

BEBERAPA ASPEK TERMODINAMIS DAN TEKNIS MENGENAI REAKTOR NUKLIR JENIS HIGH TEMPERATURE GAS COOLED REACTOR

Samudro M.

Jurusan Teknik Mesin - Institut Teknologi Bandung

PENDAHULUAN

Dewasa ini Teknik Nuklir telah berkembang pesat sehingga terwujud beberapa jenis pusat tenaga nuklir, baik yang sudah mantap dan beroperasi secara komersial maupun yang berstatus percobaan lapangan atau laboratorium. Yang sudah beroperasi secara komersial sudah dapat bersaing dengan pusat-pusat tenaga yang konvensional.

Menghadapi sumber-sumber tenaga alam yaitu tenaga air dan tenaga bahan bakar fosil seperti batubara dan minyak yang semakin terbatas, maka Indonesia seharusnya melihat kemungkinan yang lain. Para ilmuwan Indonesia sudah memikirkan sumber-sumber tenaga alternatif, antara lain sumber tenaga nuklir.

Makalah ini bermaksud membahas salah satu jenis pusat listrik tenaga nuklir yang sudah dipergunakan dalam skala besar, terutama di Inggris, yaitu jenis yang memakai bahan pendingin gas bertemperatur tinggi (High Temperature Gas-cooled Reactor - HTGR). Dari jenis tersebut telah terhimpun banyak pengalaman dan teknologi yang sudah dikuasai, serta kemampuannya untuk bersaing dengan pusat tenaga konvensional, sehingga pusat-pusat tenaga berskala besar dengan sistem ini telah dibangun dan dioperasikan di Inggris dan di Amerika.

Untuk membahas dan mengenali karakteristik pusat tenaga nuklir jenis HTGR. Sebagai contoh dipilih sebuah pusat tenaga nuklir yang dimiliki oleh Philadelphia Electric Company yang ber tenaga total 2300 MW. Pusat tenaga nuklir tersebut bekerja dengan dua buah reaktor kembar yang didinginkan dengan helium. Masing-masing reaktor menjalankan dua buah turbo generator (kembar) berdaya neto total 1160 MW dengan efisiensi termis 38,6%.

Pembangunan pusat tenaga nuklir HTGR tersebut terpacu setelah adanya beberapa pengalaman, baik yang didapat dari pusat-pusat sejenis yang berskala lebih kecil yang bekerja sebagai prototipe, maupun dari negara-negara lain.

Pusat-pusat tenaga nuklir HTGR mempunyai ciri-ciri lain daripada pusat-pusat tenaga konvensional, meskipun prinsipnya sama. Yaitu adanya uap yang menggerakkan turbin, yang bekerja melalui daur siklus dasar Rankine. Namun demikian ada banyak hal yang berbeda terutama mengenai konstruksi, bahan-bahan, alat-alat pengaturan dan pengolahan limbah serta kualifikasi personalia yang mengoperasikannya. Karena waktu yang terbatas maka dalam makalah ini hanya akan dibahas beberapa aspek saja.

