

DESAIN MEKANIK DAN PENGENDALIAN GERAKAN RAK SUMBER ISOTOP PADA IRADIATOR GAMMA 200 kCi

Ari Satmoko, Hyudianto Arif Gunawan
Pusat Rekayasa Fasilitas Nuklir (PRFN) - BATAN
Email : satmoko@batan.go.id

ABSTRAK.

DESAIN MEKANIK DAN PENGENDALIAN GERAKAN RAK SUMBER ISOTOP PADA IRADIATOR GAMMA 200 kCi. Irradiator gamma 200 kCi dirancang untuk proses pengawetan bahan pangan menggunakan sumber radioaktif Cobalt-60. Irradiator tersebut menggunakan sumber isotope Cobalt-60 yang disusun dalam rak-rak dan disimpan di dalam kolam air. Pada saat akan digunakan untuk mengiradiasi produk, rak sumber isotope diangkat ke atas permukaan kolam dan produk yang akan diiradiasi didekatkan ke sumber isotope tersebut. Selesai pengoperasian, rak sumber isotope kembali diturunkan hingga ke dasar kolam. Desain mekanisme naik turun rak sumber menjadi bahasan dalam makalah ini yang meliputi desain mekanik dan desain pengendalian gerakan rak sumber. Sistem gerakan rak sumber terdiri atas beberapa komponen: tali seling, perangkat pneumatic sebagai sumber penggerak, dan modul transmisi. Modul transmisi terdiri dari pasangan tiga puli tetap dan tiga puli gerak. Ketika silinder pneumatik mendorong poros puli gerak secara sliding, seling mengulur menyebabkan rak sumber bergerak ke bawah. Desain diawali dengan pemodelan gaya pada seling dan poros puli. Hasil perhitungan mengantarkan pada diameter seling sebesar 1/8" tipe 1x7 SS 304 dan desain poros dengan diameter bertingkat dengan diameter paling kritis adalah 20 mm. Pengendalian gerakan rak sumber dikembangkan dengan cara mekanis dan elektronik. Pengendalian secara mekanik dilakukan dengan system pneumatic. Sementara pengendalian elektronik dilakukan dengan pemrograman komputer. Berkat sensor-sensor yang disediakan, kegagalan fenomena pengoperasian naik turun rak sumber dapat terdeteksi.

Kata kunci: iradiator, desain, gerakan rak sumber, pneumatik

ABSTRACT.

MECHANICAL AND CONTROL DESIGNS OF ISOTOPE SOURCES RACK MOVEMENT IN GAMMA IRRADIATORS 200 kCi. The Gamma irradiators 200 kCi is designed for food preservation process. The irradiator uses radioactive cobalt-60 sources. The sources are arranged in the racks and stored in water pool. When it is operated to irradiate products, the source rack is lifted over the pool surface and the products to be irradiated being brought closer to the isotope source. After completing the operation, the source rack is send back to the bottom of the pool. The design of the mechanism up and down of the rack becomes a focus in this paper including the mechanical design and the control design of source rack movement. The source rack hoist mekanisme consists of several components: wire, pneumatic device as a driving source, and a transmission module. The ransmission module consists of a pair of both three fixed pulleys and three moving pulleys. When the pneumatic cylinder push the all three moving pulleys in a sliding motion, the wire lengthens causing the source rack to move downwards. The design begins with force modeling on both wire and pulleys shaft. Calculation leads to 1/8" of wire diameter. The wire is SS304 1X7 type. The moving shaft is designed in several steps of diameter with critical diameter at 20 mm. Controlling the movement of source rack is developed by both mechanical and electronics means. The mechanically control is performed by pneumatic system. While the electronic control carried out by computer programming. Thanks to sensors provided, abnormal phenomena of the up and down operation of the source rack can be detected.

Keywords: irradiator, design, source rack movement, pneumatic

1. PENDAHULUAN

Pada saat ini, BATAN sedang mengembangkan desain instalasi iradiator gamma 200 kCi. Irradiator dirancang menggunakan sumber radioaktif Cobalt-60 tipe pensil untuk tujuan proses pengawetan bahan pangan dan atau hasil pertanian^[1]. Desain iradiator mengacu

pada iradiator yang dikembangkan oleh Izotop Hungaria^[2]. Untuk melokalisir paparan radiasi, beton dengan tebal lebih dari 1,5 m dan kolam air dengan kedalaman 6 m digunakan sebagai *shielding*.

