

EVALUASI PERSAMAAN MATEMATIK TITIK POTONG DUA GARIS UNTUK REKONSTRUKSI KOORDINAT DUA CITRA PROYEKSI SINAR-X

Achmad Suntoro, Wahyuni Imran, Fitri Suryaningsih
Pusat Rekayasa Fasilitas Nuklir (PRFN) – BATAN
E-mail : suntoro@batan.go.id

ABSTRAK

EVALUASI PERSAMAAN MATEMATIK TITIK POTONG DUA GARIS UNTUK REKONSTRUKSI KOORDINAT DUA CITRA PROYEKSI SINAR-X. Evaluasi persamaan matematik perpotongan dua garis untuk rekonstruksi koordinat dua citra proyeksi sinar-X telah dilakukan. Tujuan evaluasi adalah untuk menentukan angka kesalahan dalam proses rekonstruksi dan karakteristik praktis-nya ketika persamaan rekonstruksi tersebut digunakan oleh perangkat rekonstruksi koordinat sistem brakiterapi. Faktor kesalahan manusia diantisipasi akan masuk melalui variabel data yang digunakan dalam persamaan tersebut, karena data tersebut berasal dari dua citra proyeksi sinar-X semi-orthogonal yang ditentukan secara manual menggunakan perangkat lunak penampil citra. Evaluasi dilakukan dengan cara membandingkan hasil titik rekonstruksi dengan titik yang telah diketahui koordinatnya, serta menghitung deviasi hasil rekonstruksi terhadap beberapa titik lain yang diambil dengan orientasi proyeksi yang berbeda. Hasil pengujian menunjukkan bahwa proses rekonstruksi koordinat menggunakan teknik titik potong dua garis lurus ini mempunyai kesalahan 0,1 cm menggunakan resolusi citra proyeksi 80 pixel per cm. Proses rekonstruksi berpotensi gagal jika resolusi citra yang digunakan dibawah angka tersebut.

Kata kunci: rekonstruksi, koordinat, proyeksi, sinar-X, semi-orthogonal, TPS-Brakiterapi.

ABSTRACT

AN EVALUATION OF TWO LINE CROSSING MATHEMATICAL EQUATIONS FOR COORDINATE RECONSTRUCTION OF TWO X-RAY PROJECTION IMAGES. An evaluation of two lines crossing mathematical equations for coordinate reconstruction of two X-ray projection images has been done. The purpose of the evaluation is to define its error value and its practical characteristics when the equations are used during reconstruction process to determine the coordinate on a brachytherapy system. Human error will be involved through the data variable used by the equations as these data are obtained from two images of semi orthogonal X-ray projections determined manually using an image viewer software. The evaluation is implemented by comparing the point as the result of the reconstruction with those that have been known their coordinate values and computing their reconstruction deviation toward some fix points that were taken their images from different projection orientation. The test results showed that the reconstruction coordinate process using a point of two straight lines intersection method has an error of 0.1 cm using a projection image resolution of 80 pixels per cm. The reconstruction process is potentially fail if the resolution image used below the number.

Keyword: reconstruction, coordinat, projection, X-ray, semi-orthogonal, TPS-Brachytherapy.

1. PENDAHULUAN

*Teratment Planning System (TPS), yang dilakukan sebelum proses pelaksanaan terapi kanker servik dengan teknik brakiterapi, diawali dengan proses rekonstruksi koordinat aplikator yang telah berada pada posisi terapi di tubuh pasien. Proses rekonstruksi aplikator tersebut pada sistem brakiterapi dewasa ini dilakukan menggunakan perangkat O-frame atau C-arm yang terintegrasi dengan sistem perangkat terapi brakiterapi lainnya, sehingga proses terapi dapat berlangsung dengan cepat dan hasil proses rekonstruksi koordinat akan lebih akurat. Angka kesalahan hasil rekonstruksi koordinat menggunakan O-frame atau C-arm akan relatif lebih kecil karena perhitungan sistem proyeksi orthogonal isocentris dapat digunakan sehingga akan mengurangi jumlah operasi matematik yang dijalankan yang berakibat menekan perambatan kesalahan (*error-propagation*) dari operasi matematik tersebut.*

