

## KOMBINASI GERAKAN OBYEK DI RUANG IRADIASI PADA DESAIN FASILITAS IRADIATOR GAMMA IZOTOP™ UNTUK PRFN

Achmad Suntoro  
Pusat Rekayasa Fasilitas Nuklir (PRFN) – BATAN  
E-mail : [suntoro@batan.go.id](mailto:suntoro@batan.go.id)

### ABSTRAK

*KOMBINASI GERAKAN OBYEK DI RUANG IRADIASI PADA DESAIN FASILITAS IRADIATOR GAMMA IZOTOP™ UNTUK PRFN. Sistematis untuk menentukan kombinasi gerakan obyek di ruang iradiasi pada desain iradiator gamma Izotop™ untuk PRFN dibuat. Sistematis ini dapat digunakan sebagai arahan untuk menentukan kombinasi gerakan obyek di ruang iradiasi sehingga mendapatkan kombinasi gerakan yang optimal. Keterkaitan pola gerak di luar dan di dalam ruang iradiasi dianalisis sehingga diperoleh kombinasi segmen-gerak di luar dan di dalam ruang iradiasi sebagai segmen-gerak penentu. Segmen-gerak penentu tersebut digunakan sebagai acuan untuk menentukan jumlah minimum dan maksimum lokasi kosong di kerangka-gerak, karena gerakan di kerangka-gerak tidak mungkin terjadi tanpa adanya lokasi kosong. Kombinasi-gerakan menggunakan Gantt-chart dan diagram-waktu dibuat untuk kondisi minimum dan maksimum lokasi kosong tersebut sebagai contoh. Dengan teknik ini dapat ditentukan kombinasi gerak lainnya untuk jumlah lokasi kosong diantara nilai minimum dan maksimum tersebut. Langkah selanjutnya adalah kombinasi-gerak tersebut akan menjadi masukan program simulator untuk diketahui nilai DUR dari tiap kombinasi, sehingga kombinasi-gerak yang optimal dapat ditentukan.*

*Katakunci: kombinasi-gerak, iradiator-gamma, waktu-iradiasi, kecepatan-produksi.*

### ABSTRACT

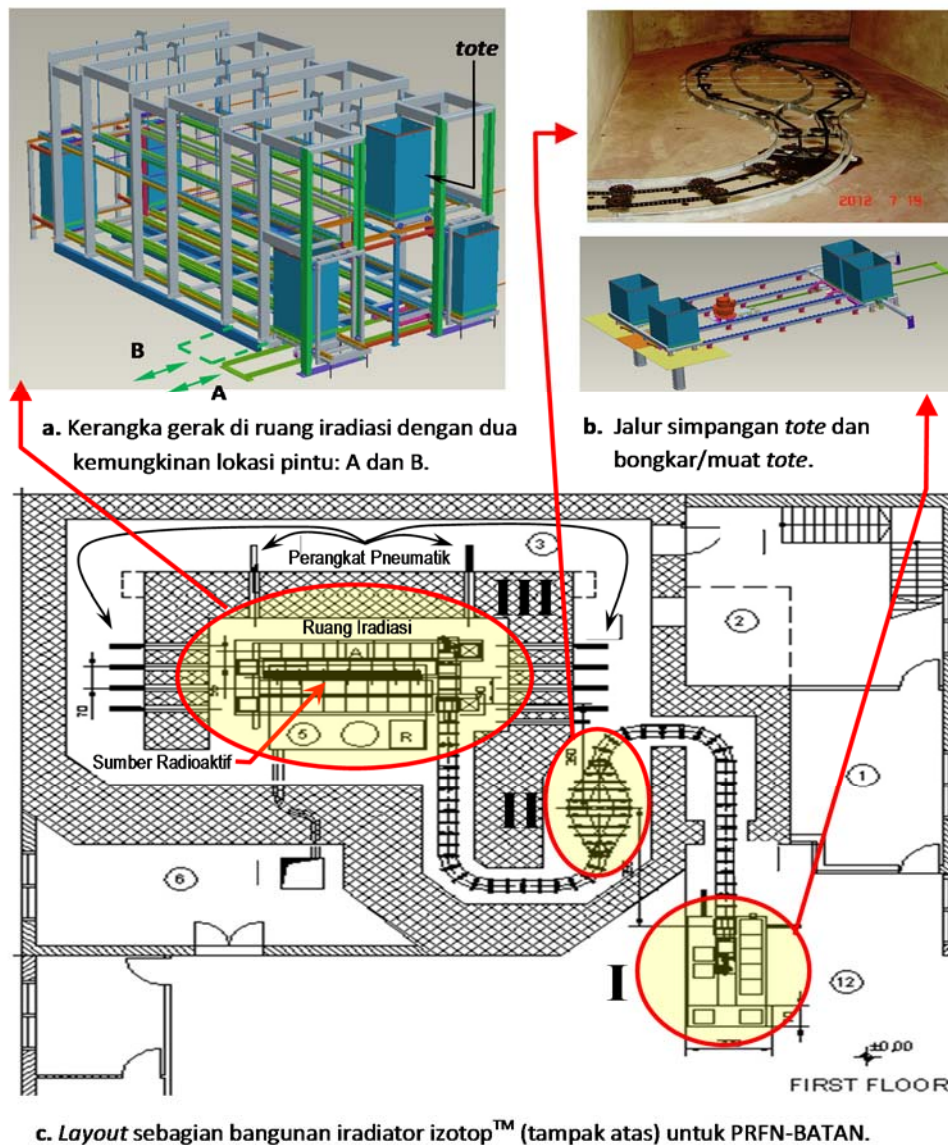
*OBJECT MOVEMENT COMBINATION IN IRRADIATION ROOM OF THE IZOTOP™ GAMMA IRRADIATOR FACILITY DESIGN FOR PRFN. A systematic method to determine the combination of the movement of objects in the room irradiation on the Izotop™ gamma irradiator design for PRFN is made. This systematic method can be used as a guide to determine the combination of the movement of objects in the irradiation room to obtain optimal movement combination. The linkage patterns of movement between outside and inside irradiation room are analyzed in order to obtain a set of segment-movement determinants. The set of segment-movement determinant is used as a reference for determining the minimum and maximum number of empty location in the motion-framework, because the movement in the motion-framework can not happen without empty location. Movement combination using a Gantt-chart and time-diagram are made for such both the minimum and maximum conditions of the empty location as for examples of movement combination created. By this technique it can be determined the other movement combinations for the number of empty location between such minimum and maximum values. The next step is that the movement combinations will become the input of a simulator program to define the DUR value of each movement combination, so that the optimal movement combination can be determined.*

