

OPTIMASI DISAIN UNTUK MENEKAN DIMENSI DAN BERAT MODUL KONTAINER PERISAI RADIASI PADA PERANGKAT BRAKITERAPI

Ari Satmoko, Kristiyanti, Tri Harjanto, Atang Susila

Pusat Rekayasa Fasilitas Nuklir - BATAN
satmoko@batan.go.id

ABSTRAK

OPTIMASI DISAIN UNTUK MENEKAN DIMENSI DAN BERAT MODUL KONTAINER PERISAI RADIASI PADA PERANGKAT BRAKITERAPI. Hingga tahun 2013, PRFN - BATAN telah menghasilkan prototip awal perangkat brakiterapi untuk terapi kanker servik. Perangkat brakiterapi didisain menggunakan sumber isotop Iridium-192 dengan aktivitas hingga 10 Curie. Hasil evaluasi lebih lanjut menunjukkan bahwa prototip awal tersebut terlalu besar dan berat. Untuk memperbaiki prototip tersebut, telah dilakukan optimasi disain. Komponen yang memberikan kontribusi berat adalah modul kontainer perisai radiasi yang dibuat dari bahan timbal. Disain prototip awal tersebut membutuhkan bahan timbal sekitar 61 kg. Dalam optimasi disain ini, telah dilakukan pengembangan dengan cara merevisi bentuk dan mengganti bahan perisai radiasi. Bentuk yang awalnya berupa silinder murni dirubah menjadi silinder dengan ujung menyerupai bola. Hal ini berakibat pada pengurangan volume. Sedangkan bahan timbal diganti dengan bahan campuran tungsten-timbal. Dengan kombinasi kedua cara tersebut, radius silinder dapat diperkecil dari 9 cm menjadi 7,2 cm dan berat bahan perisai radiasi dapat diturunkan hingga menjadi 32,0 kg.

Kata kunci : optimasi, disain, brakiterapi, timbal, tungsten

ABSTRACT

DESIGN OPTIMIZATION FOR REDUCING THE DIMENSION AND WEIGHT OF THE RADIATION SHIELDING CONTAINER ON THE BRACHYTHERAPY EQUIPMENT. Up to 2013, PRFN - BATAN has produced an initial prototype of brachytherapy equipment for cervical cancer treatment. The equipment is designed for Iridium-192 isotope source with an activity of up to 10 Curies. A detail evaluation indicates that the initial prototype was too big in size and too heavy in weight. To improve the lead based prototype, the design is optimized. The component contributing to the weight is container module as radiation shielding. The initial prototype design needs about 61 kg lead material. The design optimization was developed by revising the shape and by substituting shielding material. The shape that was initially in pure cylinder then converted to cylinder with its tips resembling ball. This results in a reduction in volume. Meanwhile, the lead material is substituted with the mixture of tungsten-lead. By combining both methods, the radius of the cylinder can be reduced from 9 cm to 7.2 cm, and the weight of radiation shielding materials can be reduced by up to 32.0 kg.

Key words : optimization, design, brachytherapy, lead, tungsten

PENDAHULUAN

Salah satu metode pengobatan kanker servik adalah dengan teknik brakiterapi melalui penyinaran radioaktif untuk mematikan sel-sel kanker. Namun karena hampir semua peralatan brakiterapi didatangkan melalui impor luar negeri, maka biaya terapi masih relatif mahal. Akibatnya, belum banyak pasien yang tersentuh dengan teknologi ini. Untuk mengurangi ketergantungan dari luar negeri, maka dilakukan pengembangan peralatan brakiterapi yang berbasis pada kandungan lokal dalam negeri. Selain sumber isotop Ir-192 yang diharapkan dapat dipasok oleh Reaktor Serba Guna GA. Siwabessy di Serpong, komponen lain juga diharapkan mampu diproduksi di dalam negeri. Kehadiran peralatan brakiterapi dengan kandungan lokal yang tinggi dipastikan dapat menekan biaya terapi kanker servik.