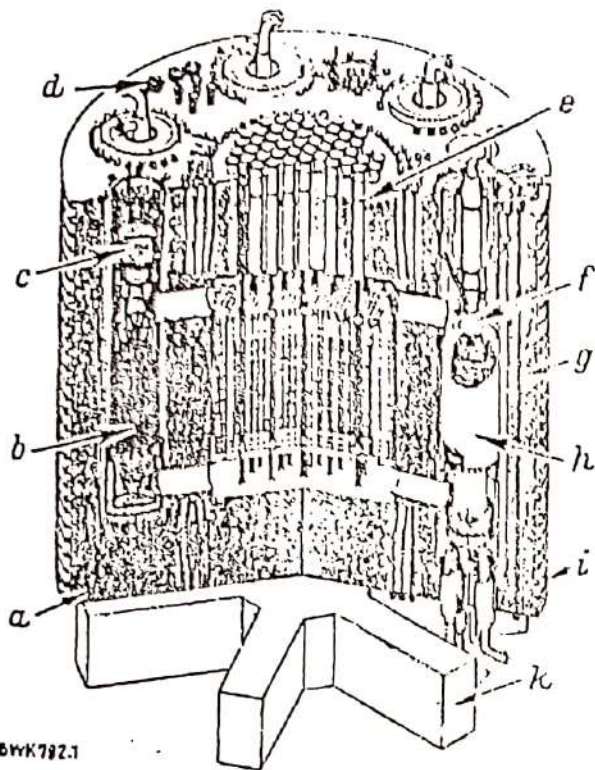
PEMBANGKIT UAP

Bagian ini merupakan inti dari sebuah pusat tenaga termis yang ada dalam sirkulasi primer. Reaktor didinginkan oleh gas helium, yang kemudian helium yang panas ini memanaskan alat penguap air dalam sirkulasi sekunder. Seluruh alat dalam sirkulasi primer berada dalam sebuah bejana beton pratekan. Bejana tersebut bekerja sebagai bejana tekan (pressure vessel) yang mampu menahan tekanan kerja helium sebesar 48 bar dan sekaligus bekerja sebagai perisai pelindung biologis.

Reaktor yang ada di tengah-tengah bejana silindris dikelilingi oleh enam buah alat penguap (ketel/ pembangkit uap) yang di atasnya ditempatkan sebuah mesin kipas sirkulasi gas helium (sirkulasi primer). Seluruh ruangan di dalam silinder yang dipakai untuk reaktor dan alat-alat penguap serta pipa aliran gas dilapisi dengan baja karbon, yang di dalam masa konstruksi bejana sekaligus bekerja sebagai cetakan cor beton. Untuk jelasnya dapat dilihat gambar 1.

Bahan bakar reaktor yang dipakai adalah uranium yang diperkaya dan thorium dalam bentuk karbida, sedang sebagai moderatornya digunakan blok-blok grafit. Pengaturan reaktivitas dilakukan oleh batang-batang pengatur yang masuk dari atas reaktor dengan gerakan naik turun yang dilakukan oleh tenaga listrik. Dalam keadaan darurat

batang-batang tersebut karena beratnya dapat turun sendiri dan kemudian menghentikan kerja reaktor.



Gambar 1. Rumah reaktor

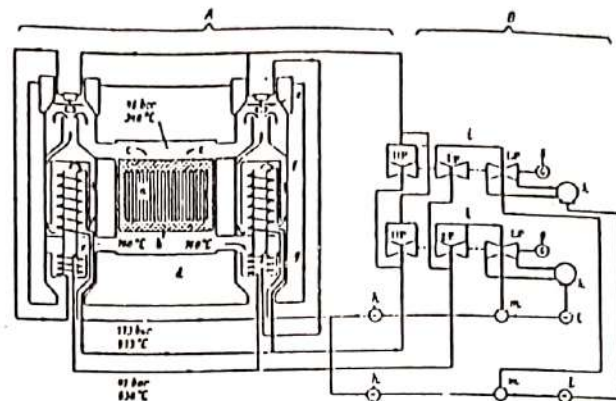
Keterangan gambar:

- a. Bejana beton
- b. Penukar panas pembantu
- c. Mesin kipas pembantu
- d. Alat pembersih helium
- e. Pipa pengisian
- f. Mesin kipas utama
- g. Batang-batang tekan vertikal
- h. Alat penguap utama
- i. Pembalut tekan
- j. Konstruksi tempat duduk bejana

ALAT PEMBANGKIT UAP

Alat penguap air (pembangkit uap) dari siklus kerja turbin terdiri atas sebuah pipa tunggal yang berbentuk ulir (spiral) yang mana air dan uap melewatinya hanya sekali (once through boiler). Spiral tersebut mengelilingi sebuah pipa yang berisi aliran gas panas, yaitu helium.

Jadi ekonomizer atau alat pemanas air, penguap dan alat pemanas lanjut (superheater) semuanya merupakan satu sambungan berurutan dalam spiral tersebut. (Lihat gambar no.2).