*Keyword: movement-combination, gamma-irradiator, irradiation-time, throughput.*

## 1. PENDAHULUAN

Pusat Rekayasa Fasilitas Nuklir – BATAN (PRFN-BATAN) sedang membuat rencana untuk membangun sebuah fasilitas iradiator gamma: menggunakan sumber radiasi Co-60, nilai aktifitas hingga 2 MCi, jenis *panoramic*, kategori IV<sup>[1]</sup>, dan berlokasi di kawasan Puspipetek Serpong Tangerang Selatan. Desain fasilitas iradiator tersebut mengacu pada *reference-plant* fasilitas iradiator komersial dari Izotop™ Hongaria<sup>[2]</sup>, dengan kesepakatan bahwa PRFN-BATAN diberi kebebasan membangun menggunakan detail desain sendiri kecuali pada bagian instrumentasi dan keselamatan radiasinya. Dua kegiatan tersebut harus menggunakan desain dari Izotop™ Hongaria sehingga tidak ada detail informasi pada *reference-plant* atas keduanya hingga proses pembangunan fisik instalasi

berlangsung. Namun demikian, PRFN-BATAN tetap mempersiapkan desain sistem instrumentasi dan keselamatan radiasi tersebut (versi PRFN-BATAN) yang akan berguna untuk proses perizinan<sup>[3, 4]</sup>, pembelajaran, adaptasi, instalasi/konstruksi, dan evaluasi atas sistem instrumentasi dan keselamatan yang akan dibangun nanti.



**Gambar 1.** Layout instalasi iradiator Izotope™ untuk PRFN<sup>[5]</sup>.

Layout bangunan iradiator dan sistem pergerakan obyek yang akan diiradiasi ditunjukkan pada Gambar 1. Obyek yang akan diiradiasi dimasukkan ke dalam kotak aluminium yang disebut *tote*, dan di lokasi I pada Gambar 1 proses pengisian dan pembongkaran obyek ke dan dari *tote* berlangsung. Selanjutnya *tote* bergerak dari lokasi I menuju lokasi III untuk proses iradiasi dan sebaliknya dari lokasi III menuju lokasi I untuk obyek yang telah diiradiasi. Lokasi II disediakan untuk proses simpangan dua gerakan *tote* yang berlawanan arah tersebut dengan tujuan untuk efektifitas lintasan<sup>[6]</sup> sehingga dua gerakan *tote* tersebut dapat mulai bergerak dalam waktu yang bersamaan. Lokasi III digunakan untuk proses iradiasi, yaitu *tote* memasuki ruang iradiasi mengikuti lintasan dari kerangka-gerak di dalam ruang iradiasi seperti ditunjukkan pada Gambar 1.a.

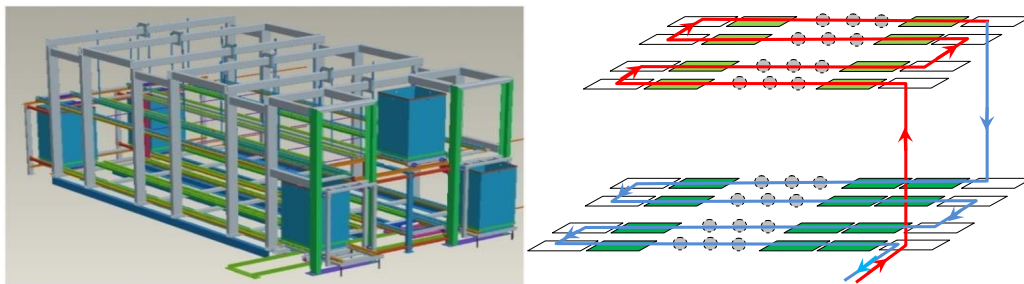
Gerakan *tote* di kerangka-gerak dijalankan menggunakan sistem pneumatik. Sistem pneumatik terletak di balik dinding ruang iradiasi dan menggunakan *piston* pendorong dalam menggerakkan rangkaian *tote* di kerangka-gerak di ruang iradiasi. Setiap *tote* di

kerangka-gerak akan berfungsi juga sebagai komponen transmisi gaya gerak dari *piston* pendorong tersebut. Oleh karena itu gerakan *tote* hanya dapat berlangsung dalam satu baris atau segmen di kerangka-gerak jika dalam baris/segmen tersebut terdapat lokasi kosong (tidak terisi oleh *tote*). Kerangka-gerak terdiri dari 16 segmen lintasan, sehingga ada banyak kemungkinan kombinasi gerakan *tote* di segmen untuk dapat memindahkan sebuah *tote* dari pintu masuk kerangka-gerak hingga pintu keluarnya. Situasi tersebut merupakan lahan pengendalian dari sistem instrumentasi fasilitas iradiator yang akan dibangun. Dalam makalah ini akan ditunjukkan dua kemungkinan kombinasi gerak *tote* di segmen kerangka-gerak, yang merupakan obyek pengendalian oleh sistem instrumentasi sehingga sistem instrumentasi dapat dibuat desain rincinya meskipun desain dasar instrumentasi tidak terdapat di *reference-plant* sebagai acuan. Dua kemungkinan kombinasi gerak tersebut adalah kombinasi ekstrim, yaitu kombinasi yang menyebabkan waktu-iradiasi tersingkat dan terlama. Kondisi ekstrim diperlukan untuk proses evaluasi dalam rangka optimasi untuk mendapatkan pola gerak yang sesuai dengan *user-requirement* dan pilihan terbaik.

