lambat bila terjadi kecelakaan
- media pendingin menggunakan gas mulia (helium).

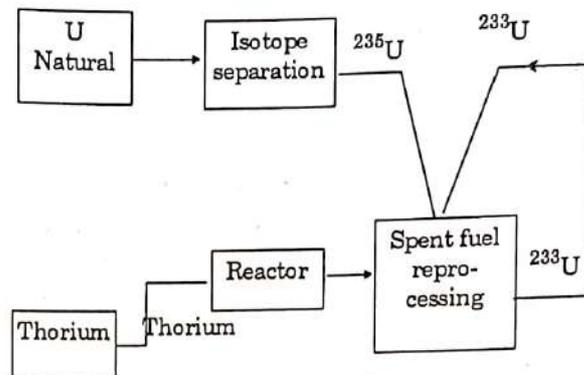
Jadi disamping *engineered safety features*, THTR 300 dan HTGR pada umumnya mempunyai pula *inherent safety features* yang baik.

Jalur Daur Bahan Bakar

HTGR pada awal pengoperasiannya bisa menggunakan bahan fisil ^{235}U dan bahan fertil ^{232}Th , bahkan dapat pula memakai bahan fisil ^{233}U (setelah ada cadangan ^{233}U) dan bahan fertil ^{232}Th .

Bahan Fisil ^{235}U bisa diperoleh dari proses pengkayaan yang sudah komersil dewasa ini, sedangkan ^{233}U yang tidak tersedia secara alamiah bisa diperoleh dari reaksi nuklir melalui penembakan sebuah neutron kepada ^{232}Th yang akan memberikan inti baru, yaitu ^{233}U .

Jalur-jalur yang dimaksud ditunjukkan secara sederhana pada gambar 2.



Gambar 2. Jalur daur bahan bakar pada awal pengoperasian HTGR

Bahan fisil ^{233}U yang diperoleh dari bahan bakar tersebut mempunyai karakteristik untuk dipakai pada reaktor termis dan reaktor cepat. Berbeda dengan bahan fisil ^{239}Pu , yang lebih baik dipakai untuk reaktor pembiak cepat. Dengan sifat ini konsep HTGR bisa dilanjutkan pada reaktor pembiak termis (Gas Cooled Breeder Reactor), dan konsep ini sudah pula dikaji sejak 1970-an yang akhirnya ke *Liquid Metal Fast Breeder Reactor*.

Status dan prospek HTGR

Prospek HTGR:

Dari segi kinerja operasi, HTGR yang dioperasikan baik di Amerika maupun di Jerman Barat memperlihatkan keluaran gas dan cairan-cairan mengandung keradioaktifan rendah. Begitu juga HTGR mempunyai karakteristik *inherent safety* yang baik dan tidak perlu pemindahan penduduk walaupun terjadi kecelakaan hipotetis. Maka pemilihan lokasi untuk HTGR ini lebih mudah dan ekonomis (bisa dekat daerah industri atau dekat pemukiman). Dari segi bahan bakar terlihat bahwa dengan digunakannya bahan fisil ^{233}U (hasil reaksi tangkapan neutron oleh inti ^{232}Th) dan bahan fertil Thorium, maka pengaruh kenaikan harga Uranium tidak berakibat pada *fueling cost* dari HTGR (karena ketersediaan thorium lebih berlimpah dibanding dengan uranium).

Jalur ^{233}U ke ^{232}Th di dalam reaktor termis dan reaktor cepat, adalah sangat baik. Pada reaktor termis akan memberikan faktor konversi yang tinggi dan konsep HTGR bisa dilanjutkan untuk memperoleh *breeder thermis* di kemudian hari.

Generasi HTGR mendatang yang berupa GCBR (Gas Cooled Breeder Reactor) merupakan

pengembangan teknologi yang wajar dan mudah, berbeda dengan jalur LWR \longrightarrow LMFBR.

