

## ANALISIS POLA-GERAKAN DI KERANGKA-GERAK INSTALASI IRADIATOR GAMMA MERAH PUTIH

Achmad Suntoro, Sigit Bachtiar, Rissa Damayanti  
Pusat Rekayasa Fasilitas Nuklir - BATAN  
Gedung 71 Kawasan PUSPIPTEK, Tangerang Selatan 15310

### ABSTRAK

*ANALISIS POLA-GERAKAN DI KERANGKA-GERAK INSTALASI IRADIATOR GAMMA MERAH PUTIH. Pola-gerakan tote di kerangka-gerak instalasi iradiator gamma Merah Putih (IMP) dianalisis. Tote adalah kotak aluminium yang berisi obyek yang akan diiradiasi. Analisis pola-gerak difokuskan pada karakteristik waktu siklusnya yang terbentuk dari rangkaian langkah-gerak tote ketika mengitari sumber radiasi menggunakan kerangka-gerak. Kerangka-gerak dengan penggerak tote secara teoritis digunakan dalam analisis untuk menghasilkan pola-gerak potensi dengan karakteristik tertentu sebagai pembandingan dari desain yang digunakan oleh IMP. Instalasi IMP tidak menggunakan potensi waktu siklus dengan jumlah langkah-gerak minimum, sehingga potensi waktu iradiasi minimum dan kecepatan produksi maksimum dari kerangka-gerak tidak digunakan. Perancang IMP kemungkinan memiliki alasan tertentu untuk tidak menggunakan potensi tersebut.*

*Kata kunci : Pola-gerakan, waktu-siklus-minimum, waktu-iradiasi-minimum, kecepatan produksi.*

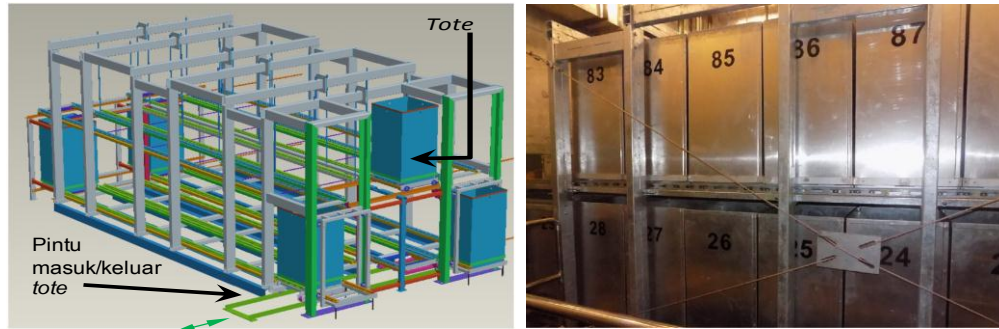
### ABSTRACT

*MOTION-PATTERN ANALYSIS IN THE MOTION-FRAMEWORK OF MERAH-PUTIH GAMMA IRRADIATOR INSTALLATION. Tote motion patterns on the motion-framework of the Merah-Putih gamma irradiator installation (IMP) has been analyzed. Tote is an aluminum box containing the object to be irradiated. The motion-pattern analysis focuses on the cycle time characteristics formed by a series of tote-motion steps as the totes encircle the radiation source using the motion-framework. Theoretical tote-drive on the motion-framework is used in the analysis to generate potential motion patterns with certain characteristics as a benchmark of the design used by the IMP. The IMP installation does not use the potential minimum cycle time of the motion-framework that has minimum number of motion-step, so both the potential for minimum irradiation time and maximum production rate of the motion-framework are not utilized. The IMP designer may have some reasons not to utilize them.*

*Key words: Motion-pattern, minimum-cycle-time, minimum-irradiation-time, production-rate.*

## 1. PENDAHULUAN

Instalasi Iradiator gamma Merah Putih (IMP) yang berlokasi di Kawasan Puspipstek Tangerang Selatan menggunakan kerangka-gerak sebagai sarana pergerakan *tote* dalam proses iradiasinya. *Tote* adalah kotak aluminium dengan ukuran  $48,6 \times 48,6 \times 91,5 \text{ cm}^3$  yang berisi obyek untuk diiradiasi dengan menggunakan instalasi IMP. Kerangka-gerak berada di ruang iradiasi, dimana proses iradiasi berlangsung dan sumber radiasi terletak ditengah-tengah kerangka-gerak sehingga ketika *tote* bergerak mengikuti jalur yang ada pada kerangka-gerak, maka *tote* tersebut akan mengitari sumber radiasi. Gambar 1.a adalah bagan kerangka-gerak tersebut dan Gambar 1.b adalah kondisi sebenarnya ketika *tote* berada di kerangka-gerak dan ketika proses iradiasi berlangsung. Tidak semua lokasi di kerangka gerak terisi oleh *tote* tetapi beberapa lokasi sengaja harus dikosongkan untuk proses pergeseran gerakan *tote* di kerangka mengikuti algoritma gerak (diagram-waktu) yang digunakan.



a. Bagan kerangka-gerak untuk proses iradiasi di ruang iradiasi[1]      b. Tote di kerangka-gerak posisi iradiasi

Gambar 1. Kerangka-gerak dan *tote* dalam proses iradiasi.