## 2. METODOLOGI

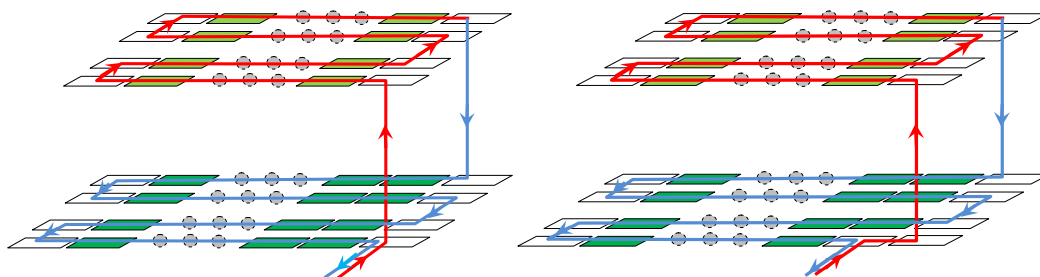
### 2.1 Kerangka-Gerak

Kerangka-gerak berada di ruang iradiasi sebagai tempat proses iradiasi dan lintasan gerak selama *tote* berada di ruang iradiasi. Bentuk fisik kerangka-gerak dan arah gerakan *tote* di kerangka tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Kerangka-gerak *tote* di ruang iradiasi dan arah serta jalur gerakannya.

Ada dua kemungkinan lokasi pintu masuk/keluar *tote* di ruang iradiasi, di sudut kerangka dan tidak di sudut kerangka seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Dua posisi pintu tersebut akan menimbulkan kombinasi gerakan *tote* yang berbeda sehingga dapat menghasilkan karakteristik operasi iradiator yang berbeda<sup>[7]</sup>.



(a). Lokasi pintu di sudut kerangka.

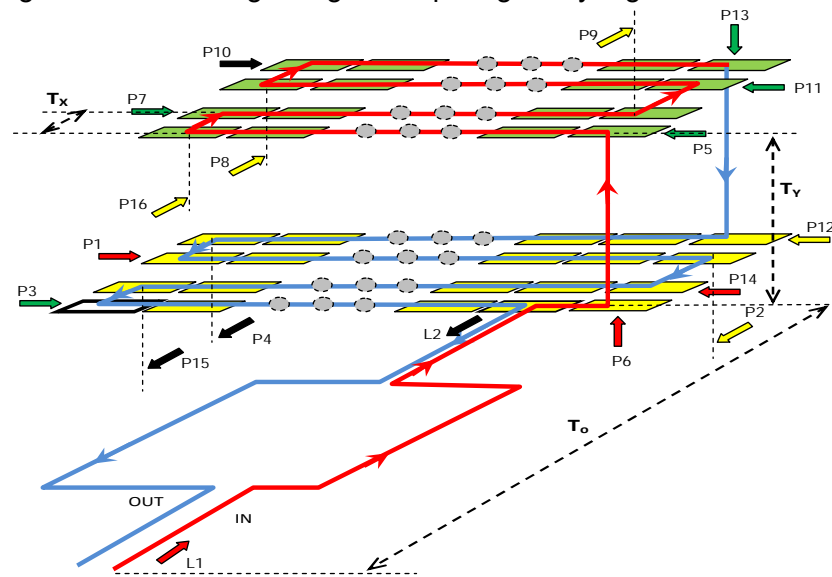
(b). Lokasi pintu tidak di sudut kerangka.

Gambar 3. Lokasi pintu masuk/keluar *tote* di ruang iradiasi.

### 2.2 Segmen-Gerak

Gerakan *tote* di ruang iradiasi bersifat diskrit yaitu segmen per segmen mengikuti lintasan pada kerangka-gerak. Ada 16 segmen (P1 s/d P16) di kerangka-gerak dan 2

segmen (L1&L2) di luar kerangka-gerak seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Segmen-gerak adalah gerakan *tote* dari awal Bergeraknya hingga berhentinya (satu langkah). Gerakan ini di ruang iradiasi terjadi karena dorongan *piston* oleh sistem pneumatik dari balik dinding ruang iradasi. Di luar ruang iradiasi gerakan *tote* kontinu oleh tarikan rantai yang digerakkan oleh motor listrik. Dengan perulangan kombinasi 18 segmen-gerak tersebut, sebuah *tote* dapat bergerak dari lokasi pengisian *tote* menuju ke ruang iradiasi melalui pintunya untuk mengitari sumber radiasi mengikuti lintasan di kerangka-gerak, dan keluar dari ruang radiasi melalui pintu yang sama karena pintu kerangka-gerak hanya satu menuju lokasi pengosongan *tote*. Dalam kombinasi dari 18 segmen-gerak tersebut, ada *tote* yang dapat bergerak bersama-sama dan ada yang tidak dapat bergerak bersama-sama karena harus menunggu giliran sesuai dengan algoritma pola gerak yang ditentukan.



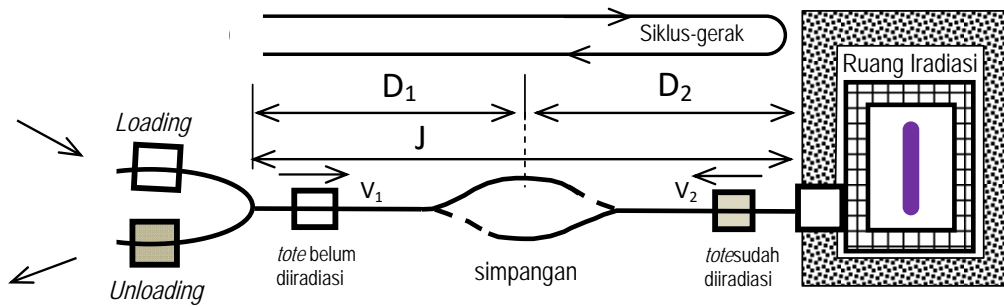
Gambar 4. Segmen lintasan *tote* dan nomor segmennya.

Ada tiga jenis segmen-gerak, yaitu gerakan *horizontal* dan *vertical* untuk pergerakan *tote* di kerangka-gerak (dengan  $T_x$  &  $T_y$  waktu yang diperlukan dalam gerakan tersebut), serta gerakan keluar/masuk ruang iradiasi dengan lintasannya diluar ruang iradiasi (dengan  $T_o$  waktu yang diperlukan), ditunjukkan pada Gambar 4.

