



TINJAUAN STAINLESS STEEL SEBAGAI BAHAN MEKANIK REAKTOR DAYA

Hendra Prihatnadi, S.ST, Ir. Budi Santoso

PRPN – BATAN, Kawasan Puspiptek, Gedung 71, Lt. 2, Serpong, Tangerang, Banten, 15310,
Telp. (021) 7560896, Faks. (021) 7560928.

ABSTRAK.

TINJAUAN STAINLESS STEEL SEBAGAI BAHAN MEKANIK REAKTOR DAYA. Dalam suatu sistem reaktor nuklir yang meliputi bejana tekan, penyangga komponen-komponen utama, pemipaan sistem pendingin serta selongsong bahan bakar, mempunyai persyaratan-persyaratan material yang berlainan dan berbeda sesuai dengan tipe reaktor. Secara khusus persyaratan material reaktor daya tersebut meliputi syarat fisik atau mekanik dan persyaratan nuklir material. Stainless steel merupakan baja tahan karat austenitik, yang terdiri dari paduan logam Fe dan Cr dan Ni yang memberikan sifat mekanik yang baik dan ketahanan terhadap korosi pada temperatur yang tinggi.

Kata kunci : persyaratan material, reaktor daya, Stainless steel.

ABSTRACT.

A REVIEW OF STAINLESS STEEL AS MECHANICAL MATERIAL IN POWER REACTOR. In a nuclear reactor system that includes pressure vessel, stands on major components, piping and cooling system of fuel cladding, it has different requirements materials for different different type of reactor. In particular, material requirements power reactors include physical or mechanical conditions and requirements for nuclear material. Stainless steel is an austenitic stainless steel, metal alloys consisting of Fe and Cr and Ni which provide good mechanical properties and corrosion resistance at high temperatures.

Keywords: material requirements, the reactor power. Stainless steel.

1. PENDAHULUAN

Dilihat dari pendingin yang digunakan, reaktor daya dapat digolongkan menjadi reaktor pendingin air, reaktor pendingin gas, dan reaktor pendingin logam cair. Reaktor pendingin air, dibagi menjadi dua tipe, yaitu Reaktor Air Ringan (*Light Water Reactor, LWR*) dan Reaktor Air Berat (*Heavy Water Reactor, HWR*). Selanjutnya reaktor air ringan (*LWR*) dibagi menjadi dua jenis, yaitu Reaktor Air Didih (*Boiling Water Reactor, BWR*) dan Reaktor Air Tekan (*Pressurized Water Reactor, PWR*). Dua tipe reaktor air ringan inilah yang banyak beroperasi di dunia dan memasok kebutuhan energi listrik dunia hingga mencapai 371,9 GWe ($\pm 17\%$ dari kebutuhan listrik dunia.)

Beberapa hal yang masih menjadi ganjalan dalam program PLTN di Indonesia adalah masih adanya isu di masyarakat yakni : tentang keselamatan, dampak radiasi , dan limbah yang dihasilkan dari suatu PLTN. Keselamatan menjadi perhatian serius mengingat peristiwa dua buah kecelakaan monumental dunia yang terjadi pada PLTN yakni reaktor *Three Mile Island (TMI)* unit 2 dan reaktor Chernobyl membawa dampak terhadap masyarakat dan lingkungan. Dua peristiwa tersebut menjadi pembelajaran bagi para perancang PLTN karena kecelakaan tersebut disebabkan oleh adanya cacat rancangan (*design*) di samping adanya faktor manusia yakni pelanggaran prinsip-prinsip keselamatan. Dengan kata lain, "*engineered safety*", atau pencegahan kecelakaan dengan kontrol reaktor



dan sistem keselamatan teknis tidaklah cukup, tantangannya adalah mendesain reaktor dengan “*inherent safety*” yang dijamin oleh hukum alam.^[1]

Adapun latar belakang penulisan makalah ini adalah untuk menambah pengetahuan mengenai persyaratan dan dasar pertimbangan pemilihan material sebagai langkah awal perencanaan desain reaktor daya dengan mempelajari sifat dan karakteristik bahan digunakan. Serta ruang lingkup pembahasan pada makalah ini meliputi tinjauan persyaratan material reaktor khususnya bahan material stainless steel sebagai bahan material pada reaktor daya.