Jalur ^{233}U ke ^{232}Th pada saat *Fast Breeder Reactor* (LMFBR) memberikan karakteristik keselamatan reaktor yang baik, yaitu koefisien temperatur sodium negatif dan pada jalur ^{239}Pu ke ^{238}U , koefisien temperatur sodium adalah positif.

Status Pengembangan HTGR:

HTGR di Inggris terhenti dengan masuknya PLTN PWR dalam pelistrikan nasional. Hal yang sama juga terjadi di Perancis, dan bahkan kajian akan GCBR juga tidak punya kelanjutan yang jelas.

Pengembangan PLTN *Peach Bottom* di Amerika menghasilkan HTGR Fort St. Vrain berdaya 360 MW. Dewasa ini operasi Fort St. Vrain mengalami kesukaran, namun General Atomic yang mengembangkan reaktor itu telah mendapatkan pesanan reaktor yang sejenis dari Departemen Pertahanan Amerika untuk maksud-maksud militer. Keadaan sebaliknya yang berlangsung menggembarakan dan memberi harapan yaitu di Jerman Barat, dengan berhasilnya pengoperasian dan penguasaan teknologi prototip HTGR-AVR. Realisasi THTR 300 dengan daya 300 MW telah dimungkinkan, dengan penampilan operasi yang sangat memuaskan sebagaimana telah dikemukakan pada bagian terdahulu.

Suksesnya AVR 13 MW dan THTR 300 telah menghasilkan pengembangan HTGR lebih lanjut di Jerman Barat, di mana ada konsep HTGR dari B.B, H.R.B dan konsep Interatom-KWU.

THTR 300 telah dilanjutkan oleh B.B yang bekerja sama dengan Swiss dalam merealisasikan THTR 500. Dan konsep ini juga telah dijadikan dasar kerjasama di bidang per PLTN-an antara Jerman Barat dengan USSR.

Konsep modular yang dikembangkan Interatom-KWU telah mendapat pasaran di RRC, di mana prototip dengan daya 10 MW akan dibangun disana.

PEMBAHASAN TENTANG PROSPEK PEMFUNGSIAN SISTEM KOGENERASI DENGAN HTGR.

Mengingat banyaknya pilihan untuk melakukan kogenerasi, sebagaimana diuraikan di bagian 2, maka didalam menelaah prospek pengoperasian HTGR untuk tujuan kogenerasi yang secara khusus untuk proses gasifikasi sebagaimana akan dibahas disini, beberapa pokok pertanyaan berikut perlu dijawab:

- Pilihan apa saja tersedia untuk melakukan kogenerasi dengan HTGR sebagai sumber penghasil pulsa ?
- Mengapa gasifikasi batubara perlu dengan kogenerasi ?

Di samping hal-hal yang bersifat teknis ataupun mempunyai implikasi ekonomis di atas, dalam membahas prospek pemanfaatan HTGR untuk tujuan kogenerasi ini perlu juga ditelaah kendala-kendala yang ada, atau perlu diatasi dalam mengimplementasikan kogenerasi yang menggunakan sumber energi dari HTGR, maupun faktor-faktor yang mendorong terbukanya kesempatan berkembangnya kogenerasi. Berikut ini masalah-masalah tersebut akan dibahas secara berurutan.

Memilih teknologi kogenerasi dengan HTGR sebagai sumber energi.

Sebagaimana telah disampaikan sebelumnya, bahwa kogenerasi menyatakan suatu proses konversi suatu sumber energi kimiawi atau nuklir yang menghasilkan listrik dan panas untuk tujuan pemanfaatan keduanya.

Pelaksanaan kogenerasi ditempuh melalui salah satu dari cara berikut:

- Memanfaatkan energi panas yang dihasilkan oleh sistem pembangkit (listrik atau mekanis) yang dikenal dengan *topping cycle*.
- Membangkitkan tenaga dengan memanfaatkan fluida bersuhu tinggi yang terlepas dari suatu proses yang dikenal dengan *bottoming cycle*.

