

## DESAIN MODUL PENGGERAK SUMBER ISOTOP IRIDIUM-192 PADA PERANGKAT BRAKITERAPI HDR

Tri Harjanto, Ari Satmoko  
Pusat Rekayasa Fasilitas Nuklir (PRFN-BATAN)  
harjanto5999@yahoo.com

### ABSTRAK

**DESAIN MODUL PENGGERAK SUMBER ISOTOP IRIDIUM-192 PADA PERANGKAT BRAKITERAPI HDR.** Telah dilakukan perancangan penggerak sumber isotop untuk memposisikan sumber radiasi pada perangkat brakiterapi HDR. Spesifikasi sumber isotop adalah Iridium-192 dengan aktivitas 10 Ci. Sumber dilengkapi dengan seling dengan panjang 2007 mm. Perancangan ini dilakukan sebagai pengembangan prototipi awal, yang telah dibuat sebelumnya. Kegiatan diawali dengan uji coba pendahuluan untuk mengevaluasi batasan-batasan gaya yang dibutuhkan pada seling. Berdasarkan hasil uji coba tersebut dan dilengkapi dengan perhitungan-perhitungan, desain drum penggulung seling dan roda gigi untuk pemasangan limit switch berhasil diperoleh. Drum penggulung berdiameter 80 mm dan tebal 30 mm. Drum dilengkapi dengan alur spiral sebanyak 17 putaran yang digunakan untuk lilitan seling dan juga pengarah gerakan. Pemasangan roda gigi untuk pemasangan limit switch mempunyai rasio 1:8. Roda gigi kecil berdiameter 15 mm dengan 12 gigi dan roda gigi besar berdiameter 120 mm dengan 96 gigi. Spesifikasi motor stepper penggerak seling juga berhasil ditentukan. Torsi minimum motor yang dibutuhkan adalah 1,15 Nm. Untuk menghindari kerusakan seling jika terjadi kegagalan dalam beroperasi, torsi maksimum juga dibatasi sebesar 1,36 Nm. Motor juga harus mampu berputar dengan kecepatan 110 rpm. Bila motor stepper memiliki langkah putar  $0,72^\circ$  (bergantung pada pabrikan), maka motor dan driver harus dapat beroperasi dengan kecepatan 917 pulsa/detik.

Kata kunci : desain, brakiterapi, modul mekanik, seling, sumber isotop

### ABSTRACT

**DESIGN OF DRIVING FORCE MODULE FOR IRIDIUM-192 ISOTOPE SOURCE IN HIGH DOSE RATE BRACHYTHERAPY EQUIPMENT.** A design of the driving force module for Iridium-192 isotope source in high dose rate brachytherapy equipment has been developed. The isotope source is Iridium-192 mounted on wire with the diameter of 1 mm and length of 2007 mm. The design refers to the preliminary prototype that was developed before. Preliminary test was conducted to evaluate the limits of forces needed for moving source wire. Based on the results of these tests and provided with calculations, designs of roller drum and gear for mounting limit switches have been obtained. The roller drum diameter is of 80 mm with 30 mm of thickness. The drum is provided with a spiral groove as many as 17 rotations. These grooves are used for winding wire and also steering movements. The gear for mounting limit switches has a ratio of 1: 8. The pinion has diameter of 15 mm with 12 teeth. The other gear has a diameter of 120 mm with 96 teeth. The specifications for stepper motor have also successfully determined. The minimum torque motors required is 1.15 Nm. To avoid damage of wire if there is a failure during the operation, the maximum torque is also limited at 1.36 Nm. The motor also must be able to rotate at a speed of 110 rpm. If the stepper motor has a rotary step of  $0.72^\circ$  (depending on the manufacturer), then the motor and its driver must be able to operate at a speed of 917 pulses/sec.

Keywords: design, brachytherapy, mechanical module, wire, isotope source

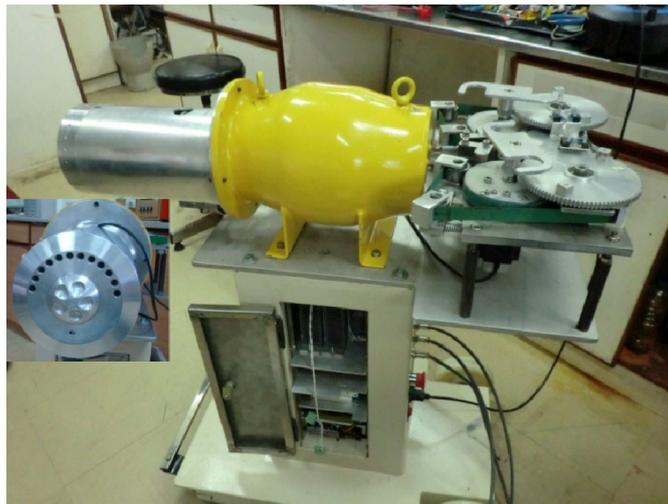
### 1. PENDAHULUAN

Salah satu metode penyembuhan penyakit kanker serviks adalah dengan iradiasi gamma menggunakan peralatan brakiterapi, di mana radiasi gamma diberikan dengan