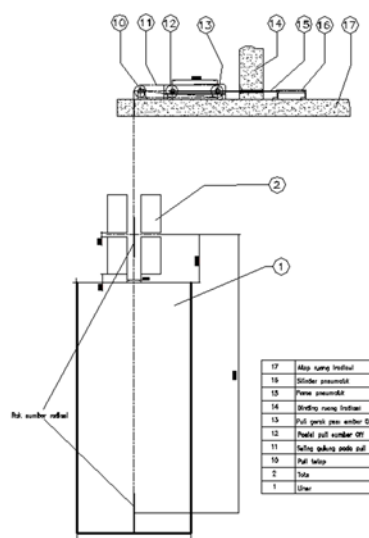
Instalasi iradiator tersebut merupakan kategori IV di mana sumber radioaktif disimpan di dalam kolam air pada saat tidak digunakan. Sumber isotope yang digunakan adalah Cobalt-60. Sumber-sumber isotope disusun dalam sebuah modul. Selanjutnya empat modul sumber ditempatkan pada rak sumber. Pada saat akan digunakan untuk mengiradiasi produk, rak sumber isotope diangkat ke atas permukaan kolam dan produk yang akan diiradiasi didekatkan ke sumber isotope tersebut. Selesai pengoperasian, rak sumber isotope kembali diturunkan hingga ke dasar kolam. Desain mekanisme naik turun sumber isotope memegang peranan yang vital dan menjadi bahasan dalam makalah ini. Pembahasan meliputi desain mekanik dan desain pengendalian gerakan rak sumber.

1.1. TEORI

1.1.1 Prinsip kerja iradiator 200 kCi

Sumber radiasi gamma yang digunakan adalah Co-60. Sumber ini dikemas dalam bentuk batang/pensil berdiameter 1,11 cm, panjang 45,2 cm dan aktivitas maksimum 10 kCi/pensil. Batang-batang sumber isotope Cobalt-60 ditempatkan pada modul rak sumber. Modul rak sumber merupakan tempat untuk mengkombinasikan posisi batang-batang sumber radioaktif. Setiap modul menyediakan 40 lubang yang berderet paralel. Setelah semua lubang terisi oleh batang sumber radioaktif ataupun dummy, modul dimasukkan pada rak sumber radioaktif. Setiap rak sumber membawa 4 modul sumber. Secara total terdapat 12 modul yang dibagi ke dalam 3 rak sumber. Masing-masing rak sumber diangkat oleh sebuah silinder pneumatic yang berfungsi secara independen^[2].

Prinsip kerja naik-turun rak sumber ditunjukkan dalam Gambar 1. Dalam keadaan stand by, sumber isotope radioaktif tersimpan di dalam dasar kolam. Pada saat akan digunakan, rak sumber diangkat ke atas permukaan kolam sampai pada posisi operasi. Pengangkatan rak sumber menggunakan seling yang ditarik oleh peralatan pneumatik. Untuk menghindari fenomena berputar, gerakan rak sumber dibimbing oleh dua buah seling penuntun yang ditempatkan pada kedua sisi rak sumber. Setelah proses iradiasi selesai, rak diturunkan ke posisi aman di dasar kolam berkat bantuan gravitasi dengan gerakan yang terkontrol oleh sistem pneumatik.



Gambar 1. Prinsip kerja naik turun rak sumber^[3]

1.1.2 Sistem keselamatan fasilitas iradiator

IAEA menerbitkan *Safety Series* No. 115 tentang *International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources*^[4]. Standar ini menetapkan persyaratan dasar untuk melindungi manusia dari paparan radiasi pengion dan untuk keselamatan sumber radiasi. Berbagai metode dan tingkatan dikaji. Secara khusus terkait persyaratan teknis, standar ini menerapkan pentingnya pertahanan berlapis dengan tujuan mencegah kecelakaan yang dapat menyebabkan paparan, mengurangi konsekuensi dari setiap kecelakaan yang terjadi dan memulihkan kembali sumber radiasi dalam kondisi aman setelah kecelakaan terjadi.

Dari aspek engineering, standar tersebut juga menekankan pada pentingnya margin keamanan yang cukup untuk desain dan konstruksi terkait sumber dan pengoperasian yang melibatkan sumber, untuk memastikan kinerja yang handal selama operasi normal. Desain instalasi iradiator menerapkan filosofi keselamatan pertahanan berlapis, redundansi, keanekaragaman, independensi dan system elektronik terprogram. Pertahanan berlapis menerapkan beberapa tingkatan keselamatan yaitu upaya mencegah penyimpangan operasi normal, mendeteksi dan merespon penyimpangan operasi normal, serta mengurangi potensi bahaya akibat kecelakaan.