Gambar 2. Skema siklus HTGR

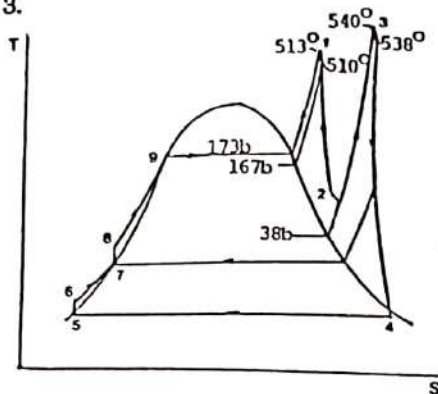
Keterangan gambar :

- A. Bagian reaktor
- B. Bagian turbin
- a. Inti reaktor
- b. Reflektor
- c. Helium
- d. Bejana beton
- e. Kipas helium
- f. Berkas pipa penguap tekanan tinggi
- g. Pemanas lanjut ulang
- h. Pompa air pengisian
- i. Turbin HP - IP - LP
- k. Kondensator
- l. Pompa kondensat
- m. Alat pemanas air pengisian

Dalam gambar skema, spiral kedua dibawah yang pertama (g) merupakan sebuah pemanas lanjut berulang (resuperheater), yang memanaskan kembali uap yang sudah mengembang dalam turbin bertekanan tinggi (HP turbin)

Jalannya sirkulasi siklus primer (helium) adalah sebagai berikut. Helium dingin masuk ke dalam reaktor dengan temperatur 340 °C dan tekanan 48 bar dari bagian atas, keluar di bagian bawah reaktor dengan temperatur 760 °C. Kemudian masuk kedalam *superheater* (g) dari atas ke bawah searah dengan arah uap yang ada didalam spiral. Di bagian bawah *resuperheater*, gas helium tersebut berbalik 180°, masuk ke dalam pipa dalam menuju ke spiral atas. Di bagian atas berbalik lagi ke bawah memanaskan spiral atas secara alir-balik (counter flow) terhadap aliran air/uap di dalam spiral. Disini air masuk dengan temperatur 190 °C dan keluar sebagai uap panas lanjut 513 °C dan tekanan 173 bar. Uap ini kemudian masuk ke dalam turbin bertekanan tinggi dengan temperatur 510 °C dan tekanan 167 bar. Di dalam turbin, uap bertekanan tinggi tersebut mengembang hingga mencapai tekanan sekitar 40 bar dan temperatur 330C. Sesudah uap dipanaskan didalam *resuperheater* hingga temperatur 540 °C, kemudian

masuk ke dalam turbin tekanan menengah (IP turbine) dengan tekanan 38 bar dan temperatur 538°C. Dalam diagram T-S siklus disajikan dalam gambar 3.



Gambar 3. Siklus Rankine

Siklus primer (helium) digerakkan oleh sebuah kipas sirkulasi (e) yang digerakkan oleh turbin uap memakai uap yang sudah keluar dari turbin bertekanan tinggi menuju ke *resuperheater*. Jumlah instalasi pembangkit uap ini ada enam buah, ditempatkan di dalam bejana beton yang mengelilingi reaktor.

Susunan spiral penguap diatur sedemikian rupa sehingga proses penguapan dari fase air berjalan ke arah atas agar tidak menimbulkan masalah aliran uap/air yang berbalik. Alirannya dijamin stabil terutama pada beban-beban rendah. Lagi pula aliran medium-pemanas dan medium yang dipanaskan berjalan secara alir-balik (*counterflow*), suatu hal yang menguntungkan baik ditinjau dari sudut ilmu perpindahan panas maupun dari sudut ilmu termodinamika. Aliran helium bukan merupakan masalah, karena hal ini merupakan aliran paksa berkecepatan tinggi.

Dalam hal *resuperheater*, seperti telah diuraikan diatas, dipakai aliran *uniflow* atau aliran searah. Teknik ini sering dipakai, kalau *superheater* menghadapi gas yang amat panas. Jika uap yang dipanaskan keluar diujung *superheater* yang berhadapan dengan gas pemanas yang masuk, seperti halnya dalam teknik *counterflow*, bahan *superheater* yang ada diantara kedua media tersebut akan bersuhu tinggi pula. Dalam hal ini ada diantara 760 °C dan 540 °C, yaitu kira-kira 650 °C. Sedang *uniflow* atau aliran searah, temperatur *superheaternya* ada di antara 760 °C dan 380 °C, atau kira-kira 550 °C, jadi lebih rendah. Bahan *superheater* yang dingin sudah tentu akan lebih tahan lama daripada bahan yang panas, lagi pula temperatur bahan seluruh *resuperheater* lebih merata. Meskipun perpindahan panas secara *uniflow* tidak begitu efisien atau ekonomis dibanding

perpindahan panas secara *counterflow*, tetapi pertimbangan lain seperti keawetan misalnya agaknya lebih dominan.