mendekatkan sumber isotop radioaktif ke daerah target sehingga menghasilkan dosis yang dapat mematikan sel tumor. Meski telah banyak dikembangkan di negara-negara maju, penerapan di Indonesia belum begitu banyak. Hanya rumah-rumah sakit besar yang dilengkapi dengan perangkat brakiterapi. Biaya terapi yang tak lain karena mahalnya harga peralatan brakiterapi menjadi sebab. Dalam rangka memecahkan masalah inilah, perangkat brakiterapi kanker servik dikembangkan dengan meningkatkan kandungan lokal dalam negeri terutama sumber Isotop Iridium-192 yang mampu dibuat di PRSG BATAN.

Perekayasaannya sebelumnya telah dilakukan dengan tahapan pengembangan yang menuju ke arah penyempurnaan. Diawali dengan perekayasaannya perangkat brakiterapi Low Dose Rate dengan sistem mekanik yang sederhana, kemudian dikembangkan menjadi perangkat brakiterapi yang dirancang untuk High Dose Rate (HDR) dengan 12 kanal yang dikontrol dengan program untuk posisi sumber. Prototip awal perangkat brakiterapi telah dihasilkan (lihat Gambar 1)<sup>[1]</sup>. Secara umum prototip awal tersebut telah dapat berfungsi.

Namun demikian, hasil evaluasi menunjukkan bahwa prototip awal tersebut membutuhkan perbaikan dan peningkatan kinerja. Dimensi yang terlalu besar dan juga juga gerakan seling perlu diperbaiki. Perekayasaannya perangkat brakiterapi High Dose Rate (HDR) ini bertujuan untuk pengembangan dan penyempurnaan lebih lanjut dari perekayasaannya perangkat brakiterapi Medium Dose Rate, sehingga dapat dirancang sistem perangkat yang sesuai dengan teknologi yang up to date dan di lengkapi dengan dokumen jaminan mutu sehingga dapat disertifikasi dan diaplikasikan kepada pasien.



Gambar 1. Prototip awal perangkat brakiterapi

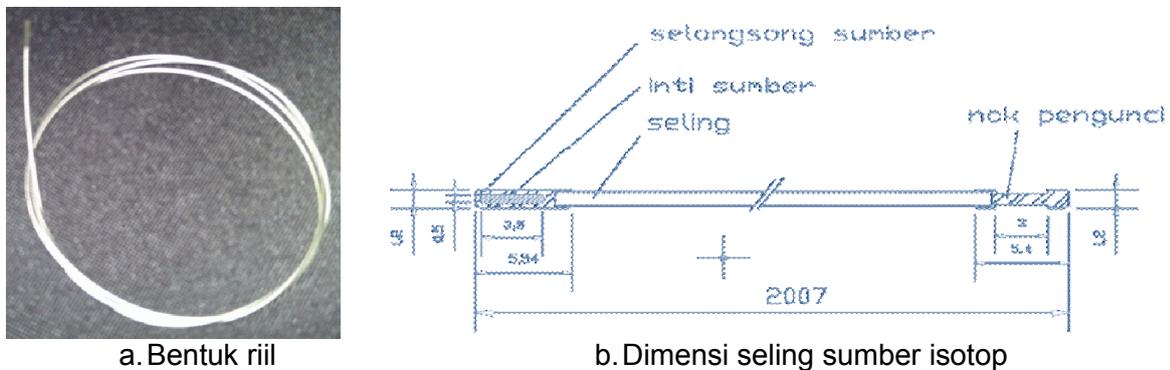
Prinsip kerja brakiterapi secara umum adalah mengendalikan perjalanan sumber radiasi menuju target kanker sesuai pola yang telah ditentukan dan kembali ke kontainer tempat penyimpanan semula. Perangkat brakiterapi terdiri dari tiga modul utama yaitu modul penggerak seling, modul kontainer pengaman dan modul distributor kanal. Modul penggerak seling berfungsi untuk menggerakkan seling sehingga posisi sumber radioisotop dapat dikendalikan. Prinsipgerakan didasarkan dengan drum penggulung seling dimana ujung seling bagian ekor diikatkan pada drum penggulungan dan ujung seling lainnya yang dilengkapi dengan sumberisotop bergerak bebas. Drum ini digerakkan oleh motor *stepper*. Modul ini juga dilengkapi dengan seling *dummy* yang berfungsi untuk memastikan bahwa sistem mekanik maupun sistem kontrol berjalan dengan baik. Modul kontainer pengaman berfungsi untuk melokalisasi radiasi dari sumber isotop pada saat tidak digunakan. Pada saat dioperasikan, sumber dikirimkan melalui modul distributor kanal. Modul distributor kanal ini dihubungkan dengan *transfer tubed*an aplikatoryang berfungsi untuk memposisikan sumber radiasi sesuai sesuai instruksi pengendali.