1.1.3 Desain perhitungan poros

Poros merupakan salah satu bagian yang terpenting dari setiap mesin. Poros seperti yang dipasang di antara roda-roda kereta barang di mana tidak mendapat beban puntir bahkan kadang tidak boleh berputar disebut gandar. Gandar ini hanya mendapat beban lentur murni. Dari bahan yang dipilih dapat ditentukan tegangan lentur yang diizinkan. Dengan menghitung momen lentur dari poros, diameter poros yang diperlukan dapat diperoleh dari Persamaan 1 berikut^[5]

$$d_s = (10,2 \times M)^{1/3} / \sigma_a \quad \dots\dots\dots (1)$$

dengan

- d_s : diameter poros [mm]
- M : momen (kombinasi bending dan rotasi) [kg.mm]
- σ_a : tegangan yang diizinkan [kg/mm²]

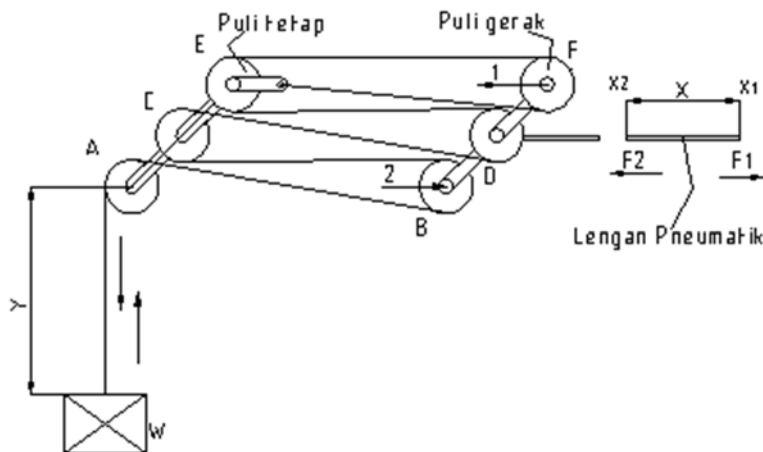
2. METODOLOGI

Desain mekanisme naik turun rak sumber radioaktif pada instalasi iradiator dilakukan melalui beberapa tahapan sebagai berikut:

- Mempelajari dan mengimplementasikan IAEA *Safety Series* No. 115 terkait dengan penanganan sumber radioaktif
- Melakukan perhitungan desain mekanik gerakan rak sumber dalam rangka integritas struktur
- Melakukan desain pengendalian gerakan rak sumber

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sistem turun-naik rak sumber radiasi terdiri atas beberapa komponen, di antaranya adalah tali seling yang digunakan untuk menarik atau menurunkan rak sumber, perangkat pneumatic sebagai sumber penggerak, dan modul transmisi untuk mengkonversi gerakan pneumatic menjadi gerakan rak sumber (lihat Gambar 2). Modul transmisi terdiri dari pasangan tiga puli tetap dan tiga puli gerak. Seling dirangkai mulai dari rak sumber, puli A, B, C D, E hingga F. Ketika poros pneumatik bergerak maju mendorong ketiga puli gerak secara sliding sepanjang jarak X, puli diam berputar pada porosnya sehingga seling mengulur pula sejauh Y menyebabkan rak sumber bergerak ke bawah menuju posisi dasar kolam.



Gambar 2. Sistem naik-turun rak sumber^[6]

3.1. Desain mekanik pengangkat rak sumber

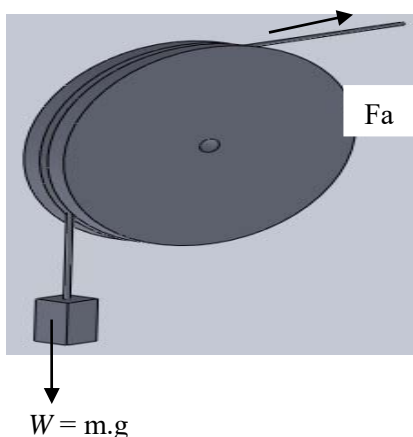
Pemodelan gaya

Masing-masing puli berada dalam kesetimbangan gaya. Kesetimbangan gaya pada puli A ditunjukkan pada Gambar 3. Puli berputar dilengkapi dengan bearing. Dengan demikian gesekan antara tali dengan puli sangat kecil. Faktor gesekan dimodelkan dengan Persamaan 2.