Siklus sekunder juga menggunakan sistem pemanas air pengisian regeneratif yang sebuah di antaranya tertera pada gambar 2. Sesungguhnya lebih dari sebuah yang dipasang, karena jika hanya dengan sebuah pemanas (untuk menaikkan suhu air dari 50 °C ketika keluar dari kondensor, sampai pada suhu 190 °C) maka tidak akan dicapai efisien termal yang optimal. Dalam pusat tenaga uap konvensional yang setaraf dengan pusat HTGR seperti yang sedang dibahas, dipergunakan 7-10 buah *feedwater heater* yang berfungsi mengurangi pemanasan *economizer* secara *irreversible*. Akan tetapi disain temperatur air sebesar 190 °C, yang masuk kedalam alat penguapan adalah berdasarkan pertimbangan antara penghematan biaya operasi dengan naiknya efisiensi siklus dan biaya investasi peralatan yang lebih tinggi.

ALAT PENDINGIN BANTU

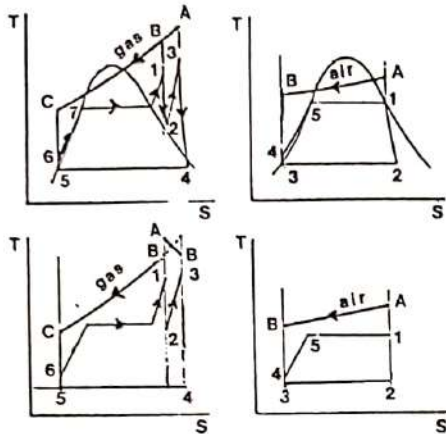
Di samping alat penguap seperti yang telah diuraikan di atas, masih ada lagi alat lain yang dipasang dalam bejana beton, yaitu tiga buah alat pendingin bantu untuk mendinginkan bejana. Jika diperlukan, alat pendingin yang terdiri atas pipa spiral akan mendinginkan helium yang keluar dari bagian bawah reaktor. Gerakan helium ini dilakukan oleh kipas yang dijalankan dengan tenaga listrik. Sebagai pendingin dipakai air yang ditekan (supaya tidak menguap) dan dialirkan keluar untuk melepaskan panas melalui sebuah alat penukar panas.

PERBANDINGAN ANTARA PENDINGIN GAS DAN PENDINGIN AIR

Efisiensi termal netto terbesar yang dapat dicapai 38,6% (yang setaraf dengan sistem tenaga uap konvensional), karena temperatur uap yang dapat dicapai adalah tinggi, yaitu 510 °C/167 bar dan 538 °C/38 bar. Efisiensi yang tinggi tersebut terutama bergantung pada entalpi akhir dari uap di dalam pembangkit uap, disamping juga pada rendahnya entalpi akhir dari uap. Tetapi keadaan yang terakhir ini tidak banyak dapat diusahakan, karena berkaitan dengan keadaan alam di sekelilingnya, seperti tersedianya air pendingin untuk kondensor yang juga menentukan tekanan vakumnya.

Temperatur awal yang tinggi pada turbin tidak akan dapat dicapai dengan Reaktor PWR atau BWR, karena dibatasi oleh temperatur kritis uap air. Karena reaktor jenis tersebut tidak menggunakan uap panas lanjut (dengan *superheater*

maupun resuperheater), maka uap yang masuk ke turbin adalah uap jenuh. Jadi pengembangan uap di dalam turbin sudah berada di daerah basah, keadaan tersebut sudah tentu menurunkan efisiensi turbin. Dalam diagram T-s dan T-L dapat dibandingkan gambaran siklus Rankine yang memakai zat pemanas cair dan gas (gambar no.4).



Gambar 4. Perbandingan siklus Rankine antara premium pemanas gas dan air

Air mempunyai massa dan panas jenis yang lebih besar dibanding gas. Dalam BWR atau PWR laju aliran massa dijaga tetap tinggi, supaya kenaikan temperatur antara air yang masuk dan yang keluar dari reaktor tidak terlalu berbeda guna mencapai tingkat moderasi neutron yang merata. Sehingga jalannya temperatur pada media pemanas, dalam hal ini alat L, akan lebih landai dibandingkan dengan gas. Yang ingin dicapai dalam masalah perpindahan panas adalah perbedaan temperatur rata-rata yang kecil, agar dapat mengurangi apa yang disebut dengan *irreversibility external*.