Makalah ini membahas desain modul penggerak sumber yang memenuhi persyaratan kecepatan, ketepatan pengendalian dan keamanan serta merupakan peningkatan dan penyempurnaan dari protipe awal brakiterapi yang telah dihasilkan sebelumnya.

**2. TEORI**

**Perangkat brakiterapi dan sumber isotop Iridium-192**

Perangkat brakiterapi terdiri dari tiga modul mekanik utama: penggerak sumber, kontainer pengaman dan distributor kanal. Kateter atau aplikator yang dimasukkan ke dalam tubuh pasien melengkapi perangkat brakiterapi tersebut. Sumber Iridium-192 dibungkus dalam kapsul dan dirangkai dengan kawat stainless steel berdiameter sekitar 1 mm dengan panjang 2007 mm (lihat Gambar 2). Sebelum terapi dilakukan, pemeriksaan jalur dilakukan dengan menggunakan seling *dummy* yang mempunyai dimensi sama dengan seling sumber. Seling *dummy* bertujuan untuk memastikan bahwa pergerakan sumber untuk proses terapi dapat berlangsung sesuai dengan yang diinginkan.



Gambar 2. Seling sumber isotop Iridium-192

Pada waktu tidak digunakan atau posisi stand by, sumber Iridium-192 disimpan dalam modul kontainer sumber sehingga paparan radioaktif dari sumber dapat dilokalisir. Saat digunakan untuk terapi, modul penggerak sumber mengatur pergerakan posisi sumber sejak dari kontainer hingga aplikator dan kembali ke kontainer.

Pada saat pengoperasian, awalnya sumber digerakkan maju hingga berada pada ujung aplikator. Sumber ditarik sedikit demi sedikit ke posisi-posisi lain sehingga memberikan dosis paparan tertentu. Posisi berhenti sumber dan lama berhenti akan menentukan profil distribusi dosis radiasi sesuai dengan kondisi penyakit pasien.

Seling *dummy* mempunyai dimensi yang sama dengan seling sumber dengan kegunaan untuk memeriksa apakah gerakan sumber akan bergerak seperti yang telah diprogram. Pemeriksaan ini dilakukan sebelum terapi dengan sumber dilakukan.

**Motor penggerak**

Motor digunakan untuk menggerakkan seling. Karena membutuhkan gerakan seling yang presisi maka digunakan motor *stepper*. Torsi yang dapat dihasilkan oleh motor *stepper* dapat dihitung berdasarkan perbandingan daya kerja motor terhadap kecepatan putarannya atau dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\tau = P / \omega \dots\dots\dots(1)$$

dengan :

- $\tau$  : torsi dalam satuan Newton meter
- $P$  : daya kerja motor dalam satuan Watt
- $\omega$  : kecepatan perputaran motor dalam satuan rad/det

Untuk mengetahui beban maksimum yang dapat digerakkan motor stepper dapat diperoleh dengan menghitung torsi dengan menggunakan rumus :

$$\tau = F \cdot r \dots\dots\dots(2)$$

dengan :

$F$  : Gaya berat yang bekerja terhadap motor (Newton)

$r$  : Jarak sumbu putar pada motor (meter)

Berdasarkan beban torsi ini kemudian dapat dipilih spesifikasi motor yang sesuai.