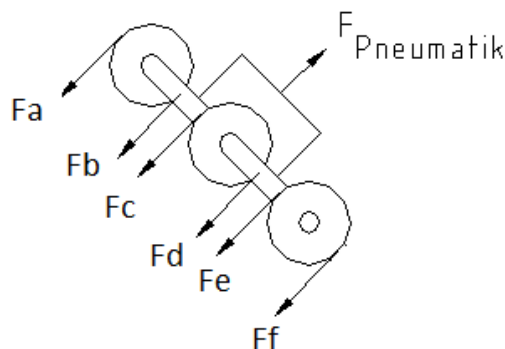
$$F_a = W / \eta \quad \dots\dots\dots(2)$$

dengan η adalah factor efisiensi puli akibat dari gesekan. Karena puli juga dilengkapi dengan bearing, maka gesekan menjadi kecil dan nilai η cenderung mendekati 1. Puli B, C, D, E dan F mengalami fenomena yang serupa. Kesetimbangan gaya untuk poros puli gerak menjadi seperti ditunjukkan dalam Gambar 4. Dengan demikian, gaya pada seling puli F menjadi:

$$F_f = W / \eta^6 \quad \dots\dots\dots(3)$$



Gambar 3. Kesetimbangan gaya pada puli A^[6]



Gambar 4. Kesetimbangan gaya poros puli gerak

Desain seling

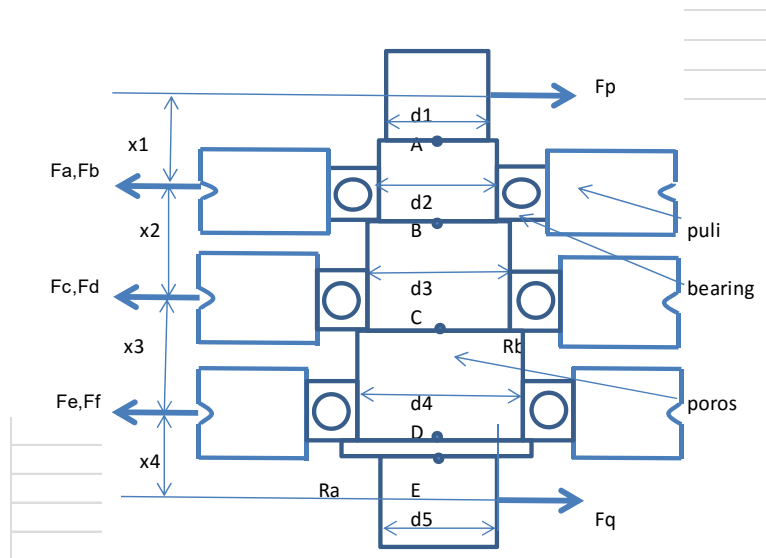
Dimensi seling ditentukan berdasarkan beban yang harus diangkat. Tegangan seling terbesar terjadi pada Ff. Beban rak sumber diasumsikan seberat 45 kg. Dengan asumsi

nilai η sebesar 0,9, besar gaya F_f menjadi 829,8 N. Mengingat seling sangat terkait dengan keselamatan iradiator, maka safety factor yang digunakan adalah 8. Dengan demikian beban desain tali menjadi 6638,6 N atau setara dengan 677,4 kg gaya. Berdasarkan katalog^[7], maka seling yang digunakan adalah tipe 1x7 SS 304 berukuran 1/8".

Karena faktor umur, seling mungkin saja mengalami kegagalan. Dalam hal ini sebelum putus, seling akan mengalami pertambahan panjang terlebih dahulu. Pemeriksaan seling juga harus dilakukan melalui perawatan berkala dengan metode visual apakah ada kawat serabut seling yang terputus.

Modul transmisi

Puli ditopang oleh poros. Besarnya gaya pada masing-masing puli tidak seragam, sebagaimana yang telah diuraikan dalam Persamaan 2 dan 3. Desain awal poros puli ditunjukkan dalam Gambar 5. Poros didesain dengan diameter bertingkat untuk memudahkan pemasangan dan perawatan puli. Poros diapit oleh penyangga pada ujung atas dan bawah. Masing-masing ketiga puli bergerak secara bebas tidak bergantung satu sama lain.