Pemanasan dalam *economizer* yaitu dalam diagram T-s digambarkan prosesnya oleh 4-5 (isobar), ternyata tidak dapat dikurangi tanpa menggunakan sistem pemanasan *feed water regeneratif*, yaitu memanaskan air dengan uap yang disadap dari turbin. Dengan cara ini proses 4-5 yang naik entropinya dapat dikurangi, sehingga air yang masuk ke dalam alat penguap (ketel) temperaturnya sudah mendekati titik 5.

Pada BWR kelihatannya proses 5-1 lebih baik daripada dalam GCR (*gas cooled reactor*), akan tetapi keuntungan tersebut berkurang oleh adanya kerugian yang dialami turbin. Oleh karena itu sebuah pusat tenaga nuklir BWR atau PWR menggunakan banyak *feed water heater*, terlebih lagi karena temperatur uap yang masuk ke turbin

jauh lebih rendah daripada dalam GCR yaitu sekitar 330 °C. Dengan keadaan tersebut reaktor-reaktor jenis BWR atau PWR jelas mempunyai efisiensi termal yang lebih rendah, yaitu sekitar 5% dibanding jenis HTGR.

Sesungguhnya yang menarik dari reaktor jenis HTGR adalah:

1. Pembuangan panas ke lingkungannya sedikit
2. Masuknya seluruh peralatan siklus primer kedalam sebuah bejana beton, tanpa adanya sambungan-sambungan pipa keluar, kecuali pipa uap yang menuju turbin. Hal ini menjamin tingkat keamanan yang tinggi.
3. Pengalaman praktis yang memuaskan dari model yang telah dibangun sebelumnya.
4. Limbah radioaktif yang dihasilkannya minimal.
5. Derajat keamanannya tinggi, karena digunakan gas helium, grafit, dan thorium.

Helium dipakai karena sifat-sifatnya yang tidak korosif serta reaktivitasnya tidak banyak berubah walaupun tekanannya berubah. Masalah penyekatan terhadap kebocoran, secara teknis sudah dikuasai yaitu dengan *waterseal*. Secara teknis umumnya gas lebih mudah dikendalikan daripada cairan.

Bahan grafit yang dipakai sebagai moderator merupakan bahan struktural yang kuat, serta tahan terhadap suhu tinggi yang jauh melebihi temperatur kerja. Demikian juga sifat fisiknya, seperti kapasitas panas dari seluruh massa grafit yang besar, akan menjamin perubahan temperatur transien yang lambat terhadap perubahan reaktivitas maupun pendinginan, sehingga lebih mudah untuk dikendalikan.

Sifat-sifat bawaan (*inherent*) yang dimiliki bahan-bahan yang dipakai dalam reaktor, memungkinkan penggunaan alat-alat pengamanan yang lebih sederhana, sehingga menguntungkan konstruksi dan investasi.

PERALATAN KEAMANAN

Disamping sifat-sifat yang menjamin derajat keamanan tertentu seperti diuraikan di atas perlu juga diadakan perlengkapan keamanan untuk menghadapi keadaan yang memaksa.

Perlengkapan tersebut antara lain:

1. Alat pendingin bantu seperti telah disebut di atas, sebanyak tiga buah, yang ada dalam bejana beton disamping alat-alat pembangkit uap. Alat ini dapat bekerja terpisah dari alat pendingin utama yaitu untuk mengeluarkan sisa panas *decay heat* yang masih timbul melalui sirkulasi

terpisah, yang digerakkan oleh mesin kipas listrik.