Pada motor stepper umumnya tertulis spesifikasi  $N_p$  (pulsa / rotasi). Sedangkan kecepatan pulsa diekspresikan sebagai pps (pulsa per detik) dan kecepatan putar umumnya ditulis sebagai  $\omega$  (rotasi / menit atau rpm). Kecepatan putar motor stepper (rpm) dapat diekspresikan menggunakan kecepatan pulsa (pps) sebagai berikut<sup>[2]</sup>:

$$\omega = 60 \cdot \text{Pps} / N_p \text{ (rotasi/menit)} \dots\dots\dots(3)$$

$$\omega = 60 / N_p \cdot \text{Pps}$$

dengan :

$\omega$  : rotasi / menit atau rpm

$N_p$  : step / putaran (pulsa / rotasi)

pps : pulsa per detik

### Roda gigi

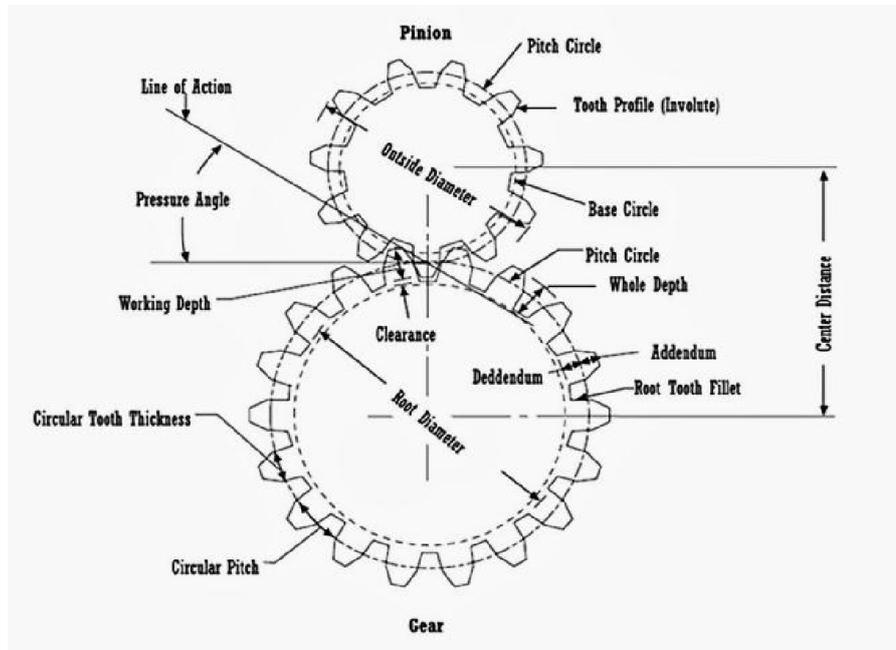
Gerakan motor perlu dibatasi dengan *limit switch*. Motor berputar beberapa lingkaran sesuai dengan banyaknya lilitan seling dalam drum. Dari berbagai alternatif, pembatasan gerakan motor yang efisien adalah dengan menambah pasangan roda gigi. Pasangan roda gigi ditunjukkan dalam Gambar 3. Motor dihubungkan langsung dengan roda gigi kecil (*pinion*). Putaran *pinion* ini direduksi oleh roda gigi besar. Pada roda gigi besar inilah akan dipasang *limit switch*. Desain roda gigi menggunakan standar baku seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 1<sup>[3]</sup>. Dimensi-dimensi roda gigi dibutuhkan untuk menyediakan ruang yang cukup dalam desain. Dalam desain roda gigi dikenal istilah modul yang menunjukkan perbandingan antara diameter dengan jumlah gigi. Modul ini memiliki standar tertentu sebagaimana diberikan dalam Tabel 2.

Tabel 1. Simbol dan perhitungan dimensi roda gigi

| 4.2.9. Simbol-Symbol Roda Gigi   |           |   |
|----------------------------------|-----------|---|
| Nama                             | Simbol    | Rumus   |
| Jarak sumbu antara roda gigi     | a         | $\frac{d1 + d2}{2} = \frac{m(z1 + z2)}{2}$      |
| Circular pitch                   | CP        | $\frac{m \cdot \pi}{z}$                         |
| Diameter jarak antara            | $d(d^a)$  | $\frac{m \cdot z}{z}$                           |
| Diameter kepala / puncak         | $da(d^a)$ | $d + 2 \cdot m$                                 |
| Diameter alas                    | $Df(d^d)$ | $d - (2,2 : 2,6) m$                             |
| Tinggi gigi seluruhnya           | h         | $\frac{da - df}{2} = ha + hf$                   |
| Tinggi kepala gigi/addendum      | ha        | 1, m  |
| Tinggi kaki gigi/dedendum        | hf        | (1,1 : 1,3) m                                   |
| Banyak gigi                      | z         | $\frac{d}{m}$                                   |
| Modul                            | m         | $\frac{d}{z}$                                   |
| Tebal gigi                       | b         | (6 : 8) m automotive<br>(6 : 12) penggerak umum |
| Sudut tekan                      | $\alpha$  | 20° evolvente                                   |
| Sudut kisar                      | $\gamma$  | Worm gear                                       |
| Sudut helix                      | $\beta$   | 7° : 23°  |
| Sudut kisar konis                | $\delta$  | $\tan \delta_1 = \frac{d1}{d2}$                 |
| Sudut sumbu poros                | $\Sigma$  | $\delta_1 + \delta_2$                           |
| Sudut kisar konis                | R         | $\frac{d}{z}$                                   |
| Jarak garis singgung antara gigi | W         | Tabel "gear hobbing"                            |
| Perbandingan transmisi           | i         | $\frac{z1}{z2}$                                 |