### 2.3 Siklus-Gerak

Pola gerakan *tote* di luar ruang iradiasi secara sederhana dapat digambarkan seperti pada Gambar 5. Gerakan *tote* dari lokasi *loading* menuju ke ruang iradiasi yang juga secara bersamaan dilakukan gerakan *tote* dari ruang iradiasi ke lokasi *unloading* disebut siklus-gerak. Waktu satu siklus-gerak adalah waktu dimulai dari keluarnya satu *tote* dari lokasi *loading* hingga ada satu *tote* yang masuk ke lokasi *Unloading*. Oleh karena itu, waktu-siklus identik dengan batas waktu maksimum yang disediakan untuk kegiatan *loading* dan *unloading*. Demikian juga waktu-siklus berpengaruh besar pada *throughput* atau *production-rate* dari operasi instalasi iradiator tersebut.

Sebuah *tote* boleh keluar dari ruang iradiasi setelah ada *tote* dari luar ruang iradiasi yang akan menggantikannya masuk ke ruang iradiasi. Demikian juga *tote* dari lokasi *Loading* boleh keluar menuju ruang iradiasi jika telah ada *tote* yang masuk ke lokasi *Unloading*. Dalam desain, siklus-gerak harus dibuat secepat mungkin atau menggunakan waktu seminimum mungkin, karena siklus-gerak mempengaruhi *throughput* dari instalasi proses iradiasi tersebut. Oleh karena itu, kombinasi segmen-gerak di ruang iradiasi harus dibuat sedemikian rupa sehingga dapat menghasilkan waktu siklus-gerak yang singkat.



Gambar 5. Siklus-gerak: Gerakan tote di luar ruang iradiasi.

Hubungan *throughput* atau *production-rate* dengan waktu-siklus adalah sebagai berikut:

$$\text{Throughput} = \frac{1}{\text{Waktu - siklus (dalam menit)}} \quad \text{tote/menit} \quad \dots\dots\dots(1)$$

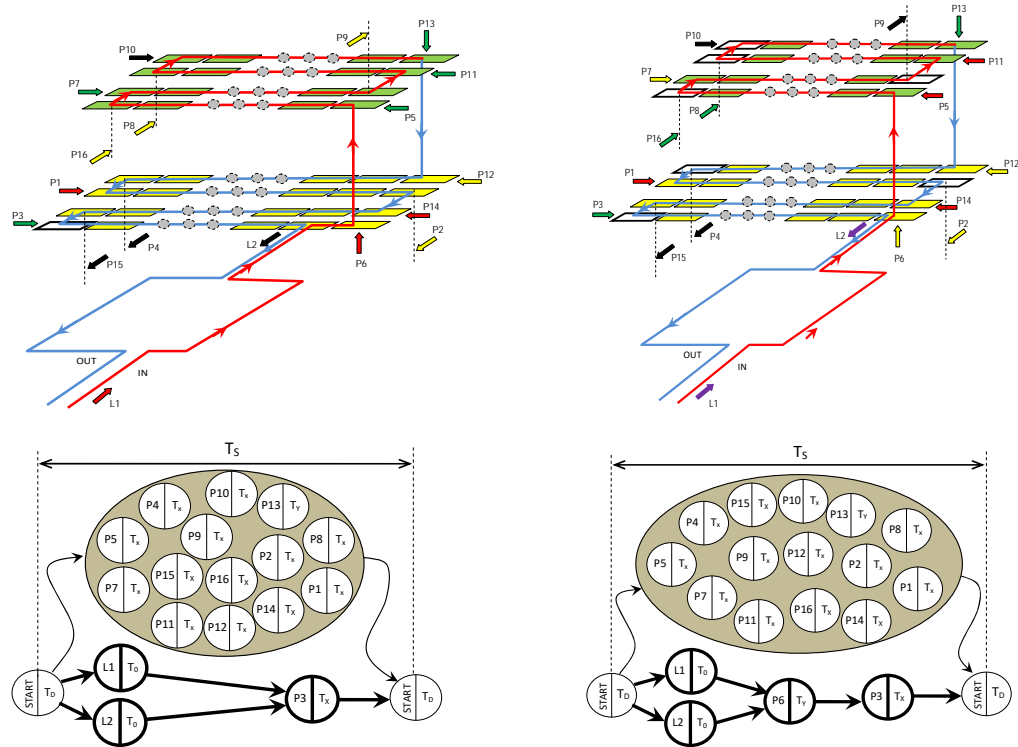
Waktu-siklus nilainya juga ditentukan oleh kondisi segmen-gerak di ruang iradiasi. Siklus-gerak minimum adalah waktu tersingkat yang diperlukan oleh siklus-gerak untuk menyelesaikan gerakannya. Waktu-siklus minimum bisa tercapai jika terjadi sinkronisasi antara gerak di luar ruang iradiasi (siklus-gerak) dengan gerakan di dalam ruang iradiasi (segmen-gerak).

Waktu tersingkat tersebut dapat diperoleh dari:

- Meningkatkan kecepatan gerak *tote*. *Tote* di luar ruang iradiasi digerakkan menggunakan rantai yang digerakkan oleh sebuah motor listrik, sehingga kecepatan gerak *tote* dapat diatur dari kecepatan motor listrik tersebut (Gambar 5:  $v_1 = v_2$ , kecepatannya bisa diatur).
- Memperpendek jarak lokasi awal dan akhir (*loading* dan *unloading*) *tote* di luar ruang iradiasi ke lokasi pintu ruang iradiasi. Pada Gambar 5, dengan adanya simpangan, dan dibuat jarak  $D_1 = D_2$ , maka jarak untuk siklus-gerak yang semula berjarak  $2J$  menjadi  $J$ , karena dalam waktu bersamaan *tote* yang menuju ruang iradiasi dan yang menuju *unloading* bergerak bersama-sama dan akan bersimpangan di daerah simpangan. Ketika *tote* yang berasal dari *loading* sampai di ruang iradiasi, maka *tote* yang berasal dari ruang iradiasi juga sampai di lokasi *unloading*, sehingga jarak efektif yang mempengaruhi waktu siklus adalah  $J$  pada Gambar 5.
- Menentukan kombinasi segmen-gerak *tote* di ruang iradiasi sedemikian rupa sehingga ketika ada *tote* dari luar yang masuk ke ruang iradiasi, maka akan langsung disambut oleh segmen-gerak di ruang iradiasi yang memindahkan *tote* tersebut dari lokasi pintu masuk dan mengisinya dengan *tote* yang sudah siap untuk keluar ruang iradiasi serta mengeluarkan *tote* tersebut ke luar ruang iradiasi. Kombinasi segmen-gerak di ruang iradiasi tersebut dibuat agar tidak ada waktu penungguan yang lama dari masuknya *tote* di ruang iradiasi dengan perintah untuk keluarnya *tote* dari ruang iradiasi (kombinasi segmen-gerak di ruang iradiasi harus sinkron dengan segmen-gerak di luar ruang iradiasi).