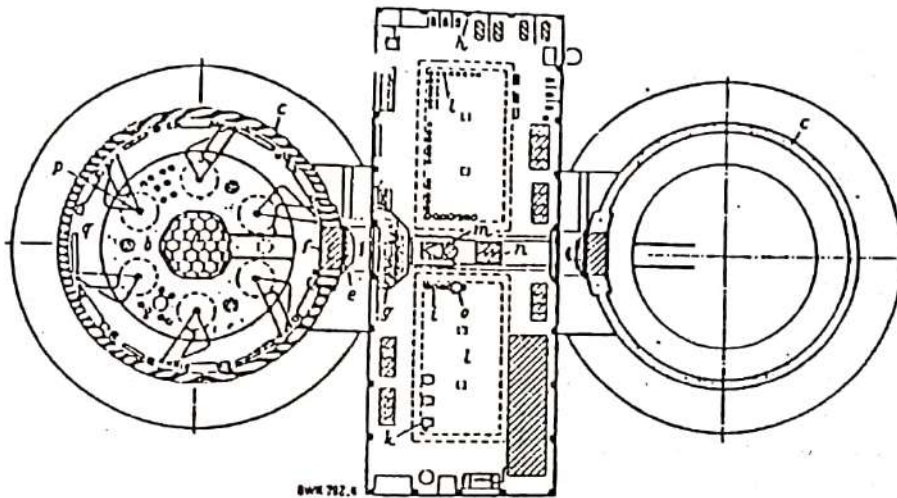
2. Cara untuk menghentikan reaktor yang terpisah dari alat pengatur dengan batang-batang pengatur. Bahan penyerap neutron dengan cara tertentu dapat segera mengalir secara otomatis kedalam lubang untuk pemuatan bahan bakar.

3. Katup-katup pengaman khusus yang mencegah kemungkinan masuknya air ke dalam sirkulasi primer kalau ada kebocoran dalam alat pembangkit uap. Katup-katup ini dipacu oleh alat sensor yang mengisyaratkan adanya uap

memungkinkan beban turbin bervariasi antara 25-100%.

PENYIMPANGAN DAN PENGGANTIAN BAHAN BAKAR

Disamping konstruksi reaktor dan turbin ada hal lain yang juga penting, yaitu masalah penyimpanan bahan bakar cadangan serta teknik penggantian dan penyimpanannya. Untuk penyimpanan bahan bakar dengan peralatannya, tersimpan pada sebuah bangunan besar yang terletak di antara kedua reaktor (lihat gambar 5).



Gambar 5. Denah tempat pengisian/penyimpanan bahan bakar

Keterangan gambar:

- a. Penutup lubang pengisian
- b. Bejana beton
- c. Perisai lindung
- e. Pintu orang
- f. Pintu material
- g. Penjaga
- h. Bangunan pengendali reaktor

- k. Alat angkut elemen bakar
- l. Tempat simpan elemen bakar
- m. Elemen bakar-mesin pengganti/transport
- n. Peralatan *transport* elemen bakar
- o. Tempat alat *transport* pembantu
- p. Kipas utama
- q. Kipas pembantu

keluar dari pembangkit uap. Air dan uap tertutup (terisolasi) serta uap dari pipa penguapan dibuang ke dalam bejana pembuangan.

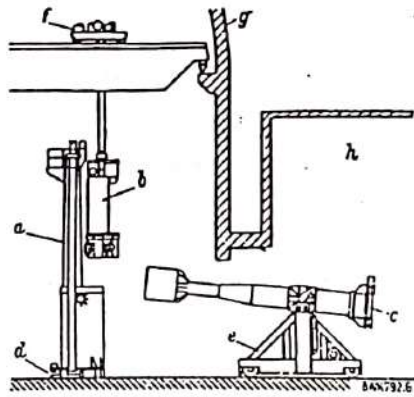
4. Alat pengaman serta alat-alat pengatur dibagian turbin adalah konvensional, seperti yang terdapat pada pembangkit tenaga uap modern. Setiap turbin dapat bekerja sendiri secara terpisah meskipun dalam keadaan normal diusahakan pembebanan yang seimbang.

5. Hubungan antara beban turbin, beban reaktor, penjagaan temperatur uap dalam *superheater*, serta keperluan pengisian air berlaku secara otomatis menurut aturan tertentu yang

Berbeda dengan penyimpanan bahan bakar pada reaktor-reaktor BWR atau PWR, bahan bakar dalam HTGR disimpan dalam ruangan terlindung dan kering.

Peralatan untuk proses penggantian bahan bakar terdiri atas:

1. Mesin pengganti bahan bakar, untuk mengangkat dan mengganti bahan bakar serta reflektor dalam reaktor (lihat gambar 6).
2. Alat *transport* bahan bakar, untuk mengangkut mesin pengganti bahan bakar dan tempat penyimpanan bahan bakar.
3. Alat untuk mengangkat dan memasang peralatan batang-batang pengatur.