Algoritma gerak dalam hal ini adalah diagram-waktu pergerakan *tote* di kerangka-gerak yang akan ikut menentukan berapa lama sebuah *tote* dalam proses mengitari sumber radiasi. *Tote* akan keluar setelah lengkap menelusuri semua segmen-gerak di kerangka dengan menggunakan pintu yang sama ketika masuk. Gerakan *tote* di kerangka-gerak bersifat diskrit, yaitu siklus demi siklus, dan setiap siklus terdiri beberapa langkah-gerakan *tote*. Diagram-waktu yang digunakan oleh instalasi IMP memerlukan 72 siklus untuk sebuah *tote* mengitari sumber radiasi dan ini merupakan waktu iradiasi, serta tiap siklusnya memerlukan 9-langkah gerakan-*tote*[2]. Jumlah *tote* yang telah selesai diiradiasi persatuan waktu merupakan kecepatan produksi iradiasi dari instalasi iradiasi dan hal itu banyak ditentukan oleh waktu siklus.

Dalam makalah ini akan dianalisis pelaksanaan penggunaan kerangka-gerak dalam kaitannya dengan pergerakan *tote* ketika proses iradiasi berlangsung. Analisis ini merupakan langkah awal karena hanya melihat dari sudut pandang potensi kecepatan produksi dan waktu iradiasi tersingkat melalui parameter jumlah langkah gerak tiap siklusnya. Analisis ini harus diikuti analisis lain untuk melihat bahwa kualitas produksi dalam hal ini dosis yang diserap dan homogenitas iradiasi nya tetap sesuai dengan yang dipersyaratkan untuk dua potensi sudut pandang tersebut. Penggunaan diagram-waktu dikaitkan dengan implementasi konstruksi kerangka-gerak untuk menjadi fokus analisis, karena dari diagram-waktu dapat diketahui jumlah langkah gerak per-siklus yang dipilih dari potensi jumlah langkah gerak yang ada di kerangka-gerak.

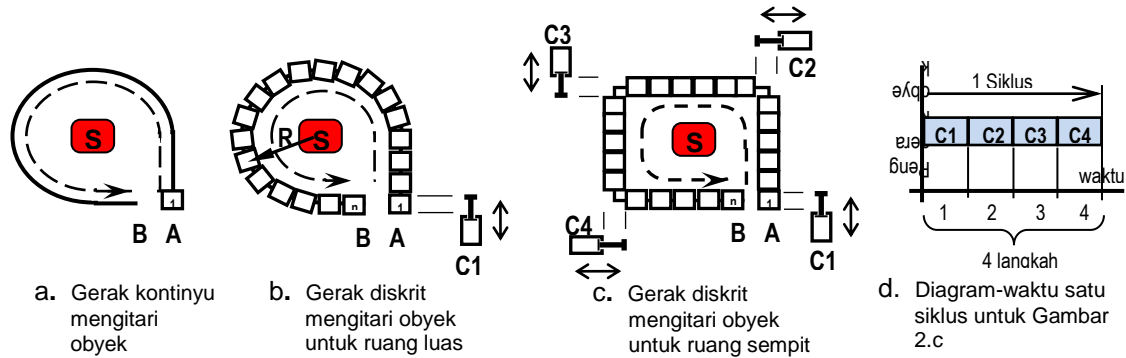
## 2. DASAR TEORI

### 2.1. Proses Gerak Mengitari Benda Lain

Salah satu bentuk proses gerakan sebuah benda untuk mengitari benda lain yang berada di tengah lintasan gerakanya dapat dijelaskan sebagai berikut seperti pada Gambar 2.a. Kotak-1 memerlukan gaya dorong atau tarik secara kontinyu dari lokasi awalnya (A) hingga lokasi akhirnya (B). Gaya dorong tersebut selama kotak dalam lintasan harus selalu ada. Gaya kontinyu tersebut dapat diperpendek waktu keberadaannya dengan mengisi sepanjang lintasan gerak tersebut dengan kotak lain dengan ukuran yang sama seperti ditunjukkan pada Gambar 2.b dan kotak-n adalah kotak yang berada di ujung lintasan / akhir lintasan. Dengan mendorong kotak-1 pada lokasi A sepanjang ukuran kotak oleh piston pneumatik C1, maka kotak-n akan keluar dari lintasan. Kekosongan kotak di lokasi A akibat dorongan tersebut harus diisi oleh kotak lain yang akan mengitari benda-S, dan pendorongan oleh C1 kembali dilakukan. Jika kondisi tersebut berlangsung selama n kali, maka kotak-1 telah mengelilingi benda-S secara penuh. Persyaratan bentuk lintasan dari Gambar 2.b yaitu harus mempunyai jari-jari R yang besar agar gaya dorong dapat ditransfer dengan efisiensi

yang tinggi karena adanya pembelokan arah gaya dorong. Model gerakan pada Gambar 2.b tidak bisa digunakan untuk area yang sempit karena ukuran R akan kecil.

Untuk proses mengitari di ruang yang sempit, dibuat bentuk lintasan seperti pada Gambar 2.c yang terdiri dari 4 segmen-lintasan dan menggunakan pendorong sistem pneumatik untuk tiap segmen-lintasan tersebut (C1 s/d C4). Jumlah kotak menyeluruh yang harus disediakan untuk transmisi gaya gerak pada lintasan tidak sebanyak yang diperlukan oleh Gambar 2.b. Hal ini disebabkan lokasi kosong di tiap ujung segmen-lintasan untuk proses perubahan arah diperlukan.



Gambar 2. Gerakan benda mengitari benda lain dengan gerakan kontinu dan diskrit.