Gambar 5. Desain awal poros dan puli

F_a , F_b , F_c , F_d , F_e dan F_f diperoleh dengan menggunakan Persamaan 2. Beberapa nilai asumsi dimasukkan untuk menghitung besarnya momen bending di sepanjang poros. Dengan adanya gaya-gaya pada poros, diameter poros dapat dihitung seperti ditunjukkan dalam Tabel 2. Untuk poros, bahan yang digunakan adalah carbon steel S55C yang mempunyai kekuatan tarik 66 kg/mm². Dengan mengambil factor keselamatan sebesar 8, maka tegangan batas kekuatan menjadi 8,25 kg/mm².

Tabel 1. Hasil perhitungan diameter poros sproket

No	Parameter	stauan	Nilai
1	x1 (asumsi)	Mm	5
2	x2 (asumsi)	Mm	4
3	x3 (asumsi)	Mm	4
4	x4 (asumsi)	Mm	5
5	Batas kekuatan	Kg/mm ²	8,25
6	F_p	N	1823,6
7	F_q	N	2064,6
8	Momen di titik A	Nmm	4559,0
9		kg mm	465,2

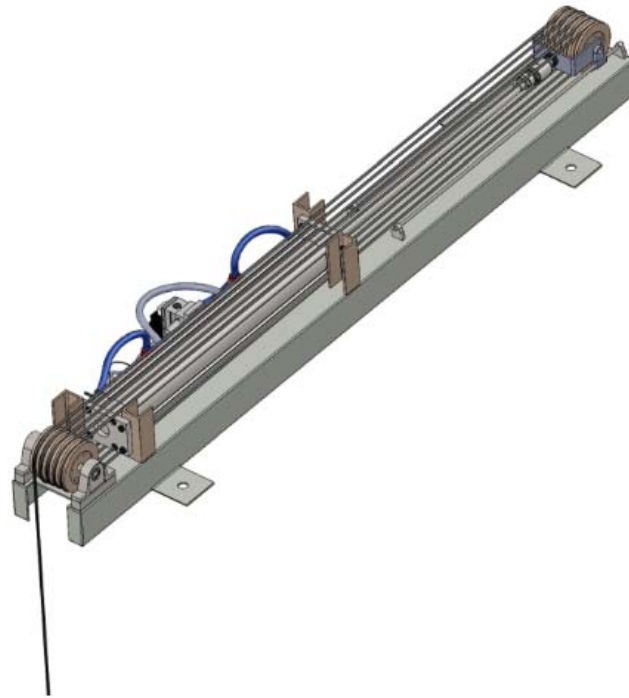
10	Momen di titik B	Nmm	10696,3
11		kg mm	1091,5
12	Momen di titik C	Nmm	11298,8
13		kg mm	1152,9
14	Momen di titik D	Nmm	6193,8
15		kg mm	632,0
16	Momen di titik E	Nmm	4129,2
17		kg mm	421,3
18	d1	mm	8,3
19	d2	mm	11,1
20	d3	Mm	11,3
21	d4	Mm	19,7
22	d5	mm	9,2

Diameter d1, d2, d3, d4 dan d5 merupakan diameter minimum. Diameter paling kritis adalah d4 karena menerima beban momen bending maksimum. Merujuk pada ketersediaan bearing di pasar, d4 diputuskan pada 20 mm. Selanjutnya diameter lain menyesuaikan seperti ditunjukkan dalam Tabel 2. Untuk memudahkan pemasangan dan pengaturan posisi, ujung atas dan bawah dilengkapi dengan drat.

Tabel 2. Ketetapan nilai-nilai desain untuk poros sproket

No	Parameter	satuan	Nilai	Keterangan
1	d1	mm	M14	drat
2	d2	mm	15	bearing
3	d3	mm	17	bearing
4	d4	mm	20	bearing
5	d5	mm	M14	drat

Berdasarkan perhitungan table di atas, desain rinci dikembangkan dengan hasil akhir seperti ditunjukkan dalam Gambar 5. Puli gerak dapat bergerak dengan gesekan minimum karena dilengkapi dengan bearing tipe roll bush. Rak sumber diangkat ke atas karena ditarik oleh seling dengan system pneumatic. Penurunan rak sumber dilakukan dengan bantuan gaya gravitasi karena berat rak sumber itu sendiri.



Gambar 5. Hasil pengembangan desain rinci modul transmisi

Penggerak rak sumber dengan perangkat pneumatik

Berbagai alternatif dapat digunakan untuk mengangkat dan menurunkan rak sumber: motor listrik, system pneumatic atau hidrolis. Motor mempunyai tingkat fleksibilitas tinggi: kecepatan dan posisi berhenti dapat diatur. Namun untuk diterapkan sebagai penggerak mekanik rak sumber, motor memiliki beberapa kelemahan yaitu membutuhkan tenaga listrik dan juga stopper. Apabila terjadi kegagalan stopper, motor tetap beroperasi yang dapat mengakibatkan kegagalan integritas struktur seperti patah seling ataupun struktur lain yang rusak. Sillinder pneumatic memberikan keunggulan untuk aplikasi ini. Rak sumber tidak akan pernah mengalami kelebihan gerakan. Silinder pneumatic memiliki stroke yang tertentu.