Dalam kaitan usaha pemfungsian kogenerasi dengan reaktor nuklir bersuhu tinggi (HTGR), ada beberapa pilihan teknologi yang dapat ditempuh.

Pengoperasian turbin uap dengan kukus yang bersumber dari energi HTGR telah banyak digunakan dalam praktek-praktek kogenerasi, seperti sistem HTGR 900 di Jerman Barat (tabel 2.2). Pada sistem ini, media pendingin helium digunakan untuk membangkitkan kukus pada *steam generator*. Tergantung dari produk yang diinginkan, kukus yang dibangkitkan dapat digunakan langsung sebagai proses panas, atau selanjutnya kukus (steam) tersebut digunakan sebagai pembangkit listrik. Bila kukus dari *steam generator* terutama ditujukan sebagai pembangkit listrik, maka kukus keluaran dari turbin uap masih dapat digunakan untuk proses panas. Tetapi bila diinginkan untuk memenuhi persyarat kukus tertentu, sebagian kukus dari *steam generator* dapat di campur dengan kukus keluaran dari turbin.

Pengoperasian turbin gas *closed cycle* dengan medium pendingin helium merupakan sistem yang sedang dan akan dikembangkan untuk kogenerasi dengan HTGR. Listrik dapat dihasilkan dari turbin ini secara langsung menggunakan media pendingin (HTGR) dan gas helium sebagai fluida penggerak. Energi yang masih terkandung dalam gas helium kemudian dapat dimanfaatkan untuk membangkitkan kukus pada suatu *steam generator*. Teknologi ini sebenarnya pernah dipraktikkan di Jerman Barat tetapi berhenti pada tahun 1981 karena ada persoalan dengan turbin.

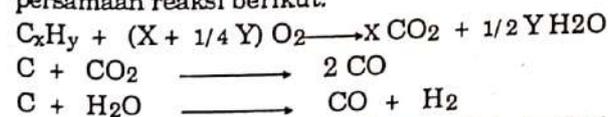
Penggunaan HTGR yang lebih kompleks sebagai sumber energi pada kogenerasi adalah untuk proses gasifikasi batubara. Proses gasifikasi disini merupakan gabungan *bottoming-topping cycle* dari sistem yang telah diuraikan sebelumnya. Kukus bertemperatur tinggi yang diperlukan untuk proses gasifikasi, yang merupakan keluaran dari turbin uap, dipanasi dengan gas helium yang keluar dari HTGR.

Gas helium didinginkan lebih lanjut melalui pembangkitan kukus dalam boiler (*steam generator*), kemudian digunakan untuk membangkitkan listrik dengan turbin uap. Kukus yang keluar dari turbin ini merupakan umpan untuk proses gasifikasi. Pada proses gasifikasi, gas yang dihasilkan dari sintesa ($\text{CO} + \text{H}_2$) pada temperatur yang relative tinggi dimanfaatkan untuk memanaskan umpan air yang masuk pada pembangkitan kukus.

HTGR mempunyai potensi besar untuk diaplikasikan pada kogenerasi dengan gasifikasi batubara, karena efisiensi yang lebih tinggi dan dampak lingkungannya yang lebih rendah. Kogenerasi dengan sumber energi dari HTGR untuk proses gasifikasi ini akan dibahas secara khusus pada bagian berikut. Untuk memilih yang terbaik diantara pilihan yang ada seperti disampaikan di atas, kajian yang lebih luas dan mendalam masih perlu dilakukan.

Proses gasifikasi batubara melalui pemungisian kogenerasi dengan HTGR.