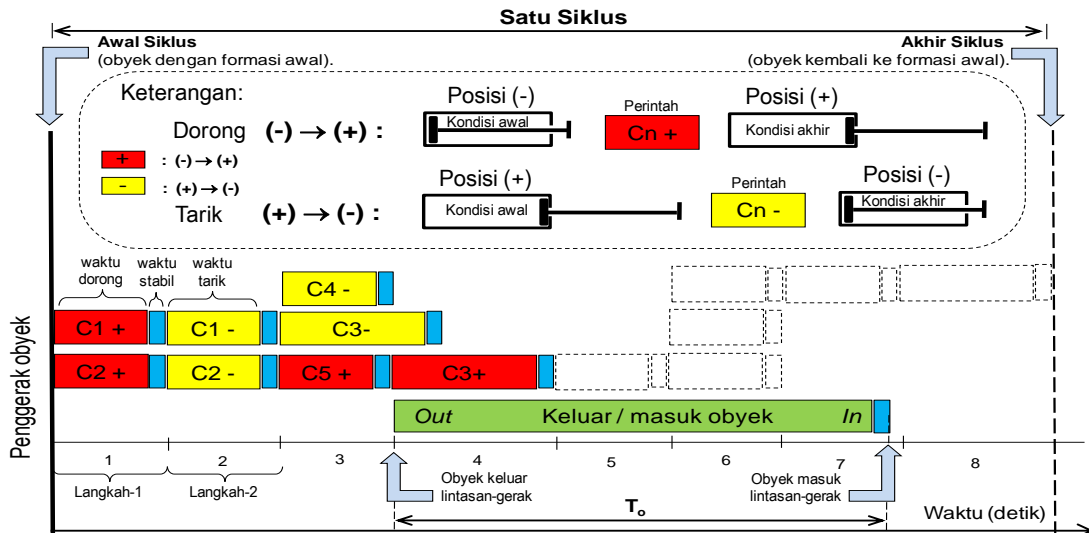
Jika diagram-waktu Gambar 2.d yang urutan aktif penggerak obyeknya dimulai dari C1 dan urut hingga C4 diberlakukan pada lintasan gerak Gambar 2.c, maka dorongan oleh C1 akan mengawali untuk menggerakkan kotak-1 dan semua kotak yang berada pada segmen-lintasan di depan kotak-1 untuk bergeser satu langkah. Selanjutnya hal serupa akan terjadi juga pada dorongan oleh C2 s/d C4. Pada akhir gerak oleh C4, kotak-n akan keluar dari lintasan atau bisa juga dimasukkan kembali pada lokasi kotak-1 karena kotak-1 telah bergeser ke depan satu langkah. Dalam contoh ini, total gerakan oleh C1 s/d C4 disebut satu siklus yang terdiri dari 4 langkah gerak. Gerak siklus dimulai dari sebuah formasi awal dari obyek di semua segmen-lintasan dan dilanjutkan dengan tindakan menggeser satu langkah untuk semua obyek yang ada pada tiap segmen-lintasan sehingga terbentuk kembali formasi awal tersebut. Penggeseran obyek pada segmen-lintasan dapat dilakukan secara serial, paralel dan atau gabungannya, serta memungkinkan sebuah obyek melewati lebih dari satu segmen-lintasan dalam gerak satu siklus tersebut.

## 2.2 Diagram-Waktu

Diagram-waktu merupakan jadwal tindakan yang dibuat untuk memudahkan dalam memahami proses tindakan yang saling terkait dan merupakan fungsi waktu. Jika urutan waktu pelaksanaan merupakan hal yang pokok dalam suatu kegiatan, maka diagram-waktu tepat untuk digunakan. Bentuk diagram-waktu bermacam-macam disesuaikan dengan kebutuhan dalam proses disain yang sedang berjalan[3]. Diagram-waktu pada Gambar 2.d merupakan bentuk sederhana, karena hanya untuk menjelaskan ide proses urutan gerak dengan mengabaikan hal detailnya.

Perangkat penggerak pneumatik dapat diperintah untuk mendorong (+) atau menarik (-) sesuai dengan posisi dan kondisinya di segmen-lintasan. Tiap pneumatik diberi kode Cn (tanda), dimana n adalah nomor pneumatik dan tanda (+/-) adalah jenis perintah untuk dorong atau tarik, seperti dijelaskan pada Gambar 3. Diagram-waktu juga berisi penjadwalan keluar masuk obyek dari rangkaian segmen-lintasan, yaitu saat keluar (*out*) dan masuk (*in*) sehingga berapa lama waktu antara *out* dan *in* atau sebaliknya tersebut terjadi dapat diketahui seperti pada Gambar 3 dengan simbol  $T_o$ . Jika  $T_o$  melewati batas waktu satu siklus, maka akhir dari  $T_o$  menjadi batas akhir dari siklus. Diagram waktu harus dibuat untuk satu siklus, sehingga perulangan dari siklus tersebut dapat digunakan untuk mengetahui karakteristik pola gerak obyek secara