Tidak semua rumah sakit memiliki fasilitas O-frame atau C-arm terutama di daerah pedalaman, oleh karena itu pola rekonstruksi koordinat secara umum menggunakan proyeksi semi-orthogonal masih diperlukan. Sistem perangkat sinar-X secara manual untuk proses rekonstruksi dapat didesain menggantikan O-frame atau C-arm sehingga penentuan koordinat aplikator dalam proses TPS-brakithterapi dapat diatasi^[1]. Dalam makalah ini, akan dievaluasi persamaan matematik untuk proses rekonstruksi koordinat menggunakan proyeksi semi-orthogonal dari sinar-X melalui teknik perpotongan dua garis dalam tiga-dimensi. Nilai kesalahan hasil rekonstruksi akan ditentukan dengan cara perbandingan, dan karakteristik praktisnya ditentukan dari pengalaman selama proses rekonstruksi dijalankan.

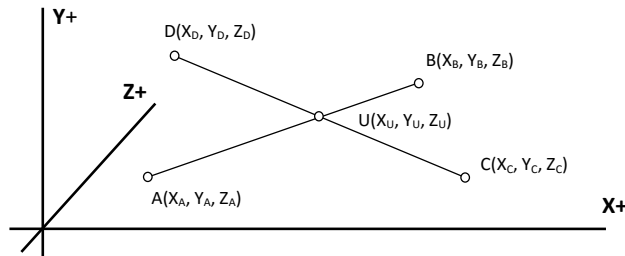
2. METODOLOGI

2.1 Dasar Teori

Persamaan garis lurus dan titik potong dua garis lurus dalam tiga-dimensi dapat digunakan dalam proses rekonstruksi koordinat melalui citra proyeksi sinar-X. Gambar 1 menunjukkan fenomena dua garis lurus pada koordinat tiga-dimensi. Persamaan garis lurus yang berasal dari dua titik dapat dituliskan menggunakan persamaan parameter, berturut-turut parameter t dan s untuk garis AB dan CD, seperti ditunjukkan pada persamaan (1) dan (2) dalam bentuk matrik^[2] pada Gambar 1.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{pmatrix} + t \begin{pmatrix} X_B - X_A \\ Y_B - Y_A \\ Z_B - Z_A \end{pmatrix} \quad [1], \quad \text{dan} \quad \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{pmatrix} + s \begin{pmatrix} X_D - X_C \\ Y_D - Y_C \\ Z_D - Z_C \end{pmatrix} \quad [2]$$

Persamaan garis AB
Persamaan garis CD



Gambar1. Dua garis lurus AB dan CD dalam tiga dimensi.

Korelasi dua garis lurus AB dan CD tersebut dapat ditentukan menggunakan tiga persamaan linier dengan dua bilangan anu (t dan s) sebagai berikut^[3].

$$\begin{aligned} X_A + t(X_B - X_A) &= X_C + s(X_D - X_C) && \dots\dots\dots(3) \\ Y_A + t(Y_B - Y_A) &= Y_C + s(Y_D - Y_C) && \dots\dots\dots(4) \\ Z_A + t(Z_B - Z_A) &= Z_C + s(Z_D - Z_C) && \dots\dots\dots(5) \end{aligned}$$

Jika ada nilai variabel t dan s yang memenuhi tiga persamaan tersebut, maka dua garis AB dan CD berpotongan, dan jika tidak ada nilai variabel t dan s yang memenuhi tiga persamaan tersebut berarti dua garis AB dan CD tidak berpotongan. Nilai t atau s yang memenuhi tiga persamaan (3)(4)(5) dimasukkan ke salah satu dari persamaan garis (1) atau (2) akan diperoleh koordinat titik potong dari dua garis AB dan CD .

Untuk menentukan nilai dari parameter t dan s dapat dilakukan dengan penggabungan dua persamaan dari tiga persamaan tersebut, misalnya persamaan (3) dengan (4), persamaan (3) dengan (5), atau persamaan (4) dengan (5). Jika terjadi kegagalan dari salah satu pasangan persamaan dalam menentukan parameter t dan s tersebut, maka dapat dicoba pada pasangan lainnya. Jika dari ketiga pasangan tidak ada

nilai t dan s yang memenuhi, berarti dua garis lurus AB dan CD tersebut tidak berpotongan. Untuk keperluan perhitungan menggunakan komputer (*programming*), perhitungan nilai s dan t dapat dihasilkan dari kemungkinan tiga pasangan persamaan matematik sebagai berikut.