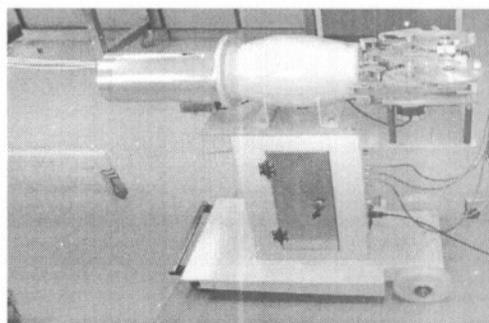
Hingga tahun 2013, PRFN - BATAN telah menghasilkan prototip awal perangkat brakiterapi untuk sumber isotop Iridium-192 beraktivitas hingga 10 Curie [1]. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa kinerja prototip awal ini masih perlu disempurnakan. Mulai tahun 2014, program pengembangan perangkat brakiterapi kembali digulirkan. Salah satu permasalahan dari prototip awal ini adalah bentuk umum yang terlalu besar dan berat.

Secara umum bagian mekanik prototip awal perangkat brakiterapi terdiri dari beberapa modul: modul penggerak sumber, modul kontainer sumber, modul distributor channel, modul transfer tube, modul aplikator, dan modul penyangga (Gambar 1). Komponen yang memberikan kontribusi berat adalah modul kontainer sebagai perisai radiasi dengan bahan timbal.

Berbagai kajian telah dilakukan dalam rangka mengganti bahan timbal. Bahan tungsten menjadi alternatif karena densitasnya mencapai $19,2 \text{ gr/cm}^3$. Dengan menggunakan bahan tungsten ini, ketebalan modul kontainer dapat direduksi menjadi hanya 6,0 cm [2]. Namun demikian teknologi untuk mendapatkan bahan tungsten murni

membutuhkan proses sintering pada suhu hingga 4000°C . Di samping itu, tungsten pejal juga susah dibentuk karena kesulitan proses *machining*. Pengadaan bahan tungsten dengan dimensi khusus cenderung dipenuhi dari pasar luar negeri.

Meski sama-sama diimpor, serbuk tungsten murni jauh lebih mudah diperoleh dibandingkan dengan tungsten pejal murni. Dalam makalah ini, bahan campuran serbuk tungsten dan timbal menjadi bahan alternatif yang dipelajari dengan ide utama mengisi rongga-rongga antar serbuk tungsten dengan bahan timbal (Pb). Usaha lain untuk menurunkan berat juga dilakukan dengan modifikasi bentuk disain.



Gambar 1. Prototip awal perangkat brakiterapi

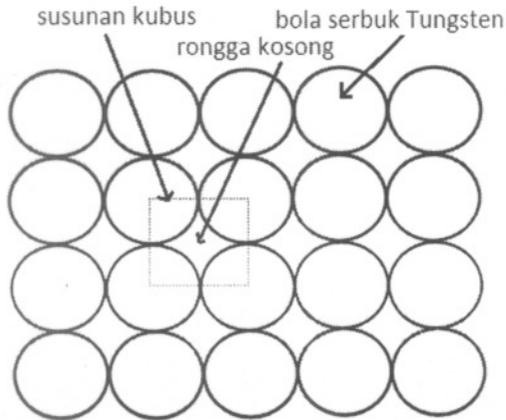
METODOLOGI

Kegiatan optimasi disain ini terbagi ke dalam dua bagian, yaitu revisi bentuk disain dan penggantian bahan timbal dengan campuran tungsten-timbal. Revisi bentuk disain hanya meliputi modifikasi bentuk dengan menekankan pada efisiensi material.

Sedangkan penggunaan bahan baru berasumsi bahwa serbuk tungsten dapat dicampur dengan timbal. Campuran antara kedua material membentuk bahan komposit tanpa ada reaksi kimia antara kedua unsur tersebut. Beberapa asumsi dalam campuran bahan ini adalah sebagai berikut:

- serbuk tungsten dianggap berbentuk bola dengan diameter yang seragam.
- bola-bola serbuk tungsten membentuk susunan kubus sederhana yang seragam dalam segala arah (lihat Gambar 2).
- rongga di antara bola-bola serbuk tungsten terisi penuh oleh timbal.

- tidak ada udara yang tertangkap di antara rongga-rongga bola.
- nilai densitas dan koefisien atenuasi linear untuk bahan tungsten (W) dan timbal (Pb) ditunjukkan dalam Tabel 1.