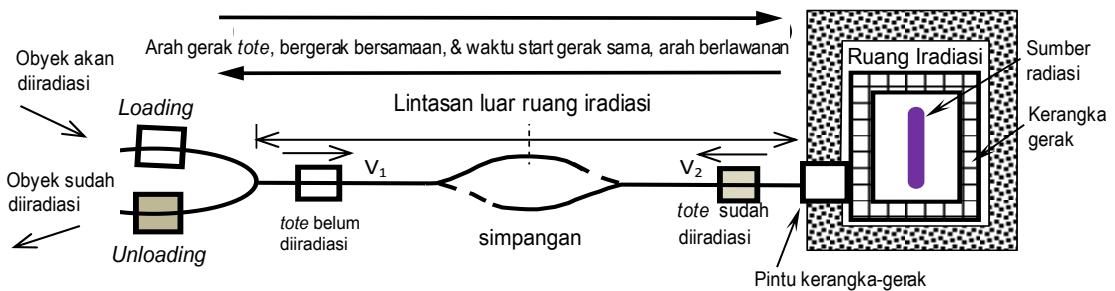
keseluruhan (gerak periodik). Dalam proses pergerakan obyek di segmen-lintasan, setiap waktu dorong dan waktu tarik, sistem pengendali harus memberi waktu stabil agar setiap obyek yang berpindah tempat dapat diproses untuk pindah tempat berikutnya secara berurutan dengan baik. Didefinisikan bahwa waktu dorong / tarik ditambah waktu stabilnya adalah waktu satu langkah, sehingga diagram-waktu pada Gambar 3 adalah diagram-waktu satu siklus yang terdiri dari 8-langkah.



Gambar 3. Diagram-waktu untuk pergerakan obyek di rangkaian segmen-lintasan

Jika gerakan siklus dilakukan sebanyak jumlah obyek yang digunakan dalam proses gerak di rangkaian segmen-lintasan, maka obyek yang pada awalnya di pintu masuk akan berposisi di pintu keluar, artinya obyek tersebut telah berputar satu kali putaran. Jumlah obyek yang digunakan dapat berbeda-beda tergantung dari desain pola geraknya[4].

### 3. TATA KERJA



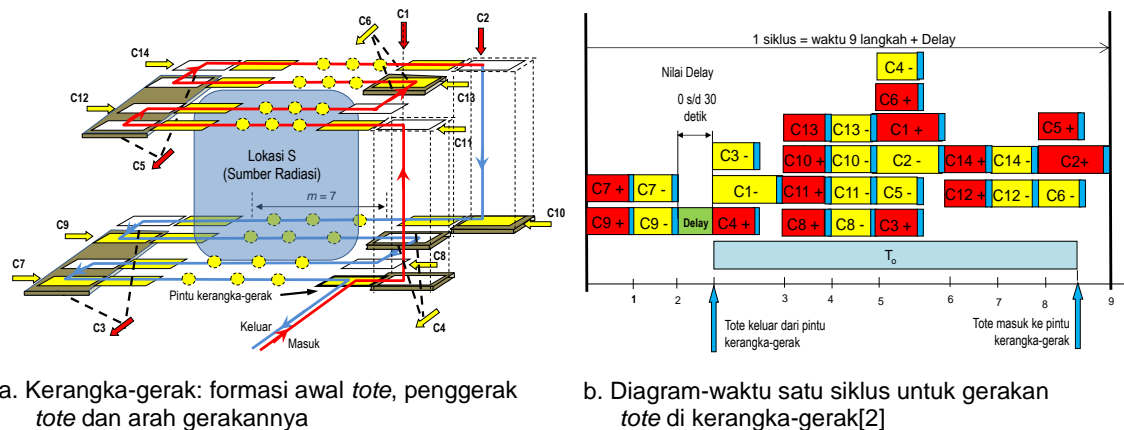
Gambar 4. Gerakan tote di luar ruang iradiasi[4]

Pada instalasi IMP, gerakan tote dalam proses iradiasi akan melalui lintasan di luar dan dalam ruang iradiasi. Lintasan di luar ruang iradiasi yaitu lokasi Loading/Unloading sampai pintu kerangka-gerak ditunjukkan pada Gambar 4. Waktu awal gerak tote dari dua lokasi ini bersamaan dan akan bertemu di lokasi persimpangan sehingga dua tote tersebut akan sampai lokasi tujuan bersamaan. Gerakan ini menggunakan rantai yang ditarik oleh sebuah motor listrik sehingga, kecepatan keduanya selalu sama ( $V_1 = V_2$ ). Gerakan tote di luar ruang iradiasi ini tidak diperhitungkan dalam proses iradiasi, karena paparan radiasinya dianggap kecil.



Gambar 5. Penggerak pneumatik instalasi IMP untuk penggerak *tote*: Dua-cara

Dalam proses iradiasi, sekumpulan *tote* akan masuk dan keluar kerangka-gerak secara periodik (untuk moda-kontinyu), yang masuk untuk diiradiasi dan yang keluar yang telah selesai diiradiasi. Gerakan keluar masuk tersebut di dalam kerangka-gerak dilakukan oleh perangkat sistem pneumatik dari balik dinding ruang iradiasi menggunakan perpanjangan piston yang menembus dinding ruang iradiasi, seperti ditunjukkan pada Gambar 5.a. Ada dua cara perpanjangan piston tersebut untuk menggerakkan *tote* di kerangka-gerak: mendorong atau menarik kerangka beroda yang berisi *tote* di atasnya (Gambar 5.b) dan mendorong langsung *tote* di segmen-lintasan (Gambar 5.c). Cara pertama adalah untuk segmen-lintasan yang tegak lurus dengan sumber radiasi yang merupakan posisi transit, dan cara kedua adalah pada segmen-lintasan yang sejajar dengan sumber radiasi yang merupakan posisi iradiasi.