Pasangan persamaan (3) dengan (4):

$$s = \frac{(X_A(Y_B - Y_A) - Y_A(X_B - X_A) - X_C(Y_B - Y_A) + Y_C(X_B - X_A))}{(X_D - X_C)(Y_B - Y_A) - (Y_D - Y_C)(X_B - X_A)} \dots\dots\dots(6)$$

$$t = \frac{(X_C(Y_D - Y_C) - Y_C(X_D - X_C) - X_A(Y_D - Y_C) + Y_A(X_D - X_C))}{(X_B - X_A)(Y_D - Y_C) - (Y_B - Y_A)(X_D - X_C)} \dots\dots\dots(7)$$

Pasangan persamaan (3) dengan (5):

$$s = \frac{(X_A(Z_B - Z_A) - Z_A(X_B - X_A) - X_C(Z_B - Z_A) + Z_C(X_B - X_A))}{(X_D - X_C)(Z_B - Z_A) - (Z_D - Z_C)(X_B - X_A)} \dots\dots\dots(8)$$

$$t = \frac{(X_C(Z_D - Z_C) - Z_C(X_D - X_C) - X_A(Z_D - Z_C) + Z_A(X_D - X_C))}{(X_B - X_A)(Z_D - Z_C) - (Z_B - Z_A)(X_D - X_C)} \dots\dots\dots(9)$$

Pasangan persamaan (4) dengan (5):

$$s = \frac{(Y_A(Z_B - Z_A) - Z_A(Y_B - Y_A) - Y_C(Z_B - Z_A) + Z_C(Y_B - Y_A))}{(Y_D - Y_C)(Z_B - Z_A) - (Z_D - Z_C)(Y_B - Y_A)} \dots\dots\dots(10)$$

$$t = \frac{(Y_C(Z_D - Z_C) - Z_C(Y_D - Y_C) - Y_A(Z_D - Z_C) + Z_A(Y_D - Y_C))}{(Y_B - Y_A)(Z_D - Z_C) - (Z_B - Z_A)(Y_D - Y_C)} \dots\dots\dots(11)$$

Untuk nilai s dan t yang memenuhi persamaan (3),(4), dan (5), dapat diuji dengan nilai variabel FLAG yang nilainya harus sama dengan nol secara ideal atau mendekati nol dalam praktisnya. Nilai FLAG tersebut merupakan selisih ruas kiri dan kanan dari persamaan (3),(4), atau (5) sebagai indikator keberhasilan proses.

$$FLAG = X_A + t(X_B - X_A) - (X_C + s(X_D - X_C)) \dots\dots\dots(12)$$

Nilai koordinat titik potong dua garis tersebut adalah:

$$\begin{array}{l} X_U = X_A + t(X_B - X_A) \\ Y_U = Y_A + t(Y_B - Y_A) \\ Z_U = Z_A + t(Z_B - Z_A) \end{array} \quad \text{atau} \quad \begin{array}{l} X_U = X_C + s(X_D - X_C) \\ Y_U = Y_C + s(Y_D - Y_C) \\ Z_U = Z_C + s(Z_D - Z_C) \end{array}$$