2. PERSYARATAN MATERIAL REAKTOR

Dalam membuat rancangan (*design*), baik rancangan pemipaan atau rancangan suatu *equipment* reaktor daya, karakteristik material yang akan dirancang sangat penting untuk diperhatikan untuk menghindari cacat rancangan. Dalam pemilihan material suatu instalasi sistem reaktor diperlukan persyaratan-persyaratan yang secara khusus menjadi bahan pertimbangan dalam menentukan rancangan instalasi reaktor terkait segi keamanan dan kalayakannya. Kebutuhan utama suatu rancangan komponen sistem reaktor yang meliputi struktur, kelongsong, dan material pemipaan harus memperhatikan dasar pertimbangan sebagai berikut:

1. Material diijinkan bekerja pada tekanan tinggi baik tegangan tarik dan tekan.
2. Material harus tahan korosi dan perpindahan massanya melalui pendingin
3. Minimum terhadap kecelakaan nuklir dengan kata lain mempunyai kestabilan dimensi, seminimal mungkin dapat mengurangi konduktivitas thermal, dan minimal kerugian pada kekuatan tarik dan keuletan
4. Baik untuk sistem aliran panas dan dingin serta dapat menahan *shock thermal*.
5. Material mempunyai karakteristik yang baik untuk pengerjaan difabrikasi; mampu dikerjakan dengan pengelasan, pekerjaan mesin, mampu mengendalikan panas dan tahan terhadap tekanan.
6. Ketersediaan material dan kesesuaian harga^[2]

Selain persyaratan fisik atau persyaratan mekanik tersebut diatas, syarat nuklir dari material suatu reaktor daya harus memuaskan. Ada dua aspek dari interaksi neutron dengan inti atom yang harus dipertimbangkan, produksi dari radioaktif yang ditimbulkan, dan efek penyerapan neutron. Persyaratan yang penting bagi suatu material yang digunakan dalam inti suatu reaktor *thermal* adalah material yang mempunyai penyerapan penampang lintang (*cross section*) yang kecil terhadap neutron. Dalam suatu instalasi reaktor nuklir keberadaan berbagai macam radiasi harus diperhitungkan dalam pemilihan bahan yang akan digunakan didalam suatu lingkungan instalasi nuklir. Jadi ada dua persyaratan yang harus dipertimbangkan sebagai calon bahan material nuklir, yaitu syarat-syarat dibidang keteknikan umumnya dan syarat sebagai bahan nuklir. Ukuran dari syarat bahan nuklir tersebut biasanya disajikan dalam suatu pengertian penampang lintang (*cross section*). Pengertian dari tampang lintang tersebut adalah keboleh jadian untuk terjadinya suatu reaksi, baik itu reaksi serapan, hamburan, ataupun reaksi tangkapan. Pemilihan syarat nuklir tersebut tergantung dimana lokasi material yang akan digunakan pada instalasi reaktor nuklir. Hal tersebut harus memenuhi dua syarat, yaitu nuklir dan non nuklir, sehingga material tersebut tetap mampu menjaga integritas dengan lingkungan sekitar sepanjang masa dipakai.^[3]

3. MATERIAL REAKTOR DAYA

Suatu sistem reaktor nuklir yang meliputi bejana tekan (*pressure vessel*) dari reaktor berpendingin air, penyangga komponen-komponen utama, serta pemipaan sistem pendingin reaktor dan kelongsong elemen bahan bakar (*cladding*), mempunyai persyaratan-persyaratan material yang berlainan dan berbeda sesuai dengan tipe reaktor. Persyaratan



khusus yang perlu diperhatikan dari material suatu reaktor daya meliputi syarat fisik atau mekanik dan persyaratan nuklir material.^[4]

Pada Tabel-1 dipaparkan zirkaloy yang digunakan sebagai kelongsong pada berbagai tipe reaktor saat ini. Reaktor yang menggunakan kelongsong zirkaloy ialah reaktor air bertekanan (*pressurized water reaktor*, PWR), reaktor air mendidih (*boiling water reaktor*, BWR), reaktor air berat bertekanan (*pressurized heavy water reaktor*, PHWR), dan reaktor gas-air ringan (*light water cooled graphite moderated reaktor*, LWGR). Sedangkan *Advanced Gas-cooled Reactor* (AGR) menggunakan stainless steel jenis 20 dan 25. Reaktor jenis *Light Metal Fast Breeder Reactor* (LMFBR) menggunakan kelongsong stainless steel 316.