Gambar 6. Kerangka-gerak dan pola gerakannya pada Instalasi IMP

Gerakan *tote* di ruang iradiasi instalasi IMP menggunakan kerangka-gerak yang digambarkan secara skematik lengkap dengan silinder pneumatik penggeraknya (C1 s/d C14) pada Gambar 6.a dengan sumber radioaktif di tengah kerangka. Kerangka-gerak hanya memiliki satu pintu untuk keluar dan masuk *tote* serta mempunyai 16 segmen-lintasan yang digerakkan oleh 14 sistem pneumatik. Kerangka-gerak terdiri dari 2 tingkat (atas dan bawah) sehingga ada dua pneumatik penggerak dengan arah vertikal untuk naik dan turun *tote*, yaitu pneumatik C1 dan C2. Kotak dengan warna pada kerangka menandakan lokasi tersebut berisi *tote*, sedangkan yang tidak



berwarna (putih) kondisi kosong. Formasi *tote* pada Gambar 6.a tersebut merupakan formasi awal proses gerak (awal siklus), yaitu menggunakan 72 *tote*, dengan 12 lokasi kosong karena kapasitas kerangka-gerak adalah 84 *tote*. Gambar 6.b adalah diagram-waktu dari pola gerakan *tote* di kerangka-gerak tersebut[2].

Waktu  $T_o$  pada Gambar 6.b dapat diatur dengan mengatur kecepatan motor penggerak keluar/masuk *tote* dari/ke kerangka-gerak. Dalam uji coba instalasi IMP yang dilakukan, nilai  $T_o$  yang diatur oleh sistem pengendali akan berakhir mendekati bersamaan dengan akhir siklus kerangka-gerak yaitu  $T_o \sim 53$  detik (pengukuran di lokasi) yang artinya lintasan waktu  $T_o$  berada di dalam siklus, sehingga waktu siklus dalam hal ini sangat tergantung pada jumlah langkah tiap siklus. Oleh karena itu jumlah langkah per-siklus akan sangat berpengaruh pada nilai waktu iradiasi-minimum dan juga kecepatan produksi dari instalasi. Jika nilai waktu  $T_o$  panjang hingga melebihi nilai akhir siklus dari proses gerak di kerangka-gerak, maka waktu siklus tidak akan dipengaruhi oleh jumlah langkah dalam siklus, tetapi banyak dipengaruhi oleh nilai dari  $T_o$  itu sendiri[4].

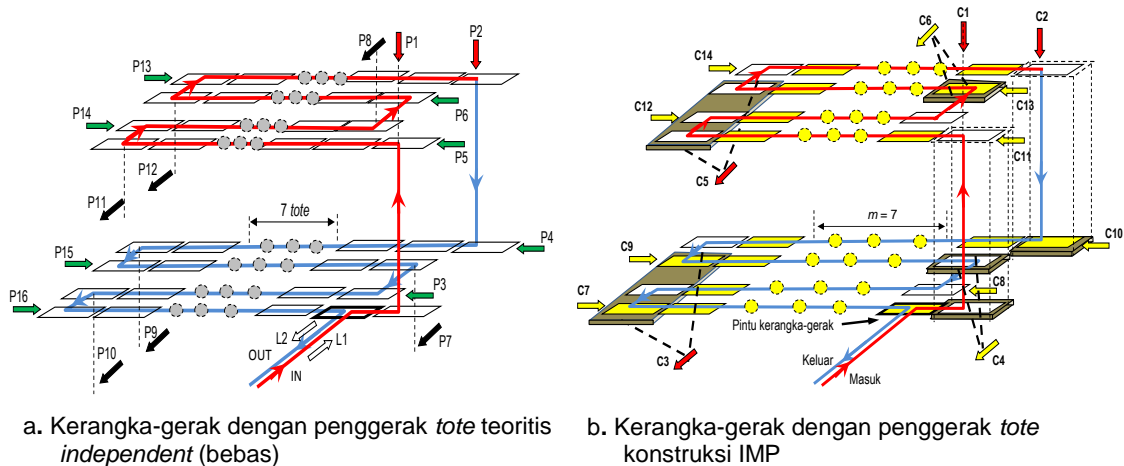
Ada dua moda pergerakan dalam proses iradiasi yang dikembangkan menggunakan kerangka-gerak pada Gambar 6: *Moda-Batch* dan *Moda-Kontinyu*. *Moda-Batch* adalah proses gerak yang tidak ada penambahan atau pengurangan obyek selama proses gerak berlangsung. Kerangka-gerak diisi dengan formasi awal oleh *tote* yang akan diiradiasi. Proses iradiasi berlangsung dengan menaikkan sumber radiasi dan *tote* digerakkan sesuai dengan diagram keadaan. Jika formasi awal beserta *tote* nya di lokasi telah terbentuk kembali, maka proses iradiasi selesai dan sumber diturunkan serta *tote* dikeluarkan dari kerangka-gerak. Pada *Moda-Kontinyu* diawali dengan *tote* berisi dummy yaitu benda lain yang memiliki densitas sama dengan obyek yang akan diiradiasi dimasukkan ke kerangka dalam formasi awal. Sumber radiasi dinaikkan dan proses iradiasi berlangsung. Selama proses iradiasi, terjadi pergantian *tote*, karena ada *tote* yang keluar dan ada *tote* yang masuk kerangka-gerak. Jadwal keluar masuk tersebut diakomodasi dengan menggunakan waktu  $T_o$  pada Gambar 3. Proses iradiasi berjalan terus hingga *tote* berisi obyek yang akan diiradiasi habis dan digantikan oleh dummy kembali. Di awal operasi, yang keluar dari kerangka-gerak adalah *tote* berisi dummy sebanyak jumlah *tote* yang digunakan dalam operasi (72 *tote*).