Tabel2.Modul rodal gigi

| Nilaimodulgigi yang dianjurkan (mm) |      |     |     |     |     |     |
|-------------------------------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 0,2                                 | 0,25 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,8 |
| 1                                   | 1,25 | 1,5 | 2   | 2,5 | 3   | 4   |
| 5                                   | 6    | 8   | 10  | 12  | 16  | 20  |



Gambar3.Rodagigi<sup>[3]</sup>

### 3. TATA KERJA

Kegiatan diawali dengan uji coba pendahuluan dalam rangka mengevaluasi batasan gaya-gaya yang bekerja pada seling. Hasil dari uji coba menjadi referensi atau acuan dalam menentukan batasan-batasan desain. Dengan menerapkan rumus-rumus dalam Teori, perhitungan dilakukan untuk menentukan dimensi-dimensi desain dan juga untuk menentukan torsi motor yang dibutuhkan.

### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### Uji coba pendahuluan

Seling harus melewati komponen-komponen jalur lintasan. Karena berbagai kondisi, jalur lintasan antar komponen terpisah oleh jarak atau celah. Dengan demikian seling harus melintasi jalur dengan cara keluar dari sebuah komponen dan masuk lagi ke komponen lain. Jarak antar komponen berpotensi menciptakan celah jebakan di mana seling dapat keluar jalur dari sebuah komponen namun tidak berhasil masuk ataupun tertahan maju ke jalur komponen lain. Karena motor tetap mendorong maju, seling terdefleksi dan membentuk lengkungan yang besar. Untuk mengantisipasi kemungkinan ini, uji coba dilakukan untuk mengkarakterisasi pengaruh jarak antar komponen terhadap potensi keluar lintasan.

Uji coba dilakukan dengan menempatkan dua buah tube lintasan seling pada jarak tertentu sebagai variabel yang diamati. Seling dimasukkan melalui kedua jalur tersebut. Selanjutnya salah satu ujung seling ditahan supaya tidak bergerak. Dan pada ujung lainnya diberi gaya pendorong. Selanjutnya defleksi seling yang terjadi pada celah kosong

diamati seiring dengan variasi gaya pendorong. Tabel 1 memberikan data hasil percobaan ini.

Tabel 1. Defleksi seling pada celah

| No | Celah (mm) | Beban (gr) | Defleksi (mm) |
|----|------------|------------|---------------|
| 1  | 50         | 50         | 4,0           |
|    |            | 80         | 10,0          |
| 2  | 30         | 120        | 3,0           |
|    |            | 200        | 6,0           |
| 3  | 20         | 300        | 1,0           |
|    |            | 350        | 2,0           |
|    |            | 400        | 2,5           |
| 4  | 10         | 500        | 0,0           |
|    |            | 800        | 0,5           |
|    |            | 1000       | 1,0           |

Uji coba menghasilkan fakta bahwa untuk celah 10 mm, beban 1000 gr dapat menghasilkan defleksi sebesar 1 mm. Untuk selanjutnya data ini menjadi acuan dalam desain. Jarak antar jalur komponen tidak boleh melebihi dari 1 cm.

Pengujian pendahuluan lainnya juga dilakukan untuk mengevaluasi kebutuhan kekuatan torsi motor penggerak seling. Untuk menggerakkan seling, motor harus mampu melawan hambatan yang berupa hambatan pada sabuk dan hambatan pada seling di sepanjang jalur. Perhitungan kebutuhan torsi motor pernah dikaji sebelumnya melalui pemodelan analitik<sup>[4]</sup>. Dalam kajian tersebut, hambatan karena gesekan seling relatif kecil dan cenderung diabaikan. Uji coba sederhana dengan memasukkan seling pada jalur membuktikan hal tersebut. Sementara untuk hambatan karena sabuk, perhitungan analitik perlu di buktikan kebenarannya. Pengujian dilakukan dengan memanfaatkan konstruksi prototip awal perangkat brakiterapi. Seling dililitkan pada drum penggulung dan diapit oleh sabuk. Seling bergerak karena didorong ataupun ditarik oleh drum penggulung. Putaran drum penggulung dikontrol oleh motor. Dengan demikian motor harus mampu melawan hambatan yang diberikan oleh sistem sabuk dan gesekan seling di sepanjang jalur lintasan.