Tabel 1. Material kelongsong bahan bakar nuklir dan jenis reaktor

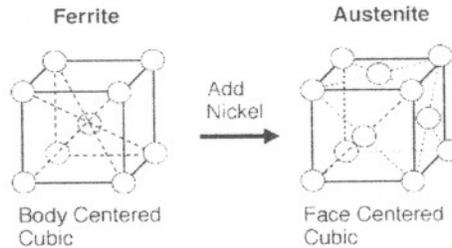
Tipe reaktor	PWR	BWR	PHWR	LWGR	AGR	LMFBR
Pendingin/moderator	H ₂ O/H ₂ O	H ₂ O/H ₂ O	D ₂ O/D ₂ O	H ₂ O/C	CO ₂ /C	Na/None
Kelongsong	Zry-4	Zry-2	Zry-4	Zr/Nb	20/25SS	316SS
Suhu kelongsong, °C	349	390	330	290	825	620
BU, GWd/t(U)	42	33	8.5	18	18	100

Dua jenis reaktor yang banyak dioperasikan sekarang, yaitu PWR dan BWR, dioperasikan pada temperatur dan tekanan tinggi sehingga produk radiolisis banyak terjadi seperti O₂ dan H₂O akibatnya air reaktor bersifat oksidatif. Kondisi ini membuat material dan struktur reaktor yang berada di lingkungan air reaktor menjadi rentan terhadap korosi terutama korosi IGSCC (*Intergranular Stress Corrosion Cracking*). Problem korosi menyebabkan berkurangnya ketersediaan dan efisiensi instalasi, meningkatkan biaya operasi dan pemeliharaan serta meningkatkan paparan radiasi pada personil reaktor PWR. Kontrol kimia air memainkan peran penting dalam mengurangi korosi material seperti; pembangkit uap, komponen reaktor, kelongsong bahan bakar dan sistem perpipaan. Korosi juga akan menambah waktu dan frekuensi perbaikan instalasi. Selain itu produk korosi yang terbentuk merupakan sumber paparan radiasi bagi karyawan saat perawatan dan perbaikan instalasi. Tuntutan untuk lebih kompetitif menyebabkan utilitas berusaha mengurangi biaya operasional dan pemeliharaan. Korosi merupakan kontributor utama dalam meningkatkan biaya operasional dan pemeliharaan (*Operation & Maintenance*) sehingga utilitas berusaha untuk mencari solusi yang efektif menangani masalah korosi.^[5]

4. KARAKTERISTIK PEMBENTUKAN AUSTENITIK PADA STAINLESS STEEL

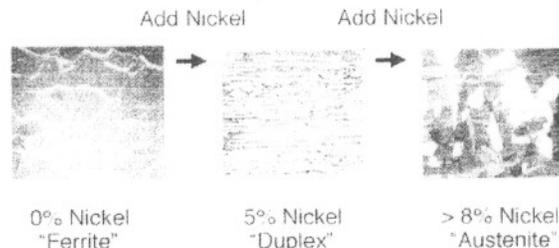
Berdasarkan struktur mikro mereka, baja tahan karat dibagi ke dalam kelompok sebagai, austenitik, feritik, martensit, duplex, presipitasi hardenable. Pembagian kelompok berdasarkan struktur mikro memiliki sifat fisik dan mekanik yang sama. Namun, properti untuk satu kelompok berbeda dari properti untuk kelompok lain. Misalnya, baja tahan karat austenitik adalah non-magnetik, sedangkan stainless steel dan duplex feritik bersifat magnetis. Perbedaan antara kelompok tersebut merupakan dasar pada tingkat atom. Susunan atom dalam kristal ferit berbeda dari satu di kristal austenitik.

Dalam stainless steel feritik, atom besi dan kromium disusun pada sudut-sudut kubus dan di pusat kubus itu. Pada baja tahan karat austenitik atom, di sini besi, kromium dan nikel, diatur pada sudut-sudut kubus dan di tengah setiap wajah kubus. Perbedaan ini kelihatan begitu kecil sangat mempengaruhi sifat dari baja.