#### **4. HASIL DAN PEMBAHASAN**

Pembahasan akan berkisar pada nilai waktu siklus, karena waktu siklus sangat berpengaruh kepada waktu iradiasi minimum dan kecepatan produksi instalasi. Waktu siklus dapat diperpanjang dengan menyisipkan *delay* (lihat Gambar 6.b), tetapi waktu siklus tersingkat merupakan karakteristik instalasi yang tidak bisa diturunkan melalui pengendalian. Jumlah langkah per-siklus menjadi penentu waktu siklus, karena nilai akhir  $T_o$  pada IMP lebih kecil dari akhir siklus gerak seperti terlihat pada Gambar 6.b.

##### **4.1 Kerangka-Gerak**

Kerangka-gerak yang digunakan pada instalasi IMP merupakan pengembangan dari bentuk lintasan pada Gambar 2.c seperti ditunjukkan pada Gambar 7.a secara teoritis dan Gambar 7.b konstruksi IMP. Untuk kondisi teoritis, di setiap segmen-lintasan (berjumlah 16) harus ada penggerak *tote* yang bebas, artinya setelah penggerak mendorong, misalnya sehingga lokasi *tote* yang di dorong menjadi kosong, langkah berikutnya bisa langsung mengisi lokasi kosong tersebut. Kemungkinan bisa atau tidaknya gerakan *tote* dilaksanakan hanya ditentukan oleh kondisi segmen-lintasan dan *tote* lain di sekitar *tote* yang akan digerakkan tersebut berada, dan dari kondisi tersebut desain diagram-waktu teoritis dibuat.



Gambar 7. Kerangka-gerak dan arah geraknya untuk proses iradiasi

Segmen-lintasan pada Gambar 7.a yang digerakkan oleh P9 & P10 juga P11 & P12 bersifat bebas yang dapat bergerak sendiri-sendiri, tetapi pada Gambar 8.b tidak bebas. Segmen-lintasan P9 dan P10 pada konstruksi IMP harus digunakan oleh *tote* yang bergerak bersama dan digerakkan oleh penggerak C3, demikian juga P11 & P12 oleh penggerak C5. Hal ini terjadi karena pada segmen-lintasan tersebut untuk konstruksi IMP yang digerakkan bukan *tote* nya, tetapi rak-beroda di bawah *tote* tersebut dan dibuat satu-rak untuk dua segmen-lintasan tersebut, sehingga jumlah penggerak keseluruhan hanya diperlukan 14 buah. Sebuah penghematan komponen dalam konstruksi, namun hal tersebut membawa konsekuensi juga bahwa misalnya setelah perintah C5-, perintah C13+ tidak bisa langsung dijalankan, tetapi harus menunggu setelah perintah C14+ dan C5+ dijalankan terlebih dahulu. Di lokasi lain yang menggunakan rak-beroda sebagai penggerak *tote* akan mengalami hal serupa, yaitu lokasi yang berhubungan dengan penggerak C1, C2, C4, dan C6. Batasan-batasan tersebut mengakibatkan konstruksi IMP tidak bisa menjalankan semua potensi pola-gerak yang dimiliki kerangka-gerak.

#### 4.2 Potensi Pola-Gerak di Kerangka-Gerak

Ada banyak kemungkinan pola-gerak yang dapat dilakukan untuk *tote* mengitari sumber radiasi dengan kondisi penggerak yang bersifat teoritis (Gambar 7.a). Tabel 1 adalah empat sampel pola-gerak tersebut dengan karakteristiknya. Pola-gerak tersebut tidak bisa dijalankan pada kerangka-gerak IMP Gambar 7.b karena batasan desain konstruksi kerangka-gerak dari IMP. Pola-gerak teoritis ini dapat dimanfaatkan (menggunakan simulator) dalam proses optimasi mencari pola-gerak yang diinginkan sesuai dengan karakteristik iradiasi maupun kecepatan produksi yang diinginkan atau sebagai sarana evaluasi / pembandingan atas pola-gerak yang telah dipilih.

Pola-gerak nomor-3 pada Tabel 1 merupakan pola-gerak dengan waktu siklus minimum, yaitu 3-langkah, sedangkan waktu siklus yang digunakan oleh kerangka-gerak IMP terdiri dari 9-langkah. Potensi untuk mendapatkan waktu siklus minimum dari kerangka-gerak teoritis tidak bisa dilaksanakan pada konstruksi kerangka-gerak IMP. Desain IMP tersebut dibuat demikian kemungkinan karena interval  $T_0$  dari instalasi (~53 detik) telah mendekati akhir perioda siklus dengan siklus 9-langkah tersebut, sehingga jika jumlah langkah diturunkan maka penurunan waktu siklus tidak akan banyak menambah nilai kecepatan produksi tanpa menurunkan nilai  $T_0$ . Penurunan  $T_0$  akan membawa konsekuensi keandalan dan kestabilan gerak *tote* di luar ruang iradiasi, sehingga memerlukan desain mekanik tersendiri, karena menaikkan kecepatan gerak *tote*. Sesungguhnya penurunan nilai waktu siklus dapat menurunkan waktu iradiasi tanpa menurunkan nilai  $T_0$  dengan menggunakan moda-*Batch*, tetapi nilai kecepatan produksinya tidak ikut turun.