Uji coba dilakukan dengan memberikan beban pada sabuk. Beban divariasikan sehingga sabuk dapat berputar. Hasil percobaan menunjukkan angka dengan rentang yang cukup lebar antara 1,2 hingga 2,3 kg. Rentang tersebut diperoleh dengan menempatkan beban pada titik-titik sabuk yang berbeda. Besarnya rentang gaya yang dibutuhkan ini diduga sangat terkait dengan kepresisian mekanik sistem sabuk. Untuk selanjutnya sistem sabuk harus difabrikasi dengan ketelitian yang tinggi. Hasil percobaan mengantarkan pada penetapan gaya yang dibutuhkan untuk memutar drum sebesar 3 kg atau ekivalen gaya 29,4 N.

### **Desain drum penggulung**

Panjang seling adalah 2007 mm. Jarak dari tengah kontainer sampai pangkal pengikat pada drum adalah 160 mm. Dengan demikian panjang jangkauan maksimum dari tengah kontainer sampai ujung aplikator yang dapat dijangkau oleh seling adalah  $2007 \text{ mm} - 160 \text{ mm} = 1847 \text{ mm}$ . Seling ditarik dengan cara dililitkan pada drum penggulung. Dengan demikian drum tersebut harus dapat menampung panjang jangkauan seling. Alur pada drum disediakan agar seling berada pada lintasan yang teratur. Kedalaman alur dibuat sama dengan diameter seling.

Diameter drum penggerak ditetapkan 80 mm. Karena diameter seling 1,02 mm, maka diameter lingkaran seling, selanjutnya menjadi diameter drum efektif, menjadi  $80 - (2 \times 1,02) \text{ mm}$  atau 77,96 mm. Jumlah lilitan alur dapat dihitung melalui pembagian panjang seling dengan keliling drum efektif atau  $1847 / (\pi \times 77,96) = 7,54$ .

Seling yang keluar dari drum penggulung diteruskan ke modul kontainer pengaman. Lubang lintasan seling pada modul kontainer bersifat tetap, sementara alur pada drum

penggulung bersifat spiral. Dengan kata lain titik keluar seling dari drum penggulung bergerak sejajar sumbu putar drum. Oleh karena itu antara modul kontainer dan drum penggulung membutuhkan lintasan yang fleksibel. Gerakan fleksibel ini harus dijamin oleh komponen mekanik lain yang disebut dengan pengarah. Pengarah ini bergerak naik turun sesuai gerakan alur drum. Gerakan pengarah memanfaatkan alur pada drum. Jumlah alur yang dibutuhkan untuk membimbing gerakan pengarah adalah 2 alur. Dengan demikian dibutuhkan 9,54 alur. Untuk alasan praktis, jumlah alur pada drum ditetapkan menjadi 10 alur.

Jikajarakantar alurdibuat 0,5 mm dan jarak antara alur teratas dan juga terbawah dengan tepi drum adalah masing-masing 2 mm, makatebaldrum yang dibutuhkan adalah  $= 10 \times (0,5 + 1,02) + 2 \times 2 = 19,2$  mm atau dibulatkan menjadi 20 mm. Dalam prototip awal, drum penggulung langsung dipasang pada poros motor. Namun ternyata hasil yang diberikan kurang memuaskan karena lubang drum penggulung dengan poros motor kurang presisi. Akibatnya putaran drum tidak benar-benar tegak. Untuk menghindari kelemahan ini, drum didesain dengan diapit oleh *bearing*. Poros drum disambung ke poros motor dengan bantuan koping.

### Motor penggerak seling

Berdasarkan pengujian pendahuluan, motor harus mampu memberikan gaya sebesar 29,4 N. Karena diameter efisien drum adalah 77,96 mm, maka torsi yang dibutuhkan adalah 1,15 Nm. Torsi inilah yang dibutuhkan oleh motor untuk dapat menggerakkan seling.

Torsi maksimum motor juga perlu dibatasi. Hal ini untuk membatasi jika seling menjumpai lintasan buntu dan sementara motor terus memaksa mendorong seling. Keadaan ini berpotensi dapat mengakibatkan seling menjadi terdefleksi dan mengalami bengkok permanen. Berdasarkan uji coba sebelumnya diperoleh bila ada celah 1 cm, seling akan terdefleksi hingga 1 mm bila diberi beban 1000 gr atau 9,8 N. Dengan mengacu pada angka ini maka gaya maksimum motor dibatasi pada 29,4 N + 9,8 N = 39,2 N. Gaya ini setara dengan torsi 3,14 Nm.