Proses gasifikasi dapat dinyatakan sebagai konversi termal bahan padat menjadi bahan bakar gas, yang secara garis besar berlangsung menurut persamaan reaksi berikut:



Reaksi pertama merupakan reaksi oksidasi eksotermis. Sedang dua reaksi berikutnya adalah reaksi reduksi yang endotermis. Panas yang diperlukan untuk dua reaksi terakhir diperoleh dari reaksi oksidasi reaksi pertama, dan dua reaksi

tersebut hanya akan berlangsung dengan baik bila temperatur sekitar 900°C . Dari ketiga reaksi di atas terlihat bahwa telah berlangsung reaksi pembentukan gas sintesa yang diinginkan, yaitu pembentukan CO dan H_2 dari reaksi kedua dan ketiga. Disamping itu untuk batu bara yang tersusun dari komponen karbon, dan yang dari pembakaran langsung batubara akan menghasilkan gas bakar yang didominasi oleh CO_2 . Produk pembakaran gas sintesa juga akan didominasi CO_2 bila sumber panas untuk proses gasifikasi diandalkan dari reaksi oksidasi karbon.

Masuknya energi dari luar untuk berlangsungnya reaksi (berupa energi panas atau kukus) dapat merubah pola konsumsi sumber karbon dan komposisi produk.

Batu bara adalah sumber hidrokarbon yang penting dan menarik. Dan hal-hal yang membuatnya demikian adalah:

- Selain untuk tujuan sebagai bahan bakar, bila dikonversi akan menjadi bahan bakar gas yang merupakan bahan umpan industri untuk disintesis menjadi bahan-bahan yang sangat bermanfaat (pupuk, polimer, zat pelarut, bahan cair organik pengganti BBM, dan sebagainya).
- Dalam penggunaannya sebagai bahan bakar, hasil bakar gas yang dikonversikan merupakan campuran gas yang relatif bersih dibanding pembakaran langsung bahan bakar lain, seperti: minyak, batubara, biomassa, tar dan SO_2 , karena tidak menghasilkan abu.
- Dibandingkan dengan pembakaran langsung batubara, pembakaran gas hasil gasifikasi batubara dengan kukus menghasilkan emisi CO_2 yang lebih rendah untuk setiap satuan energi panas yang dihasilkan. Hal ini mendapat perhatian besar karena dampaknya terhadap perubahan cuaca diperkirakan akan sangat tidak menguntungkan terhadap kehidupan di bumi.
- Dari sisi ekonomi, tingkat ketersediaan batu bara saat ini jauh lebih besar daripada minyak dan gas bumi.

Mengingat hal-hal tersebut di atas, tampaknya penggunaan gas (hasil gasifikasi) sebagai bahan bakar untuk mesin penggerak adalah sangat menarik, terutama untuk pemakaian instalasi *stationer* (bukan transportasi), seperti pembangkit listrik dengan diesel-generator. Akan tetapi karena luasnya spektrum kemanfaatan gas hasil gasifikasi maka pilihan produksinya harus seefisien dan seefektif mungkin. Sehubungan dengan hal ini, kogenerasi dengan HTGR dapat dipandang

sebagai pilihan proses yang tepat untuk memproduksi gas dari batubara karena:

- a. Kogenerasi merupakan proses yang sangat efisien dan efektif dalam memanfaatkan potensi energi yang terkandung dalam suatu bahan bakar;
- b. Salah satu produk kogenerasi dengan HTGR untuk proses gasifikasi batubara dapat berupa gas sintesa atau energi listrik, suatu bentuk energi yang berkualitas tinggi. Dengan pemilihan teknologi yang tepat, lebih mudah untuk mengkonversi menjadi bahan atau energi lain.

Selain kedua pertimbangan di atas, untuk kasus di Indonesia, kogenerasi dengan HTGR terhadap proses gasifikasi merupakan suatu pilihan yang tepat guna memanfaatkan sumber karbon berkualitas tinggi seperti batubara. Karena proses ini menghasilkan energi listrik yang saat ini merupakan komoditi yang tinggi permintaannya, tetapi dalam hal penyediaannya masih jauh dari memadai.