Sistem pneumatic memiliki seal. Akibat radiasi sinar gamma, seal yang berbahan karet mudah terdegradasi menjadi kaku. Kebocoran seal mengakibatkan tekanan dapat berkurang. Untuk alasan itulah komponen penggerak rak sumber diletakkan di luar ruang iradiasi

Bagian penuntun

Rak sumber diangkat oleh seling. Apabila tidak dilengkapi dengan penuntun, maka rak sumber dapat berayun dan atau berotasi. Untuk menghindari fenomena ini, rak sumber harus dilengkapi dengan penuntun. Berbagai pilihan tersedia namun yang paling praktis adalah dua seling pada kedua tepi rak sumber. Salah satu kriteria adalah penuntun tidak boleh menjadi penyebab macet gerakan rak sumber. Seling berdiameter kontinyu sehingga sangat cocok dengan kriteria ini. Yang perlu diperhatikan adalah seling tidak boleh kendor dan diameter lubang penuntun menyediakan gap yang cukup.

Pelindung rak sumber

Di dalam ruang irradiator, tote yang berisi produk iradiasi bergerak secara dinamis. Tentu saja ada potensi tote atau produk bertabrakan dengan rak sumber. Untuk menghindari tabrakan, sekeliling rak sumber dilengkapi dengan dengan pagar pelindung. Walaupun sebenarnya pagar pelindung juga menghalangi proses iradiasi karena akan menyerap sebagian energy yang dipaparkan. Oleh karena itu pagar dibuat dari bahan dengan densitas agak ringan seperti aluminium.