Gambar 6. Alat untuk penggantian bahan bakar

Keterangan gambar :

- a. Mesin pengganti elemen bakar
- b. Tempat elemen bakar
- c. Tempat transport pembantu
- d. Katup penutup reaktor
- e. Kereta transport
- f. Keran dalam atap reaktor
- g. Atap pelindung reaktor

4. Katup penutup, untuk menutup dan melindungi lubang-lubang pengisian dalam reaktor.

Proses penggantian sendiri terjadi berdasarkan umur efektifitas dari bahan bakar, yaitu 4 tahun. Ini berarti bahwa setiap tahun ada penggantian 1/4 dari jumlah elemen bahan bakar. Sedangkan umur reflektornya adalah dua kali lebih panjang, yaitu 8 tahun. Proses penggantian bahan

bakar berlangsung menurut prosedur yang sangat rumit, terutama untuk menjaga agar keluarnya helium seminimal mungkin.

INSTALASI PUSAT TENAGA SELURUHNYA.

Denah instalasi pusat tenaga nuklir secara keseluruhan dapat terlihat pada gambar 7.

Keterangan gambar :

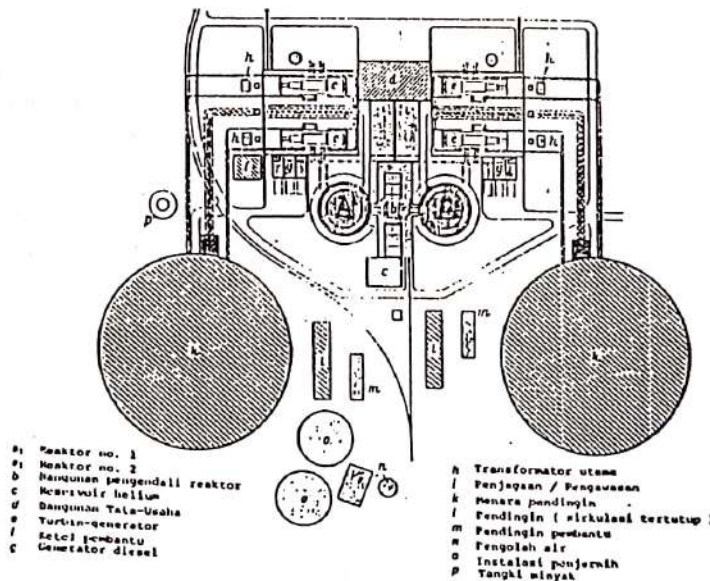
- a1. Reaktor no. 1
- a2. Reaktor no. 2
- c. Reservoir heliomi
- d. Bangunan tata-usaha
- e. Turbin generator
- f. Ketel pembantu
- g. Generator diesel

Dalam pembangunannya digunakan pedoman berikut:

1. Sistem, komponen, instalasi, dan bagian-bagiannya dibuat sejauh mungkin seperti kesatuan kembar (tetapi bukan bayangan cermin).
2. Bangunan untuk pengendalian reaktor, penyimpanan bahan bakar beserta peralatan transport harus dapat dipakai untuk kedua reaktor tersebut (gambar 7 dan 8).

PENUTUP

Seperti telah dijelaskan dalam pendahuluan, bahwa makalah ini hanya membahas beberapa aspek dari satu jenis pusat tenaga nuklir saja, yaitu HTGR. Yang jelas bukan hasil teknologi nuklir yang mutakhir, akan tetapi sudah mampu



Gambar 7. Denah instalasi HTGR

menandingi pusat-pusat tenaga termal yang konvensional. Keandalan dan keamanannya sudah dapat diperhitungkan.