Kesempatan dan kendala dalam mengimplementasikan kogenerasi dengan HTGR

Merujuk pembahasan pada dua bagian di atas, secara umum dapat disimpulkan bahwa berdasarkan ketersediaan dan efisiensi konversi tinggi, maka kogenerasi dengan HTGR sebagai sumber energi untuk proses gasifikasi batubara dan penggunaan turbin uap adalah merupakan penggerak mula utama yang mempunyai banyak keuntungan. Akan tetapi untuk menilai prospek implementasinya, segi lain yaitu peluang dan kendala yang ada untuk pemfungsian kogenerasi yang memanfaatkan energi nuklir masih perlu ditinjau.

Untuk melihat peluang dan kendala dalam mengimplementasikan kogenerasi, faktor-faktor pertimbangan berikut perlu dikaji lebih lanjut guna mendapatkan gagasan tentang keunggulan atau kekurangan dari pilihan yang ada:

- Tingkat ketersediaan dan keandalan sumber energi yang digunakan;
- Tingkat ancaman terhadap lingkungan hidup;
- Tingkat kemampuan dalam memfungsikan teknologi yang diperlukan;
- Tenggang waktu persiapan, perancangan dan konstruksi;
- Tingkat investasi dan biaya operasi.

Memperhatikan uraian dan kesimpulan di atas dapat dikatakan bahwa untuk faktor pertimbangan yang pertama, pelaksanaan kogenerasi dengan sumber energi dari HTGR mempunyai peluang yang sangat besar untuk kegiatan lain yang memerlukan energi listrik dan proses panas.

Dalam hal keempat faktor berikutnya, berbagai cara pandang dapat dipilih yang dapat menimbulkan "bias" dalam penilaian untuk membandingkannya. Suatu kerangka pendekatan yang tepat diperlukan guna menghasilkan perbandingan yang paling objektif. Belum ada data dan batasan waktu yang memadai guna mengembangkan metode perbandingan ekonomik, agar dapat mencegah tersajikannya pembahasan keempat segi tersebut. Walaupun demikian, karena pemfungsian suatu instalasi sistem kogenerasi berdasarkan batu bara atau nuklir pada umumnya terkait pada suatu industri atau instalasi kegiatan yang memerlukan panas dan listrik pada skala MW, maka sistem ini pada jangka menengah ditunjukkan untuk memenuhi kebutuhan industri, sedang pada jangka panjang saat kelangkaan energi minyak dan gas timbul dapat menjadi primadona pemenuhan kebutuhan energi nasional.

Dari segi peluang, beberapa kemungkinan yang mendukung pemungsiannya sistem kogenerasi dapat diutarakan sebagai berikut:

Ketersediaan energi listrik di Indonesia masih jauh dari mencukupi, sehingga energi listrik merupakan komoditas yang dirasakan tinggi tuntutan permintaannya. Di segi lain dana untuk investasi terbatas. Dengan pemfungsian kogenerasi terbuka kesempatan untuk mengkaitkan pendirian pabrik-pabrik, kompleks industri, ataupun instalasi kegiatan lain yang perlu listrik dan panas/kukus, dengan program penyediaan listrik yang tidak hanya ditujukan bagi pemenuhan kebutuhannya sendiri. Disatu segi dapat diusulkan pengoperasian instalasi *utilities* yang menghasilkan listrik dan kukus untuk melayani suatu kawasan/kompleks industri yang mampu menghasilkan listrik lebih besar dari yang dibutuhkan kawasan industri tersebut. Sisa listrik ini kemudian dijual (langsung atau lewat PLN) ke konsumen lain. Di segi yang lain, dapat diusulkan merancang instalasi *utilities* dari suatu pabrik yang memerlukan listrik dan kukus (seperti pabrik pupuk, kertas, refinery, dsb) sedemikian rupa sehingga kapasitas penyediaan listriknya melebihi kebutuhan pabrik itu sendiri. Kedua pendekatan ini dapat diharapkan akan mengurangi kebutuhan investasi guna penyediaan listrik secara nasional. Lebih lagi untuk jangka panjang, kogenerasi dengan HTGR untuk gasifikasi karbon membuka peluang untuk mendirikan industri yang menghasilkan produk berdasarkan bahan baku yang berasal dari proses kogenerasi itu sendiri, seperti industri pupuk dan industri kimia lainnya.