Kombinasi segmen-gerak yang menentukan sinkronisasi dengan siklus-gerak telah dapat ditentukan<sup>[6]</sup>, yaitu segmen: (L1//L2)-(P3) untuk pintu *tote* tidak di sudut kerangka dan (L1//L2)-(P6)-(P3) untuk pintu *tote* di sudut kerangka seperti ditunjukkan pada Gambar 6, berbeda tergantung posisi pintu masuk/keluar *tote* di kerangka-gerak. Kombinasi segmen-gerak selain segmen gerak penentu tersebut bersifat bebas tetapi waktu pelaksanaan total nya tidak boleh melebihi dari waktu yang diperlukan oleh segmen-gerak penentu tersebut.

Dalam makalah ini dua kombinasi segmen-gerak ekstrim akan ditentukan, yaitu segmen gerak yang memerlukan jumlah lokasi kosong di kerangka gerak maksimum dan minimum. Lokasi kosong di kerangka gerak akan menentukan jumlah *tote* yang beroperasi sehingga menentukan nilai waktu-iradiasi<sup>[6]</sup>.



(a). Pintu *tote* tidak di sudut kerangka. (b). Pintu *tote* di sudut kerangka.

Gambar 6. Segmen-gerak penentu untuk waktu siklus-gerak minimum.

Kombinasi segmen-gerak penentu pada pada Gambar 6 tersebut diperoleh secara empiris (coba-coba). Dalam operasi proses iradiasi, siklus-gerak tersebut akan berlangsung berulang-ulang (periodik) dan waktu siklus-gerak tersebut merupakan bagian dari waktu-iradiasi. Waktu siklus-gerak diperoleh menggunakan persamaan sebagai berikut<sup>[6]</sup>:

untuk Gambar 6.a.:

$$T_{sa} = (T_0 + T_x) \dots\dots\dots(2)$$

untuk Gambar 6.b.:

$$T_{sb} = (T_0 + T_x + T_y) \dots\dots\dots(3)$$

- $T_{sa}$  : Waktu siklus-gerak untuk Gambar 6.a.
- $T_{sb}$  : Waktu siklus-gerak untuk Gambar 6.b.
- $T_0$  : Waktu gerak *tote* masuk/keluar ruang iradiasi dari jalur *Loading/Unloading*.
- $T_x$  : Waktu gerak *tote* horizontal di ruang iradiasi.
- $T_y$  : Waktu gerak *tote* vertikal di ruang iradiasi.

### 2.4 Waktu-Iradiasi

Waktu-iradiasi adalah waktu sebuah *tote* berada di ruang iradiasi. Dimulai dari masuknya sebuah *tote* ke ruang iradiasi hingga keluarnya *tote* tersebut dari ruang iradiasi. Waktu-iradiasi tersingkat menjadi karakteristik instalasi iradiator karena menurunkan waktu-iradiasi dibawah waktu tersebut tidak mungkin dilakukan, sehingga waktu tersebut menjadi batasan instalasi iradiator terhadap produk yang akan di iradiasi yang memerlukan

dosis radiasi rendah. Produk pangan pada umumnya memerlukan dosis radiasi yang rendah<sup>[8]</sup> sehingga memerlukan waktu-iradiasi yang singkat. Memperpanjang waktu-iradiasi dapat dilakukan dengan memperpanjang waktu-siklus (dengan sisipan *delay*, *d*, atau  $T_D$  pada Gantt-Chart di Gambar 6), memperlambat kecepatan gerak *tote* di luar ruang iradiasi (mengatur kecepatan motor listrik penggerak), dan atau melakukan pengulangan gerak lebih dari satu kali mengitari sumber radiasi.

Waktu-iradiasi dapat ditulis menggunakan persamaan berikut<sup>[6]</sup>.

untuk pintu *tote* tidak disudut kerangka-gerak (Gambar 6.a):

$$T_{R1} = (T_{sa} + d) n \quad \dots\dots\dots(4)$$

untuk pintu *tote* disudut kerangka-gerak (Gambar 6.b):

