

STUDI PEMILIHAN MATERIAL UNTUK REAKTOR GAS TEMPERATUR TINGGI

Oleh

Abdul Hafid

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir - BATAN

ABSTRAK

STUDI PEMILIHAN MATERIAL UNTUK REAKTOR GAS TEMPERATUR TINGGI. Reaktor Gas Temperatur Tinggi (RGTT) adalah jenis reaktor generasi keempat. Reaktor ini beroperasi pada temperatur yang tinggi, hingga ± 900 °C. Sifat logam pada temperatur tinggi akan mengalami penurunan kemampuan terhadap korosi, ketangguhan, sifat aus, kekerasan, kekuatan dan mampu bentuk. Dilain pihak sifat rapuh dan tidak tahan terhadap mulur meningkat. Penggunaan baja paduan (*alloy steel*) dan komposit sebagai material temperatur tinggi menjadi solusi. Berdasarkan hasil studi yang dilakukan diperoleh bahwa kandidat material RGTT adalah *low steel alloy*, *titanium alloy* dan *stainless steel*. Potensi kandidat material tersebut untuk kondisi temperatur hingga 600°C. Analisis ini dilakukan dengan mengacu pada diagram batas elastisitas 50 MPa terhadap ketangguhan material terhadap potensi cacat bawaan karena ketidaksempurnaan material. Pada kenyataannya temperatur operasi RGTT mencapai 900°C. Oleh karena itu, dengan menggunakan diagram kekuatan material terhadap kondisi temperatur tinggi dan menggabungkan hasil yang diperoleh pada diagram sebelumnya maka diperoleh bahwa kandidat material yang aman untuk RGTT adalah *Stainless Steel*.

Kata kunci: RGTT, *stainless steel*

ABSTRACT

STUDY ON MATERIAL SELECTION FOR HIGH TEMPERATURE GAS REACTOR. High Temperature Gas Reactor (HTGR) is fourth generation reactor type. This reactor can operated on high temperature as to ± 900 °C. On the high temperature, metal property will have decrease ability to corrosion, toughness, weariness, hardness, and formability. Based on the results of a study conducted found that a particular candidate HTGR materials is low alloy steel, titanium alloy and stainless steel. Potential candidates for such material to temperature up to 600 °C. This analysis is done with reference to the diagram of the elasticity limit of 50 MPa to the toughness of the material for potential birth defects due to material imperfections. In fact HTGR operating temperature reached 900 °C. Therefore, using strength of material diagrams to high temperature conditions and combining the results obtained in the previous chart, it is obtained that the candidate materials that are efficient, economical and safe for the HTGR is *Stainless Steel*.

Keywords: HTGR, *stainless steel*

PENDAHULUAN

Reaktor gas temperatur tinggi (RGTT) merupakan jenis reaktor generasi ke-empat dengan temperatur operasi mencapai ± 900 °C^[1]. Berdasarkan perhitungan pemodelan siklus termodinamikanya, temperatur dan tekanan operasi RGTT jenis *Pebble Bed Modular Rector* (PBMR) dapat dibagi atas beberapa bagian dari yang paling rendah berkisar 30°C dengan tekanan ± 3 MPa hingga yang paling tinggi 900°C dengan tekanan ± 8 MPa. Pemilihan material untuk komponen RGTT dilakukan sebagai proses lanjutan setelah desain siklus termodinamik. Pemilihan material merupakan bagian penting yang dapat menjadikan suatu desain aman.

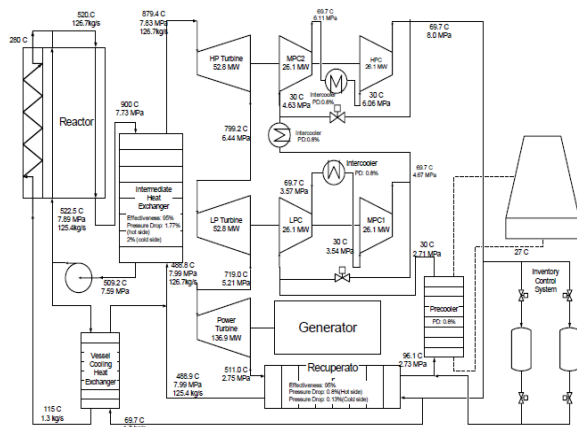
Dalam setiap perencanaan teknik, pemilihan material merupakan bagian penting yang dapat menjadikan suatu desain yang efisien, aman dan ekonomis. Ada sangat banyak jenis material yang dapat digunakan dalam aplikasi teknik. Untuk