Akan tetapi peluang-peluang seperti yang dikemukakan di atas juga tidak dengan mudah dapat direalisasikan, karena adanya berbagai kendala. Kendala yang jelas adalah bahwa sistem kogenerasi hanya mungkin difungsikan bila di suatu lokasi terdapat kebutuhan panas/uap, disamping kebutuhan listrik. Dan pada dasarnya tingkat produksi listrik suatu instalasi kogenerasi ditentukan oleh tingkat kebutuhan akan energi panas/steam, bukan sebaliknya. Kendala lain yang lebih besar adalah bahwa saat ini tatanan perundangan, kebijaksanaan dan standar-standar kerja yang ada belum tersedia untuk mengatasi persoalan-persoalan institusional, teknis dan iklim ekonomis bagi kogenerasi.

Beberapa faktor yang perlu ditangani untuk merealisasikan kogenerasi adalah sbb:

- i. Standar peralatan dan operasi kerja yang dapat menjamin keandalan dan kualitas terhadap listrik yang dihasilkan.
- ii. Pengaturan transaksi energi listrik antara kogenerasi dan perusahaan listrik yang dapat saling menguntungkan.
- iii. Pengaturan transaksi jual beli listrik.
- iv. Pengaturan tentang struktur partisipasi penanaman modal dan transaksi keuntungan serta resiko yang terkait dengan hal tersebut.

KESIMPULAN DAN SARAN

1. Sejak beberapa dekade yang lalu, bermacam-macam industri telah berkembang guna memenuhi kebutuhan energi dari minyak dan gas. Dengan demikian dasar dan karakteristik teknologi industri-industri yang dibangun terkait dengan jenis sumber energinya.
2. Kelancaran berfungsinya industri-industri tersebut, baik sekarang maupun pada masa mendatang tentu membutuhkan bahan bakar yang selama ini digunakan. Di lain pihak, karena terbatasnya cadangan minyak dan gas

bumi, yang diperkirakan bahwa untuk memenuhi kebutuhan energi di tahun 2.000 perlu mengimport minyak, maka seyogyanya segala upaya perlu dilakukan agar penyediaan energi tidak menghambat kesinambungan pembangunan.

3. Sumber energi yang masih berlimpah di tanah air kita hingga tahun 2.000 adalah batu bara, tetapi penggunaan batu bara dapat menimbulkan pencemaran udara (gas-gas SO₂, NO_x dan abu hasil pembakaran serta kemungkinan adanya hujan asam). Kebiasaan menggunakan minyak dan gas bumi akan memacu kecenderungan mengubah batu bara menjadi bahan berupa gas atau cairan.
4. Untuk menekan dampak negatif terhadap lingkungan dan memperoleh bahan bakar cair dan/atau gas dari batu bara, dapat dikonversi menjadi bahan bakar cair dan gas melalui *coal liquifaction* dan *coal gasification* dengan menggunakan *heat process* yang dihasilkan oleh sistem PLN HTGR.
5. Dengan terbatasnya cadangan-cadangan minyak dan gas bumi, tetapi mengingat kebutuhan energi itu tetap ada, maka diperlukan suatu kajian yang lebih terinci untuk melihat kemungkinan penggunaan sistem HTGR sebagai salah satu dari sistem nuklir yang dapat dimanfaatkan guna memenuhi kebutuhan energi listrik, bahan bakar gas dan cair melalui pengoperasian HTGR secara tunggal maupun dalam sistem kogenerasi.
6. Tatanan perundangan, kebijaksanaan dan standar kerja untuk mengatasi persoalan institusional, persoalan teknis dan iklim ekonomis yang belum ada ini merupakan kendala yang harus diatasi untuk memungkinkan difungsikannya kogenerasi guna pemanfaatan energi secara optimal.