$$T_{R2} = (T_{sb} + d) n \quad \dots\dots\dots(5)$$

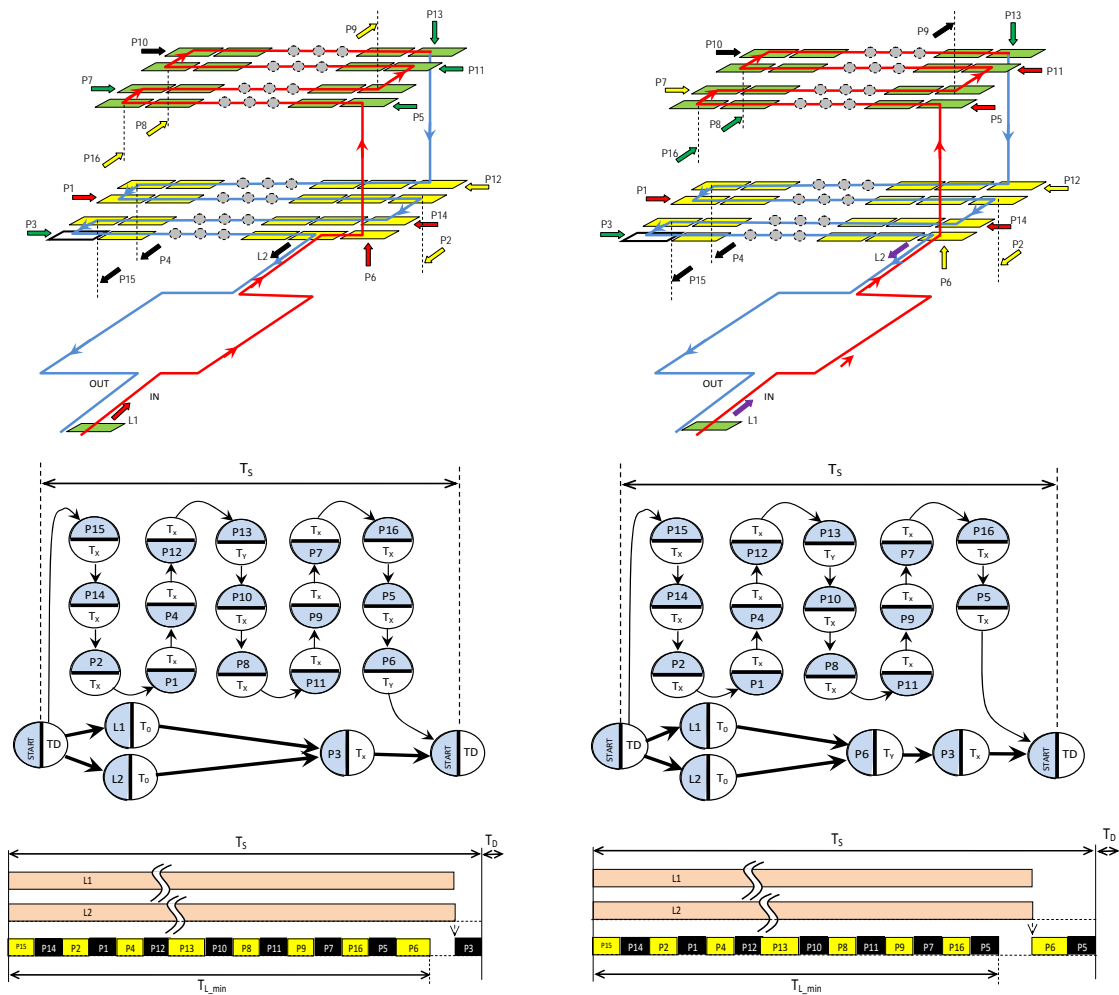
- $T_{R1}$  : Waktu-iradiasi untuk pintu *tote* tidak disudut kerangka gerak.
- $T_{R2}$  : Waktu-iradiasi untuk pintu *tote* disudut kerangka gerak.
- $T_{sa}$  : Waktu siklus-gerak tersingkat untuk pintu *tote* tidak disudut kerangka gerak.
- $T_{sb}$  : Waktu siklus-gerak tersingkat untuk pintu *tote* disudut kerangka gerak.
- d* : Waktu tunda (*delay*).
- n* : Jumlah *tote* yang beroperasi di kerangka-gerak.

Dari persamaan [4] dan [5] terlihat bahwa dalam operasinya waktu-iradiasi dapat dikendalikan nilainya dengan mudah melalui nilai waktu-tunda (*delay*), *d*. Parameter lain penentu waktu-iradiasi yaitu waktu-siklus dan jumlah *tote* yang beroperasi tidak praktis dijadikan parameter pengendali, karena hasil pengendalian-nya tidak bisa memberikan perubahan waktu-iradiasi yang halus (*smooth*).

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 Kombinasi-Gerak dengan Jumlah Lokasi Kosong Minimum

Jumlah *tote* (*n*) yang beroperasi terbentuk oleh jumlah lokasi *tote* di kerangka-gerak dikurangi jumlah lokasi kosong yang tidak terisi *tote* ketika beroperasi. Di pintu *tote* kerangka-gerak akan selalu kosong (tidak terisi *tote*) karena ditinggalkan *tote* yang telah selesai proses iradiasinya dan dipersiapkan untuk *tote* dari luar ruang iradiasi yang akan masuk. Selain itu, satu lokasi kosong lagi diperlukan untuk pergerakan geser-menggeser-*tote* hingga *tote* yang baru masuk bisa mengitari sumber mengikuti lintasan kerangka-gerak dan sampai ke pintu keluar yang sama lokasinya ketika *tote* tersebut masuk. Tidak mungkin pergeseran (gerakan) *tote* bisa terjadi jika tidak ada lokasi kosong pada segmen lintasan. Oleh karena itu jumlah minimum lokasi *tote* kosong yang diperlukan adalah dua lokasi pada desain instalasi iradiator ini. Gantt-chart dan diagram-waktu dari kombinasi segmen-gerak dengan jumlah *tote* kosong minimum tersebut ditunjukkan pada Gambar 7, untuk dua kemungkinan lokasi pintu *tote* di kerangka-gerak. Kondisi awal posisi *tote*, yaitu kotak tidak berwarna atau warna putih adalah lokasi kosong tanpa *tote*. Jumlah lokasi kosong minimum akan menyebabkan efisiensi penggunaan radiasi menjadi tinggi, tetapi waktu-iradiasi menjadi lebih lama karena nilai *n* pada persamaan [3] atau [4] menjadi besar. Untuk mendapatkan waktu-iradiasi yang singkat dari pengendalian melalui variabel *n* ini, maka jumlah lokasi *tote* yang kosong harus dibuat maksimal, tetapi berakibat efisiensi penggunaan radiasi menjadi turun.



(a). Pintu *tote* tidak di sudut kerangka.

(b). Pintu *tote* di sudut kerangka.