Dari evaluasi di atas, motor harus mampu memberikan torsi sebesar 1,15 Nm untuk menarik seling namun tidak boleh melebihi 3,14 Nm pada saat mendorong seling. Ini berarti spesifikasi motor harus berada dalam rentang torsi minimum dan maksimum tersebut. Mungkin saja spesifikasi tersebut sulit untuk ditemui di pasar. Sebagai solusinya motor harus dapat dikontrol dengan mengendalikan arus pada motor. Dengan pengaturan arus, daya motor dapat dibatasi dan selanjutnya torsi motor juga dapat dibatasi.

Di samping kekuatan torsi, motor juga memiliki persyaratan terkait kecepatan. Dalam prototip lama<sup>[1]</sup>, kecepatan motor secara teori dapat memenuhi kecepatan seling sebesar 450 mm per detik. Namun dalam prakteknya persyaratan tersebut agak sulit dicapai karena mengharuskan adanya penambahan program akselerasi yang relatif sulit. Oleh karena itu, motor pada prototip awal akan diganti.

Karena diameter efektif drum adalah 77,84 mm maka untuk mendapatkan kecepatan linear yang dibutuhkan, motor harus mampu berputar dengan kecepatan ( $\omega$ ):

$$\begin{aligned}\omega &= 450/(77,96/2) \text{ rad/det} \\ &= (11,544 * 180 / \pi) \text{ }^\circ/\text{det} \\ &= (661,4 * 60 / 360) \text{ rpm} \\ &= 110 \text{ rpm}\end{aligned}$$

Spesifikasi motor *stepper* sangat bergantung pada masing-masing pabrikan. Dengan berasumsi motor *stepper* berputar 0,72  $^\circ$ /step atau 500 step/putaran, maka motor *stepper* harus mampu diberi kecepatan:

$$\begin{aligned}\omega &= (110 * 500 / 60) \text{ step/det} \\ &= 917 \text{ step/det atau } 917 \text{ pulsa/detik}\end{aligned}$$

Dengan demikian motor harus dapat berputar dengan kecepatan 917 step/detik dan *driver* motor *stepper* harus mampu memberikan kecepatan 917 pulsa/detik.

Selain batasan torsi dan kecepatan, motor *stepper* harus pula mempertimbangkan beberapa aspek. Seperti misalnya terkait dengan keembaman, motor sebaiknya

dilengkapi dengan pengereman. Kecepatan yang tinggi akan menyebabkan motor masih berusaha berputar meskipun sudah tidak lagi diberi pulsa gerakan. Putaran sisa ini dapat mengakibatkan berkurangnya kepresisian posisi berhenti. Untuk menghindari itu, motor sebaiknya dilengkapi dengan rem.

Sebagian besar motor *stepper* menerapkan kendali *open loop*, yang berarti bila pulsa gerakan diberikan maka akan selalu dianggap bahwa poros motor telah berotasi. Padahal dalam kondisi tertentu, misalnya macet, meski pulsa telah diberikan, motor sama sekali belum bergerak. Untuk menghindari fenomena selip ini, motor sebaiknya dilengkapi dengan enkoder. Dengan enkoder ini, bila fenomena selip terjadi, maka gerakan dapat dikoreksi dengan kompensasi pulsa.

### Desainrodagigi

Posisi ujung sumber isotop dikendalikan oleh putaran motor. Dalam keadaan normal, ujung sumber berada dalam rentang tertentu. Mengantisipasi adanya kegagalan dalam pengendalian ini, gerakan motor perlu dibatasi dengan posisi minimum dan maksimum. Posisi minimum adalah posisi di mana titik pusat sumber isotop berada pada tengah-tengah kontainer. Sedangkan posisi maksimum adalah posisi di mana ujung sumber isotop berada di ujung terjauh.

Untuk menghindari gerakan yang melebihi batas yang diinginkan, gerakan motor harus dibatasi. Dari berbagai alternatif yang telah dievaluasi, pilihan ditetapkan dengan menggunakan roda gigi. Roda gigi harus melakukan maksimum satu putaran, sedangkan jarak seling yang dilayani adalah 1847 mm atau 7,54 putaran. Dengan demikian rasio gear yang dibutuhkan adalah 1:8.