DAFTAR PUSTAKA

1. Peaceful Uses of Atomic Energy, *Proceedings of the Third International Conference Geneva*, 31 August - 9 September 1964, Volume 5, Nuclear Reactors-I. Gas-Cooled and water-cooled Reactors, Third International Conference on the Peaceful uses of Atomic Engineering.
2. Gas-cooled Reactors with Emphasis on Advanced Systems, Volume 1, *International Atomic Energy Agency*, Vienna, 1976.
3. Status of and Prospects for Gas-cooled Reactors, *International Atomic Energy Agency*, Vienna, 1984.
4. NURDIN, Martias. dan SUBKI, Iyos., (1988), *The acceptance of Advanced Reactor Concept in Indonesia*, National Atomic Energy Agency (BATAN), Presented at the IAEA Technical Committee Meeting on Design Requirements for Future Applications of Advanced Concept in Developing Countries, Vienna-Austria, December 6-9, 1988.

5. KARTASASMITA, Ginandjar., (1989), *Energi di Tahun 2000*, Bahan Penyajian Menteri Pertambangan dan Energi pada Rapat Senat ITB Dalam Rangka Memperingati HUT ke-30, Departemen Pertambangan dan Energi Institut Teknologi Bandung.
6. HARDER, Edwin L., *Fundamental of Energy Production*, John Wiley & Sons, p. 246 - 269.
7. WILLIAM, Robert H. (1979), *Towards a Fuels Policy for Industrial Cogeneration*, in Rocco A. Fazzolare and Craig B. Smith (Ed), *Changing Energy Use Futures*, Vol. IV, Second International Conference on Energy Use Management, October 22-26, 1979, Los Angeles, California, Pergamon Press, p.1476-1490.
8. BOYEN, John L. (1979), *Heat Recovery in Cogeneration Systems*, in Rocco A. Fazzolare and Craig B. Smith (Ed), *Changing Energy Use Futures*, Vol. IV, Second International Conference on Energy Use Management, October 22-26, 1979, Los Angeles, California, Pergamon Press, p. 1563-1578.
9. GYFTOPOULOS, E.P., LAZARIDIS, L.J., WIDMER, T.F. (1974), *Potential Fuel Effectiveness in Industry*, A Report to Energy Policy of the Ford Foundation, Ballinger Publishing Co., Cambridge.
10. IAEA (International Atomic Energy Agency) 1985, Technical Reports Series No. 245, *Energy and Nuclear Power Planning in Developing Countries*, Vienna, p. 371-416.
11. SASMOJO, Saswinadi, and MANURUNG, Robert (1982), *Basic Design Strategies for Energy Conservation in a Chemical Process Plant*, presented at the seminar on Energy Conservation, Direktorat General of Power/JETRO, Jakarta, 18-19 November 1982.
12. LI, Kam W. and PRIDY, A. Paul, *Power Plant System Design*, p. 529-568.
13. EL-WAKIL, M.M., *Power Plant Technology*, Mc. Graw Hill, p. 73-77, 155-157, 340-351.
14. WILLIAMS, R.H. and LARSON E.D (1987), *Expanding Roles for Gas Turbines in Power Generation*, in Johansson T.B. et al, *Electricity*, Lund University Press, p. 503-553.
15. SASMOJO, Saswinadi, dan MANURUNG, Robert, (1989), *Prospek Pemanfaatan Gas Bumi untuk Sistem Energi Total*, Lokakarya Energi 1989, KNI-WEC, Jakarta, 1-2 Agustus 1989.