Gambar 1: stainless steel feritik di sebelah kiri memiliki *body centered cubic* (bcc) struktur kristal. Dengan menambahkan nikel untuk stainless steel ini perubahan struktur dari bcc menjadi *face centered cubic* (fcc) yang biasa disebut austenitik.

Karena sifat mekanik baik dan mudah difabrikasi, baja tahan karat austenitik jauh lebih banyak digunakan dari baja tahan karat feritik. Sekitar 75% dari seluruh stainless steel digunakan di seluruh dunia adalah austenitik dan sekitar 25% adalah feritik. Kelompok lainnya, martensit, duplex dan baja *stainless hardenable* masing-masing mewakili kurang dari 1% dari total pasar.



Gambar 2: Menambahkan 8% nikel kromium ke baja stainless feritik membuat austenitik stainless steel chromium-nikel, misalnya Tipe 304 stainless steel. Jika nikel kurang ditambahkan ke baja kromium, sekitar empat atau lima persen, struktur dupleks, campuran austenit dan ferrit, diciptakan seperti dalam 2205 baja tahan karat dupleks.

Molybdenum adalah pembentuk ferit. Itu berarti bahwa ketika molibdenum ditambahkan untuk meningkatkan ketahanan korosi dari baja stainless austenitik, harus ada sebuah austenit pembentuk seperti nikel atau nitrogen ditambahkan untuk menjaga struktur austenitik. Baja tahan karat Duplex memiliki campuran butir austenitik dan feritik dalam mikro mereka, maka mereka memiliki "duplex" struktur. Efek ini dicapai dengan menambahkan nikel kurang dari yang diperlukan untuk membuat sepenuhnya austenitik *stainless steel*.^[9]

5. STAINLESS STEEL SEBAGAI BAHAN MEKANIK PADA REAKTOR DAYA

Stainless steel merupakan baja tahan karat austenitik dan feritik, yang terdiri dari paduan logam Fe dan Cr dan Ni yang memberikan sifat mekanik yang baik dan ketahanan terhadap korosi pada temperatur yang tinggi. Beberapa unit yang sudah terpasang menggunakan tekanan uap superkritis, dimana tekanannya lebih dari 22,1MPa, akan tetapi titik volume jenis uap air dan air adalah sama. Jadi tekanan uap utama untuk unit yang lebih besar terletak di antara 10,0 MPa dan daerah superkritis. Temperatur uap utama mungkin dapat mencapai lebih dari 566 °C, yang mensyaratkan peningkatan *steam line* utama sebagai peningkatan temperatur terhadap material, seperti yang tercantum dalam rekomendasi berikut:



- Temperatur sampai 413°C - Carbon steel,
- Temperatur sampai 510°C menggunakan 1^{1/4} Cr,
- Temperatur dari 510°C sampai 566°C menggunakan 2^{1/4} Cr,
- Temperatur dari 540°C sampai 650°C mempertimbangkan penggunaan 9-12 Cr,
- Temperatur dari 566°C sampai 650°C mempertimbangkan penggunaan Stainless steel austenitik
- Temperature diatas 650°C menggunakan Stainless steel austenitik. [6]

Komposisi dari stainless steel austenitik yang telah di aplikasikan pada sistem reaktor nuklir diberikan pada tabel 3. Stainless steel mempunyai struktur atom kubik dengan karbon dalam susunan padat bercelah. Stainless steel austenitik tahan terhadap korosi dan memiliki daya mekanik yang baik, akan tetapi ada beberapa degradasi sebagai akibat terkena neutron cepat. Daya mekanik tidak berubah dari type yang satu ke type lain. Daya mekanik stainless steel austenitik secara khusus dalam kondisi pengujian dalam keadaan dingin (*annealed*) diberikan pada tabel 4. Daya mekanik stainless steel austenitik dapat dinaikan oleh pengerjaan dingin. Dan hasil kekuatan *tensile* mempunyai suhu yang cukup untuk pengoperasian reaktor-reaktor cepat.