menetapkan pilihan yang baik, ada empat tahap yang perlu dilakukan, pertama, pemilihan yang berdasarkan pada sifat material yang akan digunakan, kedua, penentuan proses pembuatannya, ketiga, pilihan dipersempit pada logam baja karbon, *stainles steel*, *copper steel*, termoplastik atau *termoset* dan keempat, pilihan material yang lebih khusus sesuai tingkat dan spesifikasinya^[2].

Salah satu komponen yang banyak digunakan pada RGTT adalah bejana tekan (*pressure vessel*). Aplikasi prinsip-prinsip bejana tekan mulai dari bejana reaktor (*reactor vessel*) sampai dengan bejana pemurnian gas helium. Penggunaan material, proses manufaktur dan pengujian sebelum instalasi yang tepat serta dan sesuai prosedur akan menghasilkan bejana tekan yang aman bagi instalasi yang RGTT. Oleh karena itu, pada makalah ini studi pemilihan kandidat material RGTT akan meninjau pada metode pemilihan kandidat desain bejana tekan.

Bejana tekan pada RGTT yang paling besar dengan temperatur dan tekanan yang sangat tinggi

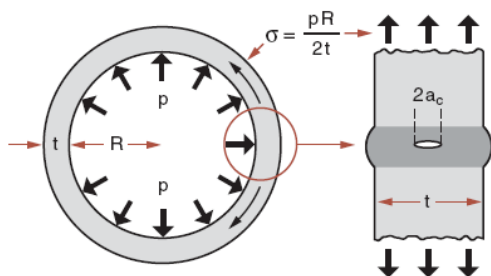
adalah bejana rektor (*reactor vessel*). Temperatur dan tekanan bejana reaktor masing-masing $\pm 900^{\circ}\text{C}$ dan ± 8 MPa. Bejana-bejana lainnya seperti bejana pemutar kalor dan bejana proses baik turbin maupun kompresor memiliki temperatur dan tekanan yang lebih rendah. Bejana tekan terendah adalah bejana pemurnian gas helium dengan temperatur kurang dari 100°C dan tekanan berkisar 2,8 MPa. Gambaran di atas merupakan gambaran dari salah satu instalasi RGTT jenis PBMR sebagaimana model siklus termodinamik yang ditunjukkan pada Gambar 1.



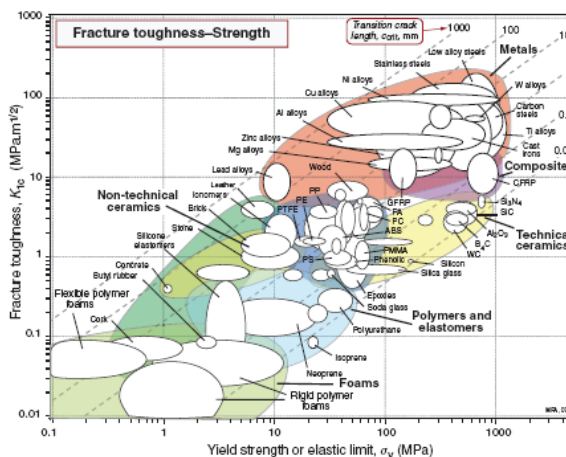
Gambar 1. Desain reaktor PBMR^[1]

TEORI

Bejana tekan memerlukan kondisi material yang tangguh dan kuat. Sebagai contoh, dari pengamatan diperoleh hasil adanya cacat sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2. Pada studi pemilihan kandidat material ini, analisis pendekatan pemilihan material akan menggunakan diagram material batas elastisitas (*elastic limits*) dalam MPa terhadap ketangguhan terhadap retak (*fracture toughness*) material dalam $\text{MPa}(\text{m})^{1/2}$ sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 2. Bentuk dinding bejana tekan dan ditemukan adanya cacat pada dinding^[2]



Gambar 3. Diagram material *yield strength* atau *elastic limit* terhadap *fracture toughness*^[3]