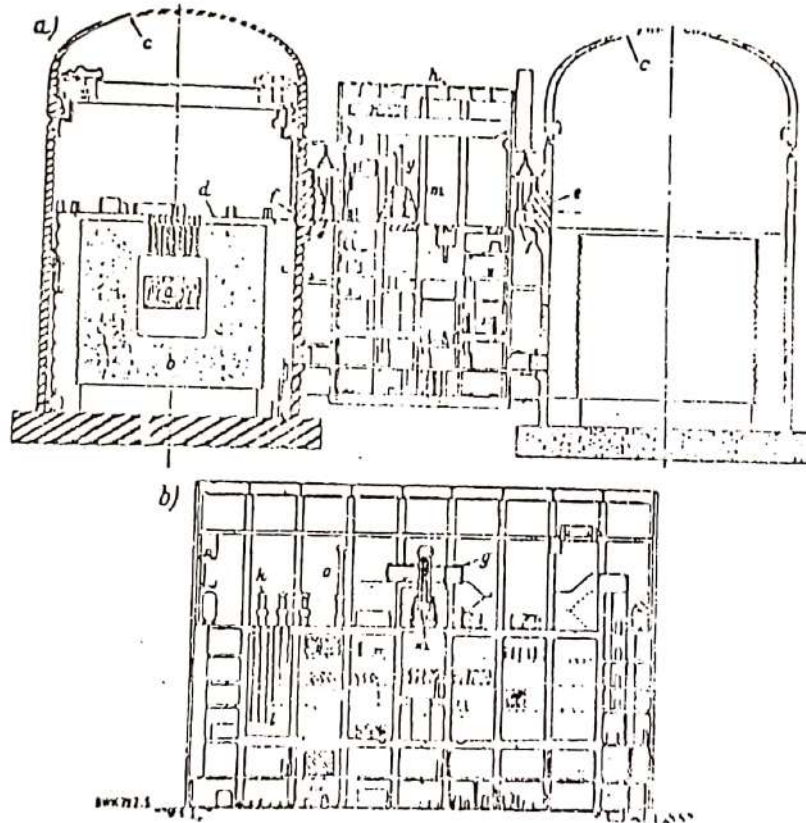
Namun dalam banyak hal perlu mendapat perhatian khusus, karena operasinya memerlukan penanganan yang profesional. Banyak hal yang

- h. Transformator utama
- i. Penjagaan/ pengawasan
- k. Menara pendingin
- l. Pendingin (sirkulasi tertutup)
- m. Pendingin pembantu
- n. Pengolah air
- o. Instalasi penjernih
- p. Tangki minyak

dituntut dari personil yang mengoperasikannya, baik dalam bekal pengetahuan maupun mentalitasnya, juga disiplin dan ketaatannya pada peraturan-peraturan yang ada.

Setiap teknologi baru membawa problema baru, dan ini harus kita hadapi serta kita pelajari. Tenaga nuklir adalah tenaga alam yang harus kita syukuri dan memanfaatkannya untuk kesejahteraan masyarakat.

Disarankan agar para ilmuwan dan teknisi Indonesia membahas masalah pembangkitan tenaga nuklir secara teratur, sistematis dan terarah. Supaya pada akhirnya mencapai kesimpulan yang rasional tentang pemilihan jenis-jenis tertentu yang cocok untuk dipakai dan dikembangkan di Indonesia



Keterangan gambar :

- a. Inti reaktor
- b. Bejana beton
- c. Bangunan perisai reaktor
- d. Lantai pengisian
- e. Pintu orang
- f. Pintu material
- g. Penjagaan/ Pengawasan
- h. Atap bangunan pengendali
- k. Tempat *transport* elemen bakar
- l. Ruang penyimpanan elemen bakar
- m. Alat *transport* pengganti elemen bakar
- o. Alat *transport* pembantu

Gambar 8. Potongan bangunan reaktor (a) dan potongan bangunan pengendali reaktor (b)

DAFTAR PUSTAKA

1. WAAGE, J.U., et al., 2300 MW-Kernkraftwerk mit gasgekuehlten Hoch temperatur reaktor Brennstoff Wacrmc-Kraft (BWK), 24, 1972.
2. REHM, W. and UNGER, H., The Safety in High-Temperatur Reactors B.W.K. 37, Jul-Aug 1985.
3. SIMON, M., BAUST, E., SCHONING, J., The Starting-up of The THTR-30, A Milestone for The H.T.R. development, B.W.K.37, Jul- Aug 1985.
4. EL WAKIL, Power Plant Technology, Mc. Grawhill Coy., 1985.
5. LEDINEGG, M., Dampferzeugung, Dampfkessel, Feuerungen Einschliesslich Atomreaktoren, 1966.