Gambar 2 Pemodelan struktur campuran serbuk tungsten - timbal

Tabel 1. Karakteristik W dan Pb [4]

Besaran	Tungsten (W)	Timbal (Pb)
Densitas, ρ (gr/cm ³)	19.25	11.34
Koefisien atenuasi linear, μ (cm ⁻¹)	2,1095	1,4152

Sumber isotop Ir-192 memancarkan beberapa macam energi sinar gamma (γ) seperti pada Tabel 2. Namun demikian hanya energi 0,604 MeV yang diperhitungkan dalam kajian ini karena energi inilah yang berpengaruh pada keselamatan radiasi [3].

Radiasi gamma yang dipancarkan oleh sumber Ir-192 akan diserap oleh bahan kontainer sesuai dengan persamaan berikut [5]:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu t} \dots\dots\dots (1)$$

di mana

- I_0 : intensitas radiasi mula-mula
- I : intensitas radiasi pada jarak t
- μ : koefisien atenuasi linier
- t : tebal bahan

Tabel 2. Energi yang dipancarkan Ir-192

Energi	Prosentase
--------	------------

(Mev)	(%)
0,296	30
0,308	29
0,316	83
0,468	53
0,588	6
0,604	12
0,613	7

Untuk material yang berbeda, perhitungan ketebalan dapat dilakukan dengan menggunakan kesetaraan daya serap sebagaimana ditunjukkan dalam persamaan berikut :

$$\mu_1 \cdot t_1 = \mu_2 \cdot t_2 \dots\dots\dots (2)$$

di mana indeks 1 menunjukkan material acuan dan indeks 2 menunjukkan material pengganti. Untuk material yang terdiri dari unsur tunggal, data tentang μ telah tersedia di banyak pustaka. Namun untuk material yang merupakan campuran dua atau lebih unsur, perkiraan μ dapat menggunakan persamaan berikut [5]:

$$\mu_{camp} = \rho_{camp} \cdot (w_1 \cdot (\mu/\rho)_1 + w_2 \cdot (\mu/\rho)_2) \dots\dots\dots (3)$$

di mana w_i adalah fraksi berat senyawa dan $(\mu/\rho)_i$ adalah koefisien atenuasi linear massa unsur. Sedangkan densitas campuran diperoleh dengan persamaan berikut [5]:

$$\rho_{campuran} = \rho_1 \cdot v_1 + \rho_2 \cdot v_2 \dots\dots\dots (4)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bahan timbal telah digunakan sebagai bahan utama perisai radiasi untuk modul kontainer pada prototip awal perangkat brakiterapi yang telah dikembangkan oleh PRFN [1]. Dalam perhitungan disain, ketebalan timbal minimum yang dibutuhkan adalah 9 cm. Nilai ketebalan timbal ini menjadi referensi dalam penentuan ketebalan bahan campuran serbuk tungsten-timbal.

Dengan disain ketebalan 9 cm, berat total bahan timbal sebagai perisai radiasi adalah sekitar 61 kg. Namun karena keterbatasan anggaran, proses pengadaan prototip awal harus direvisi. Fabrikasi kontainer perisai radiasi menggunakan

bahan-bahan ataupun komponen yang telah ada di bengkel. Diameter pembungkus sekaligus sebagai wadah penuangan timbal yang dilelehkan menjadi lebih besar. Hingga akhirnya, dalam prototip awal tersebut, berat timbal sebagai bahan radiasi yang digunakan adalah sekitar 80 kg.

Usaha untuk menekan berat perisai radiasi dilakukan dengan dua cara. Cara pertama menggunakan bahan alternatif selain timbal. Cara kedua dilakukan dengan optimasi disain bentuk.

Penggunaan bahan alternatif

Tungsten diyakini mampu menurunkan berat kontainer perisai radiasi karena mempunyai densitas yang tinggi sekitar 19,2 gram/cm³. Namun karena terbentur permasalahan teknologi yang sulit, penggunaan bahan tungsten pejal murni dikesampingkan. Sebagai alternatifnya, serbuk tungsten menjadi pilihan.