Reaktor Gas Temperatur Tinggi (RGTT), merupakan salah satu jenis reaktor daya nuklir terkini. Pada awalnya konsep desain RGTT dikembangkan oleh Inggris, Jerman dan Amerika serikat di tahun 1960-an. Penelitian dan pengembangan reaktor ini terus berlanjut hingga pada awal 1990-an berhasil dikembangkan salah satu jenis RGTT yaitu PBMR yang dominan menggunakan grafit sebagai penyerap panas reaktor dan gas helium sebagai fluida pendingin sekaligus pengangkut panas yang dihasilkan oleh reaktor nuklir. PBMR di rancang menggunakan siklus Brayton dengan kapasitas nominal daya listrik tertentu antara lain 300 MWe, tergantung pada sistem konversi energi yang digunakan.

Berdasarkan model PBMR dapat diperoleh informasi penting untuk pemilihan kandidat material yang dapat digunakan. Informasi tentang temperatur dan tekanan tinggi mengarahkan proses pemilihan material pada prinsip desain bejana tekan. Pada kenyataannya PBMR tersebut menggunakan cukup banyak bejana tekan. Bejana tekan terbesar dengan tekanan dan temperature paling tinggi mencapai 8 MPa dan 900°C adalah bejana reaktor (*reactor vessel*). Bejana-bejana lainnya memiliki tekanan dan temperatur yang lebih rendah dan secara bervariasi dengan temperatur dan tekanan yang cenderung turun. Bejana dengan tekanan dan temperatur terendah adalah bejana pre-cooler dan bejana pemurnian gas helium dengan tekanan berkisar 3 MPa dan temperatur awal kurang dari 100°C hingga temperatur lingkungan ($27^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}$).

Bejana tekan memerlukan material yang tangguh dan kuat untuk dapat digunakan dengan aman pada instalasi reaktor daya RGTT. Desain bejana tekan biasanya memberikan syarat secara umum bahwa bejana dapat mengalami kerusakan

pada tekanan rendah akibat retak yang terus merambat yang berakibat terjadi kerusakan (*yield before break*). Pada bejana-bejana tekan yang kecil proses pengujian dalam bentuk hidrotest dapat dilakukan dengan mudah, tetapi pada bejana tekan yang sangat besar maka pengujian hidrotest sangat tidak mungkin diterapkan. Oleh karena itu, kebocoran diukur dengan prediksi retak yang sekecil mungkin atau potensial terjadi retak jika ada. Dinding bejana dirancang untuk berada pada kondisi mengalami kerusakan dengan indikasi diawali kebocoran kemudian pecah (*leak before break*) karena kebocoran mudah untuk dilacak. Oleh karena itu semua tahap manufaktur diatur dengan sangat ketat dengan pemeriksaan dan pengujian khusus.

Untuk pemilihan kandidat material bejana tekan dimulai dari rumusan tegangan (*stress*) pada dinding lengkung bejana dengan ukuran jari-jari (*R*), ketebalan dinding (*t*) dan dalam pengaruh tekanan (*p*) maka tegangan (σ) dirumuskan sebagai^[2]:

$$\sigma = \frac{pR}{2t} \quad (1)$$

Berdasarkan hasil pemeriksaan tersebut diukur kondisi cacat pada salah satu dinding bejana tekan yang terletak pada bagian pertengahan. Untuk menyatakan apakah cacat tersebut masih dapat diterima atau tidak maka dilakukan perhitungan. Apabila besar ketangguhan retak material (*fracture toughness*) adalah K_{IC} dikalikan dengan suatu konstanta khusus untuk cacat pada Gambar 2 dengan nilai *C* (tanpa satuan), maka besar tegangan (σ) yang dapat mengakibatkan cacat menyebar dirumuskan:

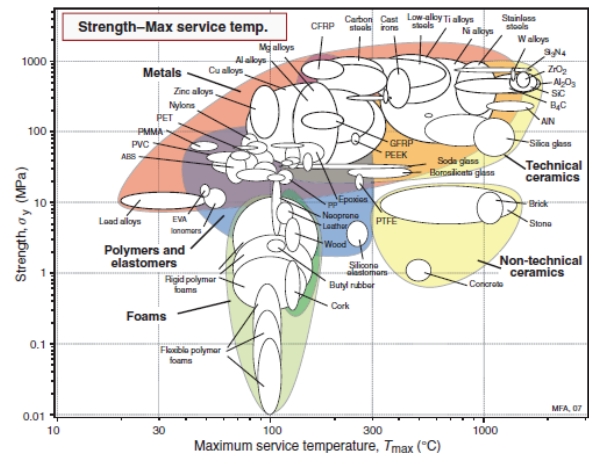
$$\sigma = \frac{CK_{IC}}{\sqrt{\pi a_c}} \quad (2)$$

Dinding bejana dapat dikatakan aman apabila tegangan kerja yang dihitung nilainya kurang dari besar tekanan menurut ketentuan pada rumus sebagai berikut:

$$p \leq \frac{2t K_{IC}}{R \sqrt{\pi a_c}} \quad (3)$$

Pemodelan dilakukan dengan cara memaksimalkan *fracture toughness* dengan meminimalisasi batas elastis. Selain itu, pada instalasi RGTT syarat lain seperti ketahanan material terhadap temperatur harus dilengkapi dalam pemilihan material maka dapat digunakan diagram *Strength-max service temperature* yaitu

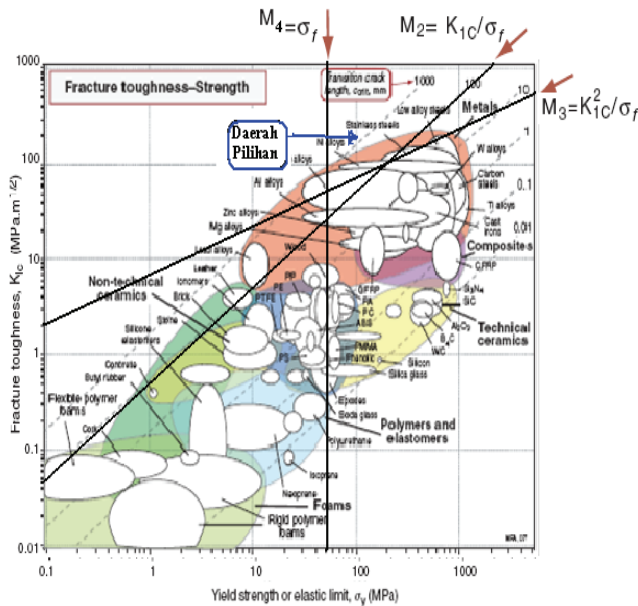
diagram *strength versus temperature* sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Bagan material berdasarkan *Strength vs Max service temperature*^[3]

HASIL DAN DISKUSI

Pemilihan kandidat material dilakukan dengan menggunakan diagram sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3. Caranya, mula-mula semua kriteria nilai jari-jari (*R*), tebal (*t*), dan cacat terukur (a_c) dijadikan sebagai suatu nilai yang tetap pada berbagai material berbeda sehingga diperoleh garis M_2 dan M_3 . Nilai-nilai yang diperoleh dari M_2 dan M_3 merupakan nilai-nilai yang terletak pada garis miring. Nilai yang memenuhi syarat untuk dapat digunakan adalah yang terletak di atas garis M_2 dan M_3 . Dengan demikian material-material *polimer* dan *elstomer* akan tereliminasi demikian pula halnya dengan material foam. Material-material logam paduan seperti *Al alloy*, *Mg alloy* dan *Cu alloy* masih dapat digunakan. Akan tetapi untuk bejana tekan material RGTT memiliki batas elastisitas tertentu yang mengharuskan material tetap tahan pada temperatur tertentu. Oleh karena itu syarat nilai maksimalisasi material M_4 harus menjadi batasan yang lebih menghususkan pilihan material yang akan digunakan. Dengan menempatkan batas tegangan elastis minimal 50 MPa maka logam-logam seperti *Mg alloy*, *Zn alloy* dan beberapa logam paduan lainnya menjadi tereliminasi. Akibatnya material yang tersisa sebagai kandidat material RGTT tinggal beberapa saja, seperti *stainless steel*, *low alloy steel*, *Cu alloy*, *Al alloy* dan *Ti alloy*. Secara khusus hasil pemilihan dari perhitungan dan analisis yang diperoleh sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1.