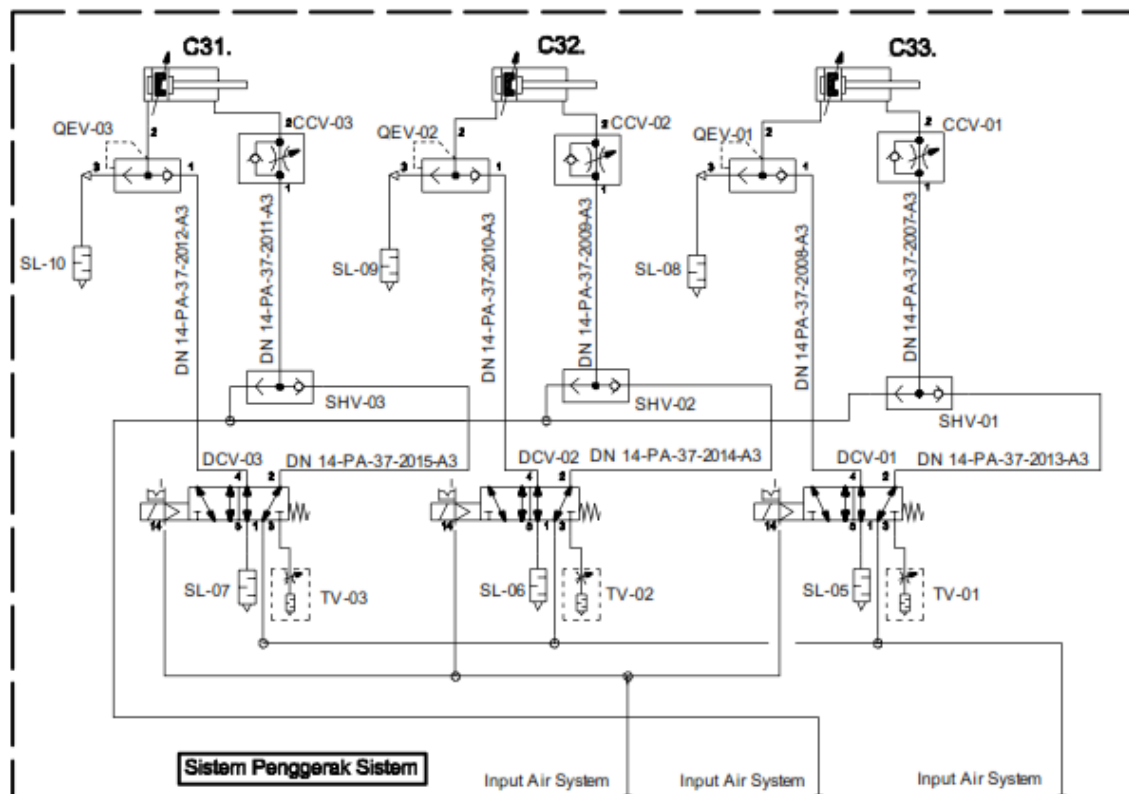
3.2. Desain pengendalian gerakan

Pengendalian gerakan berfungsi untuk menjamin bahwa sistem penggerak sumber berfungsi dengan aman. Pengendalian gerakan rak sumber dikembangkan baik melalui cara mekanis maupun cara elektronik. Pengendalian secara mekanik dilakukan dengan system pneumatic. Sementara pengendalian elektronik dilakukan dengan pemantauan sensor dan pemrograman komputer.

Pengendalian dengan system pneumatic

Dalam keadaan *default*, rak sumber harus berada di dasar kolam. Ini berarti, tanpa informasi apapun, secara otomatis sistem harus didesain sedemikian rupa sehingga rak sumber berusaha kembali ke dasar kolam secara alamiah. Rak sumber memiliki beban berat sendiri. Berkat gravitasi alamiah inilah, rak sumber cenderung menempati dasar kolam. Satu-satunya penggerak sumber adalah silinder pneumatic. Tipe *single acting cylinder* cocok untuk aplikasi ini, namun persyaratan panjang stroke sekitar 1 m menjadi kendala. Sebagai gantinya, tipe yang digunakan adalah *double acting cylinder* yang dilengkapi dengan *solenoid valve* jenis *monostable*. Ini berarti, rak sumber bergerak naik bila dan hanya bila *solenoid valve* diaktifkan. Apabila tidak diaktifkan, tekanan pendorong kembali kehilangan daya tekan dan tidak mampu mengangkat rak sumber melawan gaya gravitasi.

Dalam keadaan pengoperasian normal, mekanisme naik-turun rak sumber dikendalikan oleh silinder pneumatic. Skema dan prinsip kerja silinder *pneumatic* ditunjukkan dalam Gambar 4. Bila *solenoid valve* diaktifkan, tekanan udara tinggi mengalir melalui *valve*. Udara yang menempati sisi kanan piston terdorong keluar.



Gambar 6. Pengendalian gerakan rak sumber dengan skema pneumatic

Untuk menurunkan rak sumber, pengaktifan *solenoid valve* dihentikan. Lubang *inlet solenoid valve* kembali terbuka. Sebaliknya, tekanan udara tinggi masuk ke sisi kanan piston *pneumatic*. *Throttle valve* menahan udara keluar pada kecepatan piston tertentu. Pengaturan kecepatan keluar angin diatur dengan kalibrasi secara manual.

Pengendalian elektronik

Berbagai sensor digunakan untuk mendeteksi status atau keadaan system penggerak rak sumber. Silinder *pneumatic* dilengkapi dengan kepala *magnetic*. Dua buah sensor *magnetic* ditempatkan pada *body silinder pneumatic*, masing-masing pada posisi ujung kiri dan posisi ujung kanan. Dengan perlengkapan ini, posisi silinder *pneumatic* dapat terdeteksi. Melalui pemrograman, kegagalan system *pneumatic* terdeteksi bila waktu yang dibutuhkan oleh silinder *pneumatic* untuk bergerak dari posisi kiri ke posisi kanan atau sebaliknya tidak sesuai dengan waktu pengaturan. Kegagalan system *pneumatic* dapat meliputi kekurangan tekanan, kerusakan *valve*, kerusakan komponen bagian *pneumatic*, dan sebagainya.

Rak sumber memiliki dua posisi normal: posisi operasi dan posisi aman. Posisi operasi terjadi jika pengoperasian iradiator sedang dilakukan. Posisi aman dicapai bila iradiator tidak sedang dioperasikan dan rak sumber berada di dasar kolam. Untuk mengetahui kedua posisi ini, sensor mekanik dipasang pada posisi operasi dan posisi aman. Sensor dihubungkan dengan tali *vertical* ke atas yang menembus beton atas. Selanjutnya tali dihubungkan dengan sensor elektronis. Berkat sensor ini, posisi rak sumber dapat diketahui. Posisi operasi dan posisi aman dengan mudah terdeteksi bila sensor yang bersangkutan teraktifkan. Bila kedua sensor tidak teraktifkan berarti rak sumber berada dalam perjalanan antara kedua titik.