Tabel 1. Karakteristik Beberapa Pola-Gerak di Kerangka-Gerak.

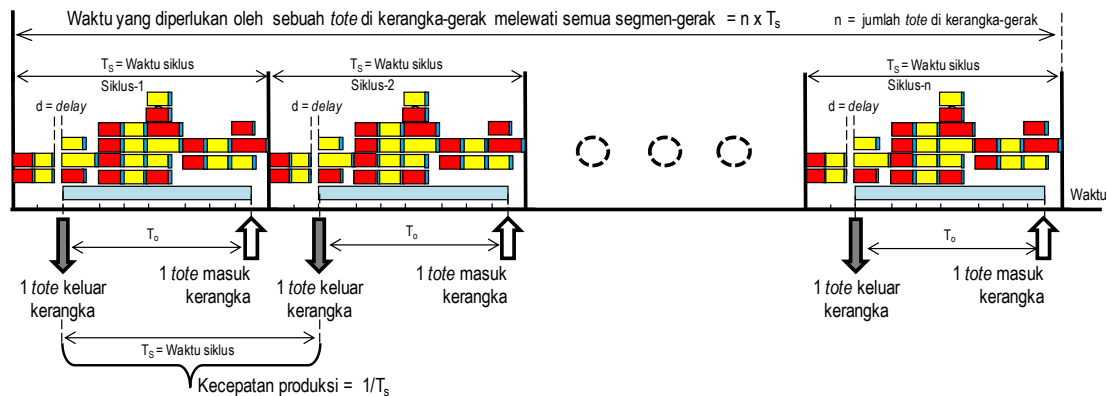
	Posisi Awal Tote <sup>*)</sup>	Diagram-Waktu <sup>)</sup> dan Karakteristik gerak nya
1		<p>Kapasitas tote: 84                      Jumlah tote digunakan: 83 <math>T_R = 83 \times T_S</math>                      Jumlah langkah dalam 1 siklus: 16                      Kecepatan produksi = <math>1/T_S</math> (untuk moda-kontinyu).</p> <p><math>T_S =</math> Waktu siklus</p> <p>Waktu</p>
2		<p>Kapasitas tote: 84                      Jumlah tote digunakan: 69 <math>T_R = 69 \times T_S</math>                      Jumlah langkah dalam 1 siklus: 16                      Kecepatan produksi = <math>1/T_S</math> (untuk moda-kontinyu).</p> <p><math>T_S =</math> Waktu siklus</p> <p>Waktu</p>
3		<p><math>T_S =</math> Waktu siklus</p> <p>Waktu</p> <p>Kapasitas tote: 84                      Jumlah tote digunakan: 76                      Jumlah langkah dalam 1 siklus: 3  <math>T_R = 76 \times T_S</math>                      Kecepatan produksi = <math>1/T_S</math> (untuk moda-kontinyu).</p>
4		<p><math>T_S =</math> Waktu siklus</p> <p>Waktu</p> <p>Kapasitas tote: 84                      Jumlah tote digunakan: 72                      Jumlah langkah dalam 1 siklus: 6  <math>T_R = 76 \times T_S</math>                      Kecepatan produksi = <math>1/T_S</math> (untuk moda-kontinyu).</p>

\*) Notasi diagram-waktu menggunakan kerangka-gerak pada Gambar 7.a.  
 Perintah dorong/tarik tote ; Perintah dorong/tarik tanpa tote.  
 \*\*) Lokasi terisi tote ; Lokasi kosong tidak terisi tote.

Pemilihan pola-gerak harus disesuaikan dengan keperluan yang merupakan hasil optimasi / pertimbangan dari persyaratan keperluan tersebut. Untuk mendapatkan potensi kecepatan produksi yang tinggi, misalnya, waktu-siklus yang singkat atau jumlah langkah dalam siklus yang terkecil menjadi pilihan. Demikian juga, hal yang sama diperlukan untuk mendapatkan agar instalasi iradiator berpotensi mampu untuk proses iradiasi dengan dosis rendah. Sebaliknya, jika instalasi iradiator memang didesain tidak untuk dosis rendah, misalnya, dan kondisi instalasi memiliki nilai  $T_0$  yang panjang, maka penurunan jumlah langkah per-siklus tidak diprioritaskan jika proses konstruksi untuk penurunan langkah per-siklus tersebut menambah biaya konstruksi.



### 4.3 Waktu Iradiasi dan Kecepatan Produksi



Gambar 8. Gerakan benda mengitari benda lain Moda-Kontinyu

Gambar 8 adalah perulangan dari  $n$  siklus yaitu sebanyak jumlah *tote* yang digunakan di kerangka-gerak, dan waktu iradiasi adalah waktu selama *tote* berada di kerangka-gerak, sehingga dapat dituliskan sebagai berikut:

moda-kontinyu:

$$T_R = (T_S + d) n - T_o \quad (1)$$

$$\text{Kecepatan produksi} = 1/T_S \quad (2)$$

moda-Batch:

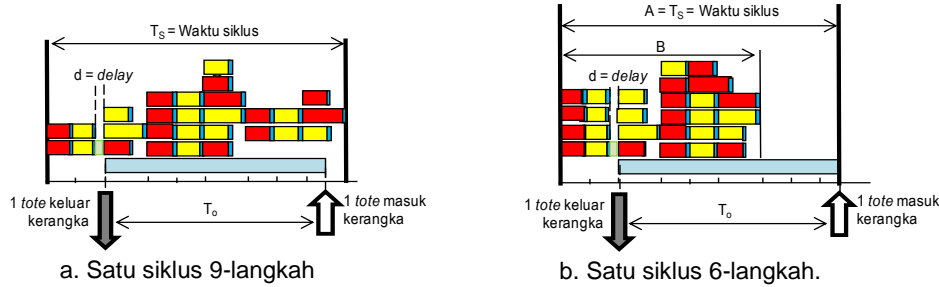
$$T_R = (T_S + d) n \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{Kecepatan produksi} &= \frac{n}{(T_S n)_{\text{Pengisian}} + (T_S n)_{\text{Iradiasi}} + (T_S n)_{\text{Pengosongan}}} \\ &= 1/(3 T_S) \end{aligned} \quad (4)$$

- dimana  $T_R$  : Waktu iradiasi  
 $T_S$  : Waktu satu siklus  
 $T_o$  : Waktu antara *tote* keluar dan masuk  
 $d$  : Waktu *delay*  
 $n$  : Jumlah *tote* yang digunakan di kerangka-gerak.

Sebenarnya diawal proses iradiasi pada moda-kontinyu,  $n$  buah *tote* yang keluar dari kerangka berisi *dummy* dan ini tidak masuk pada hasil produksi iradiasi. Namun demikian, kondisi kecepatan produksi pada persamaan (2) tidak diperhitungkan, mengingat hal tersebut hanya terjadi sekali di awal proses saja dan bisa dianggap sebagai langkah persiapan proses iradiasi.

Dari Persamaan (2) dan (4) terlihat bahwa untuk moda-kontinyu, kecepatan produksinya 3 kali lebih tinggi dari pada untuk moda-batch, dan perubahan waktu siklus akan menentukan kecepatan produksi secara linier untuk kedua moda tersebut. Waktu iradiasi juga ditentukan oleh waktu siklus dan juga linier untuk moda-Batch, sehingga waktu iradiasi minimum untuk moda-Batch bisa ditentukan dari jumlah langkah dalam siklusnya. Untuk moda-kontinyu waktu siklus tidak hanya ditentukan oleh jumlah langkah dalam siklus saja, tetapi juga oleh perbedaan waktu antara *tote* yang keluar dan masuk ( $T_o$ ).



Gambar 9. Gerakan benda mengitari benda lain pada Moda-Kontinyu

Sebagai contoh pada Gambar 9, penurunan jumlah langkah per siklus (dari Gambar 9.a menjadi 9.b) tidak berarti waktu siklusnya menjadi B, tetapi menjadi A jika tidak diikuti penurunan nilai  $T_o$ . Disini kelemahan penggunaan kerangka-gerak satu pintu, yaitu tidak mudah mengendalikan nilai  $T_o$ . Nilai  $T_o$  bisa diturunkan dengan merubah kecepatan *tote* ( $V_1$  pada Gambar 4), memperpendek lintasan di luar ruang iradiasi, atau menggunakan kerangka-gerak dengan dua pintu.

## 5. KESIMPULAN

Kerangka-gerak yang digunakan pada instalasi IMP secara teoritis mempunyai potensi untuk digunakan dalam proses iradiasi dengan waktu iradiasi yang pendek, karena kerangka tersebut bisa digunakan untuk menghasilkan pola gerak dengan tiga langkah-gerak tiap siklusnya. Sebagai perbandingan pada instalasi IMP tiap siklusnya memerlukan sembilan langkah-gerak. Namun demikian, untuk merealisasi potensi tersebut, desain penggerak *tote* pada kerangka-gerak harus dibuat ideal, yaitu 16 penggerak sesuai dengan jumlah segmen-gerak di kerangka, serta penggerak harus *independent*, yaitu setiap *tote* harus bisa digerakkan pindah ke segmen-lintasan urutannya dengan syarat hanya dibatasi oleh posisi *tote* tersebut dan *tote* di sekitar segmen-gerak dan tidak dibatasi oleh kondisi segmen-gerak beserta penggerak *tote*-nya. Instalasi IMP menggunakan penggerak yang lebih kecil dari jumlah segmen-gerak di kerangka-gerak dan beberapa segmen-geraknya menggunakan kereta-beroda (bukan *tote* yang didorong) sehingga *independency*-nya turun. Namun demikian suatu desain dibuat sesuai dengan yang diperlukan dan merupakan hasil optimasi dari berbagai pertimbangan yang telah disetujui.

## 6. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada Tim Pengelola Kegiatan Pembangunan Prototipe Irradiator Gamma sehingga tulisan ini dapat terlaksana.

## 7. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Tamas P dan Lazlo F. , 2014, *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, hal. 8-21.
- [2] Anonymous, 2017, *Preliminary Operation And Maintenance Manual For Tbi-8250-140 Type Tote Box Gamma Irradiator 2017 installed at Jakarta*, Vol 2, Izotop – Institute of Isotopes Co., Ltd, Ref.N. ST1546-206K.
- [3] Micklethwait G R. , Juli 2012, *Models of Time Travels: A Comparative Study Using Films*, Phd thesis, The Australian National University, Canberra.
- [4] Suntoro A., November 2015, Kombinasi Gerakan Obyek Di Ruang Iradiasi Pada Desain Fasilitas Irradiator Gamma Izotop™ Untuk PRFN, Jurnal Perangkat Nuklir, Vol. 09, No.02.