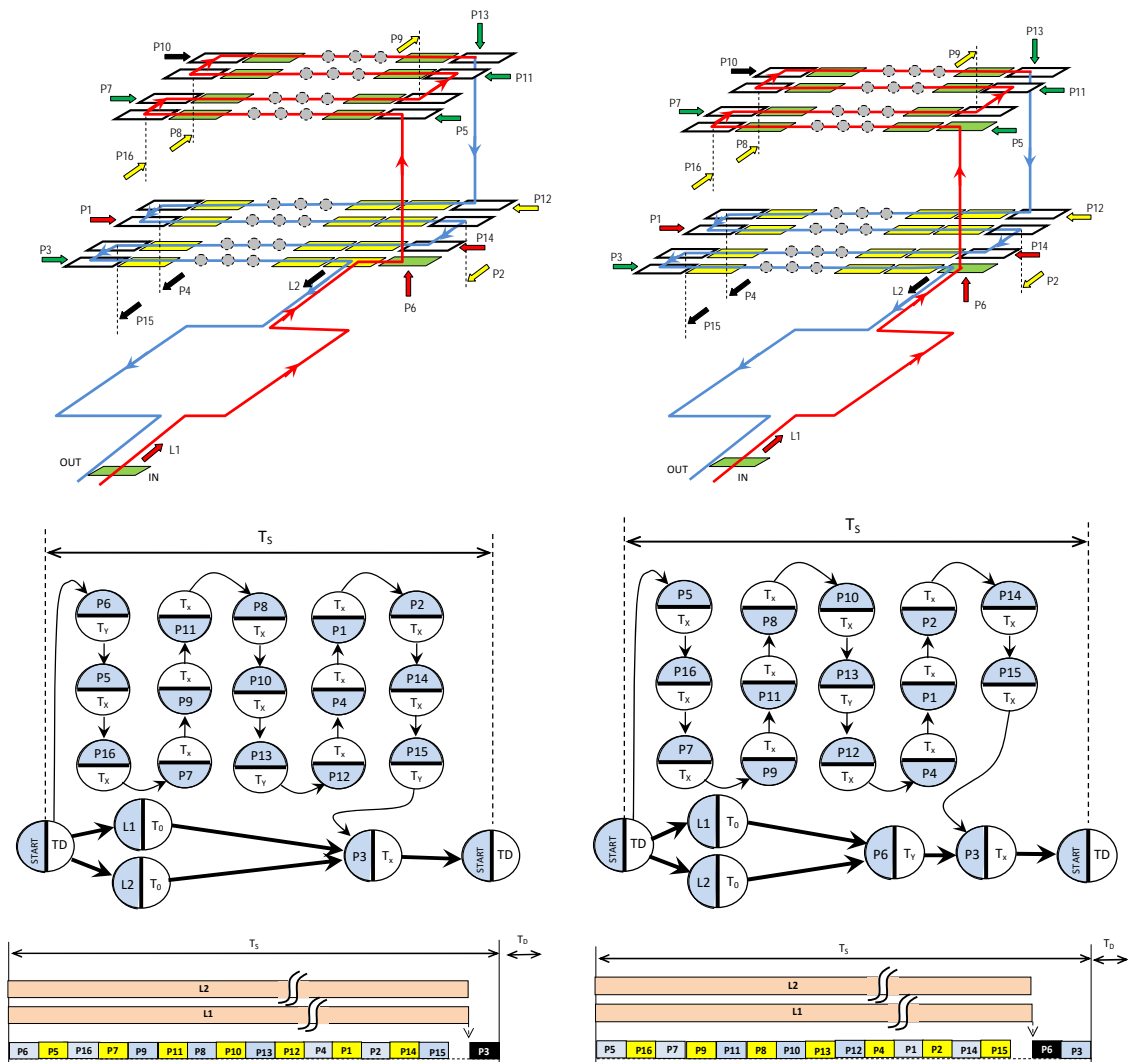
Gambar 7. Kombinasi segmen-gerak di ruang iradiasi dengan minimum lokasi kosong.

### 3.2 Kombinasi-Gerak dengan Jumlah Lokasi Kosong Maksimum

Dari bentuk struktur kerangka-gerak yang terdiri dari 16 segmen-gerak, maka jumlah maksimum lokasi kosong adalah 15 lokasi, yaitu lokasi di setiap pinggir bagian sisi-lebar dari kerangka. Angka 15 diperoleh dari jumlah lokasi *tote* pada ujung sisi-lebar adalah 16 lokasi (8 di atas dan 8 di bawah), tetapi tidak boleh semua lokasi ujung sisi-lebar tersebut kosong, minimal harus ada satu lokasi yang terisi *tote* untuk awal gerak *tote* karena dorongan piston sistem pneumatik terjadi pada lokasi ujung sisi-lebar tersebut. Untuk kerangka-gerak dengan pintu tidak di sudut kerangka, jumlah lokasi kosong bisa 16 lokasi, karena pintu *tote* akan selalu kosong setelah ditinggalkan *tote* yang keluar ruang iradiasi dan berlokasi tidak disudut kerangka sehingga dalam segmen yang berisi pintu tersebut dapat mempunyai dua lokasi kosong. Kondisi awal *tote*, Gantt-chart, dan diagram-waktu dari kombinasi segmen-gerak dengan jumlah *tote* kosong maksimum tersebut ditunjukkan pada Gambar 8, untuk dua kemungkinan lokasi pintu *tote* di kerangka-gerak.

Pola kombinasi-gerak *tote* di ruang iradiasi untuk jumlah lokasi kosong minimum dan maksimum terlihat serupa, yaitu gerakan serial hanya satu *tote* setiap saat yang bergerak di ruang iradiasi dengan urutan segmen-gerak nya yang berbeda. Karena polanya sama, diprediksi kedua jenis kombinasi-gerak tersebut akan menghasilkan nilai DUR (*Dose Uniformity Ratio*) sama. Kombinasi-gerak lain untuk lokasi kosong diantara nilai minimum dan maksimum tersebut perlu ditentukan juga untuk masukan program simulator sehingga nilai DUR nya dari setiap kombinasi-gerak dapat diprediksi nilainya.





(a). Pintu *tote* tidak di sudut kerangka.

(b). Pintu *tote* di sudut kerangka.

Gambar 8. Kombinasi segmen-gerak di ruang iradiasi dengan maksimum lokasi kosong.