Roda gigikecildipasangmenjadisatuporosdengan as drum penggulingdan motor stepper. Jumlahgigikecilditetapkan 12 buah danmodulgigiadalah 1,25 mm. Dengan demikian,diameternya 15 mm. Jumlahputarangigipengaturadalah8putaran, sehinggajumlahrodagigipengatur = 8 x 12 = 96gigi. Rodagigipengaturdihubungkandengan as motor penggeraksehinggaputaransamadenganputaran motor. Sehingga diameter rodagigibesar menjadi 1,25 x 96 = 120 mm. Selanjutnyaprofilgigidihitungdenganrumusberikut:

$$\begin{aligned} \text{Jaraksumbuantargigi } a &= m.(d_1 + d_2)/2 = 1,5 (1,5.12 + 1,5. 84) = 108 \text{ mm} \\ \text{Circular pitch } cp &= m. \pi = 1,25 \times 3,14 = 3,925 \text{ mm} \\ \text{Diameter jarakantara } da &= m \times Z = 1,25 \times 15 = 15 \text{ mm} \\ \text{Diameter kepalapuncak} da &= da + 2 m = 15 + 2,5 = 17,5 \text{ mm} \\ \text{Diameter alas } Df \text{ (ad) } d &- (2,2 :2,6) . m = 15 - 2,2 = 12,25 \text{ mm} \\ \text{Tinggigigiseluruhnya } h &= da-df/2 = 17,5-12,25/2 = 2,625 \text{ mm} \\ \text{Tinggikepalagigi } m &= 1,25 \\ \text{Tinggi kaki gigi} &= 1,1 \times m = 1,1 \times 1,25 = 1,375 \text{ mm} \\ \text{Tebalgigi} &= 6-8 m = 6 \times 1,25 = 7,5 \text{ mm} \end{aligned}$$
  
$$\begin{aligned} \text{Untukgigi 2 (Z2) jumlahgigi} &= 84 \\ \text{Diameter jarakantara } da &= m \times Z = 1,25 \times 84 = 105 \text{ mm} \\ \text{Diameter kepalapuncak} da &= db + 2 m = 105 + 2,5 = 107,5 \text{ mm} \\ \text{Diameter alas } Df \text{ (ad) } d &- (2,2 :2,6) . m = 105 - (2,2 . 1,25) = 102,25 \text{ mm} \\ \text{Tinggigigiseluruhnya } h &= da-df/2 = 107,5-102,25/2 = 2,625 \text{ mm} \\ \text{Tinggikepalagigi } m &= 1,25 \\ \text{Tinggi kaki gigi} &= 1,1 \times m = 1,1 \times 1,25 = 1,375 \text{ mm} \\ \text{Tebalgigi} &= 6-8 m = 6 \times 1,25 = 7,5 \text{ mm} \end{aligned}$$

## 4. KESIMPULAN

Berdasarkan uji coba pendahuluan dan perhitungan yang telah dilakukan, desain drum pengguling seling dan roda gigi telah berhasil ditentukan. Drum pengguling berdiameter 80 mm dan tebal 30 mm. Drum dilengkapi dengan alur spiral sebanyak 17

putaran yang digunakan untuk lilitan seling dan juga pengarah gerakan. Pasangan roda gigi untuk pemasangan *limit switch* mempunyai rasio 1:8. Roda gigi kecil berdiameter 15 mm dengan 12 gigi dan roda gigi besar berdiameter 120 mm dengan 96 gigi. Spesifikasi motor *stepper* penggerak seling juga berhasil ditentukan. Torsi minimum motor yang dibutuhkan adalah 1,15 Nm. Untuk menghindari kerusakan seling jika terjadi kegagalan dalam beroperasi, torsi maksimum juga dibatasi sebesar 1,36 Nm. Motor juga harus mampu berputar dengan kecepatan 110 rpm. Bila motor *stepper* memiliki langkah putar  $0,72^\circ$  maka motor harus dapat berputar dengan kecepatan 917 pulsa/detik.

## 5. UCAPAN TERIMAKASIH

Kami ucapkan terimakasih atas bantuan pikiran dan sarannya kepada semua teman sejawat di PRFN-BATAN, sehingga makalah ini dapat tersaji.

## 6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ari Satmoko, Kristiyanti, T. Hardjanto Dan Indarzah M.P., "*Preliminary Prototype Of Medium Dose Rate Brachytherapy Equipment*", Journal Of Atom Indonesia, Vol 39, No. 2, Jakarta, August 2013
- [2] -----, *General Catalogue: Oriental Motor CO. LTD*, Tokyo, Japan, 2004- 2005
- [3] Sularso, Kiyokatsu Suga, "*Dasar Perencanaan dan Pemilihan Elemen Mesin*", PT Pradnya Paramita, Cetakan ke 10, Jakarta, 2002
- [4] Ari Satmoko, *Desain Sistem Penggerak Seling Sumber Isotop Iridium-192 Pada Brakiterapi Kanker Servik Dosis Sedang*, Majalah Prima, Edisi November 2010