Seling pengangkat rak sumber juga dilengkapi sensor kekencangan. Sensor diletakkan di bawah seling antara puli A dan puli B. Dalam keadaan macet, seling akan mengalami kendor. Apabila terlalu kendor ada indikasi bahwa beban pada seling akibat gaya gravitasi rak sumber menjadi tidak normal. Fenomena seling putus atau rak sumber mengalami macet pada saat turun dapat terdeteksi dari sensor ini. Sensor seling penuntun juga disediakan untuk memantau unjuk kerja penuntun gerakan. Apabila seling kendor, rak sumber dapat mengalami ayunan atau rotasi.

Sistem deteksi terakhir yang dapat memberikan informasi apakah rak sumber sudah berada dalam posisi aman atau belum adalah sensor sinar gamma yang ditempatkan di dalam ruang iradiator. Tabel 4 merangkum daftar sensor dan fenomena abnormal yang dapat terdeteksi. Melalui pemrograman computer, mekanisme naik-turun rak sumber juga dihubungkan dengan system interlock yang tidak dibahas di sini. Berbagai keadaan yang dikaitkan dengan system interlok adalah pintu masuk manusia, blower untuk sirkulasi udara ruang iradiator, system kelistrikan, dan sebagainya.

Tabel 3. Daftar potensi kegagalan pada mekanisme rak sumber

No	Sensor	Fenomena abnormal yang terdeteksi
1	Sensor tegangan seling pengangkat	Seling pengangkat putus atau rak sumber macet
2	Sensor tegangan seling penuntun	Seling penuntun putus, gerakan rak sumber tak terkontrol
3	Sensor rak sumber pada posisi operasi dan aman	Posisi rak sumber berhenti sembarang
4	Sensor <i>pneumatic</i>	Kegagalan system <i>pneumatik</i>
5	Sensor sinar gamma di ruang iradiator	Posisi rak sumber berhenti sembarang

4. KESIMPULAN.

Telah dilakukan pengembangan desain mekanisme naik turun rak sumber radioisotop untuk instalasi iradiator. Desain meliputi desain mekanik dan pengendalian gerakan rak sumber. Sistem turun-naik rak sumber radiasi terdiri atas beberapa komponen, di antaranya adalah tali seling yang digunakan untuk menarik atau menurunkan rak sumber, perangkat *pneumatic* sebagai sumber penggerak, dan modul transmisi untuk mengkonversi gerakan *pneumatic* menjadi gerakan rak sumber.

Desain diawali dengan pemodelan gaya pada seling dan poros puli. Dengan asumsi beban rak sumber seberat 45 kg, perhitungan mengantarkan pada diameter seling sebesar 1/8" tipe 1x7 SS 304 dan desain poros dengan bertingkat untuk mengakomodasi bearing. Diameter paling kritis adalah 20 karena menerima beban momen bending maksimum.

Pengendalian gerakan rak sumber dikembangkan baik melalui cara mekanis maupun cara elektronik. Pengendalian secara mekanik dilakukan dengan system pneumatic. Sementara pengendalian elektronik dilakukan dengan pemantauan sensor dan pemrograman komputer. Berkat sensor-sensor yang ada, kejanggalan fenomena pengoperasian naik turun rak sumber dapat terdeteksi.

5. DAFTAR PUSTAKA,

1. Budi Santoso, *Desain Rinci Irradiator Gamma 200 kCi*, Usulan Kegiatan Penelitian Prfn-Batan, 2014
2. Anonymous, *Technical Specification: Multipurpose Continuous And Batch Gamma Irradiator (Co-60 Sources)*, Pt. Gamma Mitra Lestari, Jakarta, 2014
3. Sanda, *Spesifikasi Individu Untuk Sistem Naik-Turun Sumber*, Technical Note, TN38-WP1-WBS2-RFN-2014-23, 21 Agustus 2014
4. Anonymous, *International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources*, IAEA Safety Series No. 115, Vienna, 1996
5. Sularso, 2002, *Dasar Perencanaan Dan Pemilihan Elemen Mesin*. PT Prandya Paramita, Jakarta.
6. Ari Satmoko, *Preliminary Calculation and Sizing pada Bagian Mekanik Irradiator Gamma Kapasitas 200 kCi*, Technical Document, TD03-WP0-WBS2-RFN-2014-23, 17 Oktober 2014
7. Anonymous, Catalogue: 1x7 Preformed Stainless Steel Strand Non-Flexible Type 302/304, Loos &Co., Inc.