### 3.3 Kombinasi-Gerak dan Jumlah Lokasi Kosong

Penentuan jumlah lokasi kosong harus selalu mengacu pada kombinasi segmen-gerak penentu. Kombinasi gerak lain yang tidak mengacu pada segmen-gerak penentu tersebut dapat saja menghasilkan jumlah lokasi kosong *tote* minimum dan maksimum yang berbeda. Batasan minimum dan maksimum jumlah lokasi kosong *tote* digunakan sebagai acuan untuk mencari/menentukan kombinasi-gerak lainnya dengan nilai jumlah lokasi kosongnya terletak diantara dua batasan tersebut. Sesungguhnya kombinasi-gerak terbaik adalah kombinasi-gerak yang menghasilkan nilai DUR pada obyek yang diiradiasi mendekati nilai satu. Nilai DUR digunakan untuk menilai homogenitas hasil iradiasi, yang didefinisikan sebagai perbandingan dosis maksimum dengan dosis minimum yang diterima oleh obyek yang diiradiasi<sup>[9]</sup>. Untuk itu diperlukan sebuah program simulator dengan masukan kombinasi-gerak dan luarannya nilai DUR. Setiap kombinasi gerak akan menghasilkan dosis yang diserap obyek sama karena gerakan obyek dari masuk hingga keluar ruang iradiasi bersifat periodik. Suatu aktifitas gerak yang bersifat periodik, secara berulang akan melalui posisi yang sama dalam jangka waktu periode yang sama<sup>[10]</sup>. Homogenitas penyerapan radiasi tersebut yang perlu diketahui lebih dalam menggunakan program simulator yang sedang disiapkan (didesain) di PRFN.

Dari Gantt-Chart atau diagram-waktu kombinasi segmen-gerak yang terbentuk dan menjadi pilihan, proses pengendalian gerakan *tote* tersebut dapat dibuat desain rincinya menggunakan PLC (*Programmable Logic Controller*). PLC digunakan untuk mengendalikan sistem pneumatik yang menjadi penggerak tiap segmen-gerak di kerangka-gerak dan mengendalikan saklar pengendali motor listrik untuk lintasan di luar ruang iradiasi. Selain itu PLC tersebut juga akan menerima masukan dari sistem keselamatan fasilitas iradiator disamping memberi informasi atas status pengendalian yang dijalankannya.

#### 4. KESIMPULAN

Pola gerakan *tote* dari lokasi pengisiannya menuju ke ruang iradiasi untuk mengitari sumber radiasi dan selanjutnya keluar ruang iradiasi kembali ke lokasi pengosongannya merupakan rentetan rangkaian pola gerakan *tote* yang saling berkaitan. Oleh karena itu optimasi pola gerak yang baik harus dapat ditentukan, yaitu pola gerak yang dapat menghasilkan nilai DUR  $\sim 1$ , waktu-iradiasi bersifat variabel yang dapat dikendalikan secara halus (*smooth*), dan *throughput* yang tinggi. Dalam makalah ini ditunjukkan keterkaitan kombinasi gerakan *tote* di dalam dan diluar ruang iradiasi untuk mendapatkan *throughput* yang maksimum, yang ditengarai dengan ditemukannya segmen-gerak penentu. Segmen gerak-penentu dipakai sebagai referensi untuk menentukan batasan minimum dan maksimum lokasi kosong *tote* di kerangka-gerak, karena *tote* di kerangka-gerak hanya bisa bergerak jika ada lokasi kosong pada baris atau segmen gerak bersangkutan. Jumlah lokasi kosong akan menentukan kombinasi gerakan *tote* di kerangka-gerak. Dua kombinasi gerakan untuk lokasi kosong *tote* minimum dan maksimum digambarkan dalam makalah ini menggunakan Gantt-Chart dan diagram-waktu sebagai contoh operasional dalam langkah-langkah pembuatan desain rinci. Dengan cara yang sama kombinasi gerakan yang lain dapat dibuat untuk lokasi kosong *tote* diantara nilai minimum dan maksimum nya dan semua kombinasi gerak dijadikan masukan pada program simulator untuk menentukan DUR dari tiap kombinasi gerak tersebut, sehingga optimasi pemilihan kombinasi gerak yang baik dapat dilakukan.

#### 5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Riganakos KA, *Food Irradiation Technique*, Elsevier Inc, London, 2010.
- [2] Izotop<sup>TM</sup>., *Main Features of the Facility.*, Institute Isotopes Co. Ltd., Budapest., April 2015.
- [3] PNRI., *Lincenses for Large Irradiator*, Official Gazette, Vol.104, No. 42., Philipine Nuclear Research Institute, Quenzon City, *October 20, 2008*.
- [4] Ridwan M, *Izin Konstruksi dan Operasi Iradiator No: 11/Ka-BAPETEN/VI-99*, BAPETEN, Jakarta, 15 Juni 1999.
- [5] TAMAS P DAN LAZLO F., *Servo Multi-purpose Tote-box type Gamma Irradiation Facility.*, *Workshop on The Design of Gamma Irradiation.*, Institute of Isotopes Co. Ltd., Tangerang, April 1-3., p. 8-21, 2014.
- [6] Suntoro A, *Analisis Waktu-Iradiansi Tersingkat pada Desain Fasilitas Iradiator Gamma Izotop<sup>TM</sup>*, Prosiding PPI Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir, PTAPB-BATAN, Jogja, 9-10 Juni, 2015.
- [7] Suntoro A, *Analisis Pola Gerak Obyek Yang Akan Diiradiansi Pada Desain Iradiator Gamma Izotop<sup>TM</sup> Untuk PRFN.*, Prosiding Sumber Daya Manusia Teknologi Nuklir, STTN-BATAN, Jogja, 15 September, 2015.
- [8] Loaharanu P., *Irradiated Foods.*, American Council on Science & Health, Fifth-edition, New York, 2003
- [9] IAEA, *Gamma Irradiators for Radiation Processing.*, <http://www-naweb.iaea.org/napc/iachem/Brochure%20on%20gamma%20irradiators.pdf>. Dibuka 25 Juli 2015.
- [10] Suntoro A., *Analisis Pola Gerak Carrier BG-09 pada Iradiator Gamma Tipe Kolam.*, Publikasi Ilmiah, PPI-KIM., Juni 2010.