Gambar 5. Daerah pilihan kandidat material

Tabel 1. Kandidat material yang dapat digunakan

Material	M_2 (m) ^{1/2}	M_4 (MPa)
Stainless Steel	0,35	300
Low alloy steel	0,2	800
Cu alloy	0,5	200
Al alloy	0,15	200
Ti alloy	0,13	800

Berdasarkan hasil yang diperoleh di atas, material *stainless steel* merupakan kandidat pilihan yang paling mungkin. Material *low alloy steel* biasanya merupakan material standar, dari segi proses fabrikasi cukup sulit. Material *Cu alloy* memiliki banyak keterbatasan dan juga harganya relative jauh lebih mahal dibanding *stainless steel*, namun demikian untuk beberapa penggunaan khusus dapat dibuat menjadi bejana tekan. Dari segi batas elastisitasnya *stainless steel* jauh lebih baik.

Akhirnya, material *Ti alloy* merupakan material yang sangat baik untuk digunakan karena batas elastisitasnya cukup tinggi dan masih dapat difabrikasi meskipun tingkat kesulitannya cukup tinggi. Oleh karena itu untuk banyak pemakaian lebih disarankan menggunakan *stainless steel* sebagai pilihan dan untuk hal-hal tertentu saja penggunaan *Ti alloy*.

Tahapan terakhir dari pemilihan kandidat adalah analisa berdasarkan ketahanan material terhadap temperatur tinggi. Dengan menggunakan diagram material *Strength - Max service temperature* sebagaimana hasil yang ditunjukkan pada Gambar 4 maka pilihan material untuk berbagai tingkat temperatur dan kekuatan dapat lebih detail. Ada tiga daerah temperatur yang dapat dijadikan acuan, yaitu tahan pada temperatur lebih dari 100°C tetapi kurang dari 300°C, lebih dari 300°C tetapi kurang dari 900°C dan lebih dari 900°C. Semua material dibatasi pada batas kekuatan 100 MPa. Dengan tetap mengacu pada hasil yang diperoleh pada Tabel 1 dapat terlihat bahwa pada temperatur lebih dari 300°C tinggal *low alloy steel*, *Ti alloy* dan *stainless steel* yang dapat digunakan. Selanjutnya pada temperatur 900°C tinggal material *stainless steel* yang dapat digunakan sebagai material bejana tekan. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa pilihan kandidat material yang aman untuk material RGTT adalah *stainless steel*. Selanjutnya studi kandidat pemilihan kandidat material RGTT dapat dikembangkan lebih lanjut dengan merujuk pada *pilihan stainless steel* oleh karena jenis *stainless steel* sangat banyak variasinya baik dari segi pengelompokannya maupun tujuan ketahan material terhadap korosi akibat lingkungan dan temperatur operasinya.

KESIMPULAN

Kandidat material teknik untuk kepentingan instalasi RGTT dapat diseleksi berdasarkan kondisi aplikasi teknis dan lingkungan operasinya dengan menggunakan prinsip-prinsip dasar pemilihan material berdasarkan performans indeks. Pada kondisi temperatur kurang dari 300°C dengan batas kekuatan hingga 100 MPa material *Al alloy* dan *Cu alloy* masih dapat bertahan namun pada temperatur lebih dari 300°C menjadi tereliminasi. Selanjutnya, pada kondisi 900°C atau lebih material *low alloy steel* dan *Ti alloy* tereliminasi. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa kandidat material yang aman untuk RGTT adalah *stainless steel*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kami sampaikan kepada Redaksi Majalah Ilmiah Sigma Epsilon yang telah membantu dalam perbaikan makalah ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. KADAK, AC., "High Temperatur Gas Reactors", Kadak Associates Inc., <http://web.mit.edu/pebble-bed/Presentation/HTGR.pdf>, Maret 2009.
2. DOWLING, NE., "Mechanical Behavior of Materials Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue", 2nd, Prentice Hall International Edition, USA-Mexico-Canada, 1999.
3. ASHBY, M., SHERCLIFF, H., CEBON, D., "Materials Engineering, Science, Processing and Design", Butterworth-Heinemann Elsevier, UK, 2007.
4. DIETER, GE., "Materials Selection and Design", ASME Handbook, Vol. 20, USA, 1997.