Stainless steel austenitik digunakan pada komponen-komponen reaktor berpendingin air meliputi: pipa, pompa, batang inti (selongsong) dan pelindung thermal. Di sebagian reaktor daya awalnya stainless steel austenitik digunakan sebagai penutup batang bahan bakar meskipun bagian tampang lintang (*cross section*) neutron thermal-nya lebih besar dari bahan sejenisnya. Saat ini stainless steel dipilih sebagai kelongsong bahan bakar pada reaktor nuklir cepat berpendingin sodium dikarenakan pada reaktor ini penyerapan tampang lintang (*cross section*) yang terjadi tidak sepeenting pada reaktor *thermal*.

Tabel 3. Standar type mengacu pada AISI *American Iron and Steel Institute*.

AISI TYPE	CARBON (MAX %)	CHROMIUM (%)	NIKEL (%)	ELEMEN LAIN
304	0,08	18 s/d 20	8 s/d 11	-
304L	0,03	18 s/d 20	8 s/d 11	-
309S Nb	0,08	22 s/d 26	12 s/d 15	Nb(Min.8xC)
316	0,10	16 s/d 18	10 s/d 14	Mo(2% s/d 3%)
316L	0,08	16 s/d 18	10 s/d 14	Mo(1,75% s/d 2,5%)
317	0,08	17 s/d 19	17 s/d 19	Nb(Min.10xC)

Stainless steel yang meliputi type 405, 430, dan 460, tidak mengandung nikel tetapi ada sekitar 1% berat mangan dan silikon. Stainless steel feritik hanya diaplikasikan untuk ketahanan terhadap kimia pada kondisi sedang, tetapi mempunyai koefisien muai yang rendah dan konduktivitas panas lebih tinggi, seperti dibanding dengan stainless steel austenitik yang dikehendaki. Stainless steel feritik lebih mudah disambung serta tidak mudah retak karena tekanan atau erosi.

Tabel 4. Daya mekanik stainless steel austenitik

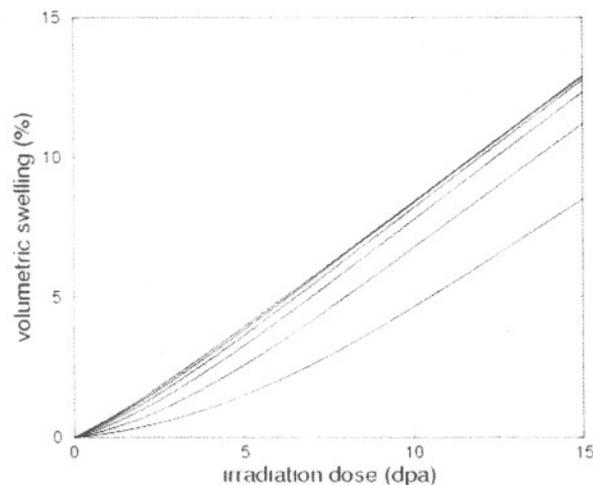
1. Kekuatan Tarik	:	515 MPa
2. Kekuatan Mulur	:	205 Mpa
3. Pemanjangan	:	40 %
4. Reduksi Luas	:	50 %
5. Modulus Elastisitas	:	200 Gpa
6. Poisson's Ratio	:	0,29



Secara umum stainless steel telah sesuai dengan kriteria pemilihan bahan dan pengoperasian sistem reaktor, akan tetapi permasalahan lain yang harus dipertimbangkan berupa pembengkakan (*swelling*). *Swelling* yang diakibatkan oleh radiasi secara signifikan dapat dikurangi, seperti *swelling* yg terjadi pada stainless steel type 316. [3][4]

Kerusakan Iradiasi dalam logam mengarah pada pembentukan kekosongan, dengan *swelling* terkait volumetrik material. *Swelling* dapat membatasi kegunaan material secara struktural yang di gunakan dalam lingkungan reaktor. Kekosongan pembengkakan dapat mengembangkan lebih dari waktu yang sangat lama, sehingga berguna untuk memahami, di muka, parameter yang mengontrol pembengkakan perilaku di bawah iradiasi.

Sebagai contoh pada grafik simulasi (Gambar 3) menunjukkan singkat periode inkubasi, yang meningkatkan durasi pada temperatur yang lebih rendah. Selanjutnya, tingkat pembengkakan pada temperatur yang berbeda adalah sebanding, sekitar 0,85% / dpa.