Serbuk tungsten diasumsikan sebagai bola-bola yang membentuk susunan kubus sederhana. Bentuk bola menyebabkan ruang kosong di antara bola-bola. Bila jari-jari bola adalah r , maka volume kubus (V_{kubus}) menjadi:

$$V_{kubus} = 8 r^3 \dots\dots\dots (5)$$

Kubus tersebut terisi tungsten padat sebanyak 8 kali 1/8 bola atau setara dengan sebuah bola dengan volume bola (V_{bola}) sebesar:

$$V_{bola} = (4/3) * \pi * r^3 \dots\dots\dots (6)$$

Jika rongga antar bola berisi udara, maka rasio V_{bola} dan V_{kubus} menjadi 0,524. Dengan struktur seperti ini densitas serbuk Tungsten yang dipadatkan menjadi hanya 10,053 gr/cm³. Densitas ini kurang menarik bila dibandingkan dengan timbal yang mempunyai densitas 11,34 gr/cm³.

Bila rongga kubus diisi dengan timbal, maka dipastikan densitas struktur bahan campuran menjadi lebih tinggi bila dibandingkan kosong karena udara. Dengan memasukkan nilai-nilai parameter untuk

tungsten dan timbal pada persamaan 4 maka diperoleh densitas campuran sebesar 15,77 gr/cm³.

Selanjutnya, koefisien atenuasi linear campuran diperoleh dengan menggunakan persamaan 3 sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \mu_{camp} &= 15,77 * (0,524 * 0,110 + 0,476 * 0,125) \\ &= 1,779 \text{ cm}^{-1} \end{aligned}$$

Untuk dapat digunakan sebagai perisai radiasi, bahan campuran ini harus mempunyai ketebalan mencukupi. Dengan menggunakan Persamaan 2, ketebalan bahan campuran dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \mu_{Pb} \cdot t_{Pb} &= \mu_{campuran} \cdot t_{campuran} \\ \Leftrightarrow 1,4152 * 9 &= 1,779 * t_{campuran} \\ \Leftrightarrow t_{campuran} &= 7,161 \text{ cm} \end{aligned}$$

Dengan demikian ketebalan minimum yang dibutuhkan untuk campuran serbuk tungsten dan timbal adalah 7,161 cm atau dibulatkan menjadi 7,2 cm.

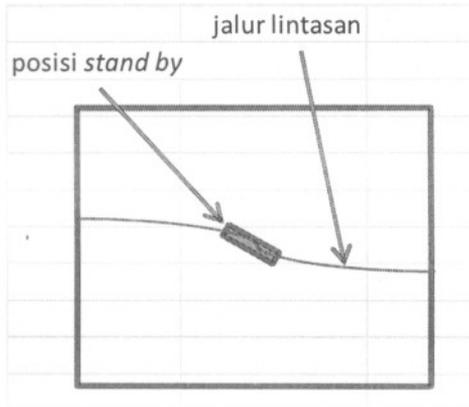
Optimasi disain bentuk

Dalam disain prototip awal, bahan timbal sebagai perisai radiasi disusun dalam bentuk silinder dengan ketebalan sesuai hasil perhitungan yaitu 9 cm. Gambar 3 menunjukkan prinsip kerja. Dalam keadaan *stand by*, sumber isotop berada dalam posisi miring. Untuk memudahkan fabrikasi, bentuk luar kontainer menjadi silinder. Diameter kontainer perisai radiasi perlu dikompensasi. Akibatnya, terdapat penambahan material yang sebenarnya tidak perlu.

Di sekitar pusat silinder terdapat dua buah *tube stainless steel* sebagai tempat lintasan untuk masing-masing seling sumber dan seling *checker*. Tinggi atau panjang silinder sama dengan diameter.

Untuk mengurangi berat kontainer, disain bentuk direvisi. Hasil optimasi bentuk disain modul kontainer perisai radiasi ditunjukkan pada Gambar 4. Bentuk volume kontainer dibagi ke dalam tiga bagian. Bagian tengah berbentuk silinder karena sumber isotop juga berbentuk silinder.

Bagian ini ditutup oleh bagian kiri dan kanan secara simetris. Tutup berbentuk bola dengan radius mengikuti ketebalan minimum hasil perhitungan sebelumnya.