Gambar 3 volumetrik *swelling*, $\Delta V / V$ dalam persen, versus dosis radiasi total untuk baja, 316 jenis stainless murni. Tingkat dosis 10^{-6} dpa / s; kepadatan dislokasi awal adalah $6 \times 10^{13} \text{ m}^{-2}$. Berbagai kurva sesuai dengan suhu 340°C sampai 540°C dengan penambahan sebesar 40°C . [7]

5. KESIMPULAN

Ditinjau dari persyaratan mekanik dan persyaratan nuklir dari material suatu reaktor daya stainless steel merupakan baja tahan karat austenitik dan feritik, yang terdiri dari paduan-paduan logam yang memberikan sifat mekanik yang baik dan ketahanan terhadap korosi pada temperatur yang tinggi. Temperatur uap mungkin dapat mencapai lebih dari 650°C di rekomendasikan menggunakan Stainless steel austenitik. Karena sifat mekanik baik dan mudah difabrikasi, baja tahan karat austenitik jauh lebih banyak digunakan dari baja tahan karat feritik. Sekitar 75% dari seluruh stainless steel digunakan di seluruh dunia adalah austenitik dan sekitar 25% adalah feritik. Untuk membuat austenitik stainless steel chromium-nikel yaitu dengan menambahkan 8% nikel kromium ke baja stainless feritik.

Stainless steel austenitik digunakan pada komponen-komponen reaktor berpendingin air meliputi: pipa, pompa, batang inti (selongsong) dan pelindung thermal. Di sebagian reaktor daya awalnya stainless steel austenitik digunakan sebagai penutup batang bahan bakar meskipun bagian tampang lintang (*cross section*) neutron thermal-nya lebih besar dari bahan sejenisnya.

Secara umum stainless steel telah sesuai dengan kriteria pemilihan bahan dan pengoperasian sistem reaktor, akan tetapi permasalahan lain yang harus dipertimbangkan *swelling* (pembengkakan) akibat iradiasi, semakin kecil persentase *swelling* semakin baik ketahanan material terhadap dosis iradiasi.



6. DAFTAR PUSTAKA

1. NUR TRI HARJANTO, Penerapan Konsep Pertahanan Berlapis dan Penghalang Ganda pada Sistem Keselamatan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (Seminar Pengelolaan Perangkat Nuklir Tahun 2008, Serpong 29 Juli 2008), Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Bahan Bakar Nuklir, Badan Tenaga Nuklir Nasional, Serpong (2008) 155.
2. HENRY C. SCHWENK; ROBERT H SHANNON, Nuclear Power Engineering, New York, 1957
3. SAMUEL GLASTON; ALEXANDER SESONKO, Nuclear Reactor Engineering, Third Edition 1998
4. BENYAMIN, MM, MA, Nuclear Reactor Material and Application, VNR, Comp, 1983
5. SUGONDO, Peranan Pemadu Sn, Fe, Cr, Nb, dan Mo Dalam Zirkaloi, URANIA No 41/ Thn.XI/Januari 2005 6-12
6. DANIEL A. VAN DUYNE, P.E., Steam Systems Piping, Chapter C3, Massachusetts
7. M. P. SURH, J. B. STURGEON, W. G. WOLFER, The Incubation Period for Void Swelling and its Dependence on Temperature, Dose Rate, and Dislocation Structure Evolution, West Conshohocken, PA, 2003
8. <http://www.imoa.info>

TANYA JAWAB

Pertanyaan :

1. SS sebagai bahan mekanik reaktor daya, SS apa yang dipilih (Sanda, ST)
2. SS jenis apa dan aplikasinya dimana, harus dijelaskan (Dr. Sutomo Budihardjo, Meng)

Jawaban :

1. Pada SS tipe 316, swelling yang diakibatkan oleh radiasi dapat dikurang
2. Seperti pada tabel 1, material kelongsong bahan bakar nuklir dan reaktor. Dalam tabel tersebut diperlihatkan seperti ss type 20 atau 25 digunakan untuk bahan kelongsong, pada reaktor daya AGR, type 316 SS juga digunakan pada reaktor daya LMFBR.