Gambar 3. Gambar kontainer prototip awal

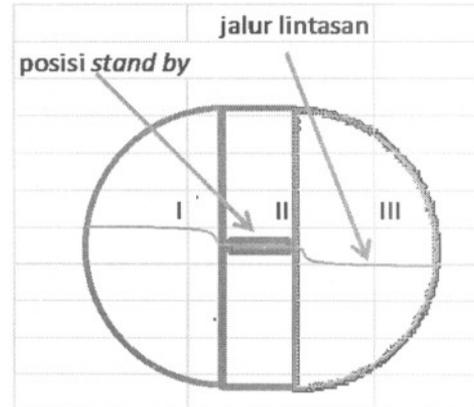
Memodifikasi model lama, posisi sumber isotop dalam keadaan *stand by* adalah horizontal. Namun sebagai akibatnya lintasan *tube* berbentuk belokan menjadi lebih banyak. Aspek keselamatan juga diperhatikan dengan mendisain belokan bagian kiri lebih tajam dibandingkan bagian kanan. Hal ini akan mengakibatkan batang sumber hanya dapat didorong keluar melalui bagian kanan, namun tidak dapat ditarik keluar melalui bagian kiri. Hal ini mengurangi potensi kesalahan pengoperasian jika seling sumber ditarik melewati batas yang diperbolehkan.

Perkiraan berat

Berat kontainer perisai radiasi pada prototip awal sekitar 61 kg sesuai disain. Hanya dengan optimasi bentuk dengan tetap menggunakan bahan timbal, berat akhir kontainer menjadi 43,9 kg (lihat Tabel 3). Bila menggunakan tungsten pejal murni, berat kontainer dapat diturunkan menjadi hanya 24,6 kg. Namun karena permasalahan teknologi, solusi dengan tungsten murni cenderung dikesampingkan. Bahan alternatif yang lebih diterima disain adalah campuran serbuk tungsten dan timbal. Dengan bahan ini berat kontainer menjadi 32,0 kg.

Berdasarkan pengalaman dalam melakukan fabrikasi pada prototip awal,

berapa parameter disain tidak dapat diwujudkan karena berbagai kendala teknis. Oleh karena itu, proses fabrikasi berikutnya harus menerapkan kriteria-kriteria yang ketat.



Gambar 4. Optimasi bentuk disain

Tabel 3. Optimasi berat disain

Bahan	Tebal (cm)	Massa (kg)
Timbal murni	9,0	43,9
Tungsten murni	6,2	24,6
Campuran tungsten-timbal	7,2	32,0

KESIMPULAN

Untuk mengurangi dimensi dan berat peralatan perangkat brakiterapi dapat dilakukan dengan dua cara yaitu menggunakan bahan campuran serbuk tungsten-timbal dan optimasi disain gambar. Dengan hanya optimasi bentuk dan tetap menggunakan timbal sebagai bahan perisai radiasi, berat kontainer dapat diturunkan menjadi 43,9 kg. Bila bahan timbal diganti dengan campuran tungsten-timbal, ketebalan perisai radiasi berkurang menjadi 7,2 cm. Dan akibatnya, berat bahan kontainer dapat ditekan menjadi 32,0 kg.

DAFTAR PUSTAKA

1. SATMOKO, KRISTİYANTI, T. HARDJANTO dan Indarzah M.P., (2013). "Preliminary Prototype of of Medium Dose Rate Brachytherapy Equipment", *Journal of Atom Indonesia*, Vol 39, No. 2, August 2013, Jakarta.
2. KRISTİYANTI dan TRI HARDJANTO (2014), "Perhitungan Ketebalan Bahan Tungsten Sebagai Material Alternatif Untuk Kontainer Sumber Radiasi Pada Perangkat Brakiterapi", Makalah diajukan pada Seminar PTKMR, Jakarta, 2014
3. S. RUMYANTSEV (1967), "Industrial Radiology", Mir Publishers Moscow, 1967.
4. JH. HUBBEL, S.M SLETZER (2011), "Table of x-ray mass coefficients and mass energy absorption coefficients from 1 keV to 20 MeV for elements Z=1 to 92 and 48 additional substances of dosimetric interest, Radiation and Biomolecular Physics Division", PML, The National Institute of standards and Technology (NIST) Physical Measurement Laboratory, last up date December 9, 2011. USA
5. FRANK H.ATTIX (1986), "Introduction to Radiological, Physiccs and Radiation Dosimetry", John Wiley & Sons, USA, 1986