2.2 Tata Kerja

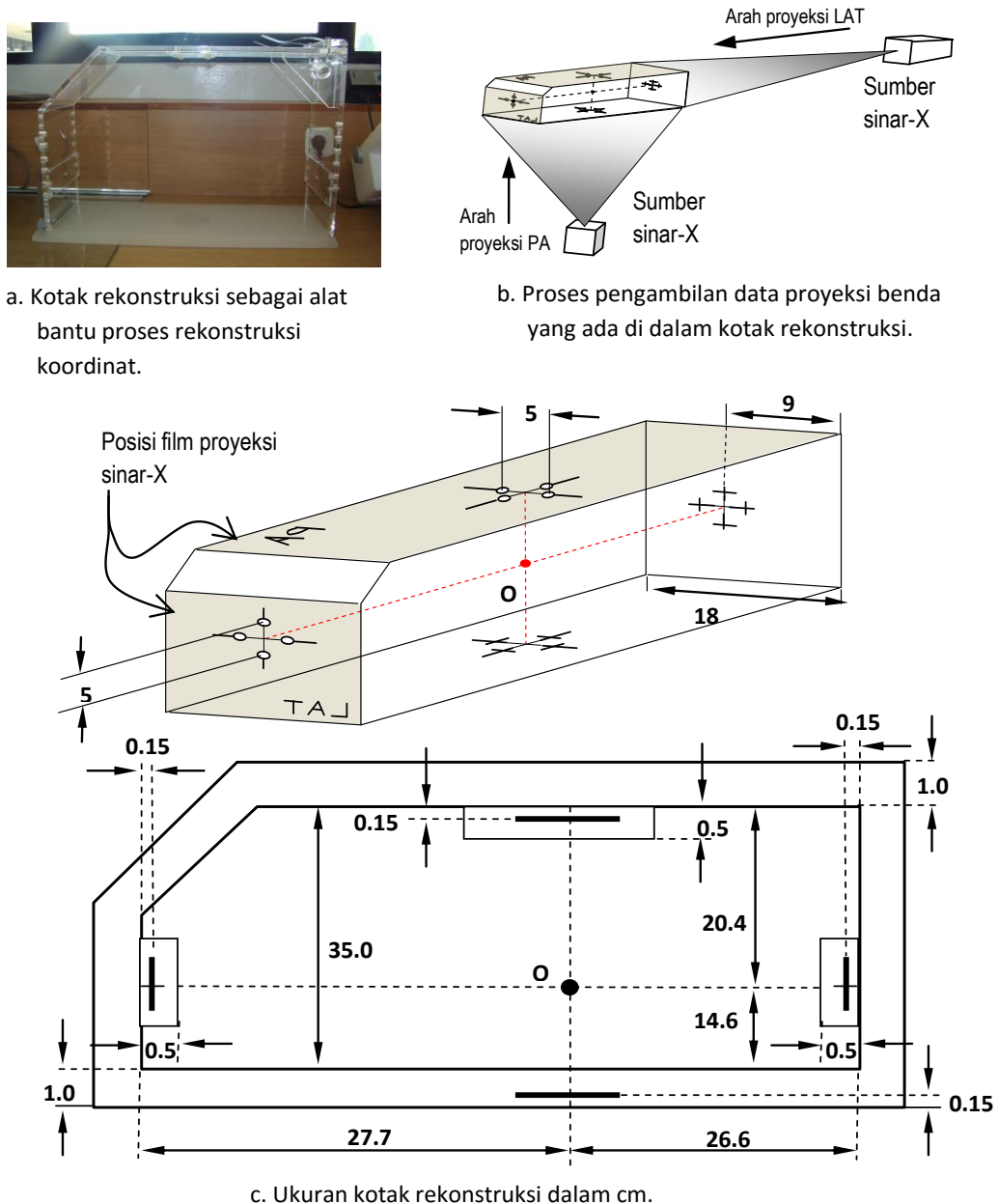
Benda yang akan ditentukan (direkonstruksi) koordinatnya diletakkan di dalam kotak rekonstruksi sedemikian rupa sehingga proyeksi semi-orthogonal dari benda tersebut pada dua film sinar-X dapat terlihat. Dari data proyeksi pada dua citra film sinar-X tersebut koordinat benda (titik) dapat ditentukan^[4]. Langkah-langkah penentuan koordinat tersebut adalah sebagai berikut:

- Menyiapkan perangkat dan pola pemotretan proyeksi menggunakan sinar-X serta mengukur dimensi kotak rekonstruksi yaitu bagian-bagian kotak rekonstruksi yang berpengaruh pada proses rekonstruksi.
- Mengambil data dari citra proyeksi sinar-X menggunakan perangkat lunak PAINT-Microsoft™ dengan menentukan titik-titik data tersebut menggunakan *cursor* dan membaca koordinat *cursor* tersebut sebagai koordinat relatif yang ditetapkan oleh perangkat lunak PAINT-Microsoft™. Koordinat relatif tersebut selanjutnya dikonversi ke koordinat yang digunakan oleh kotak rekonstruksi yang digunakan.

- Menentukan koordinat dua sumber sinar-X yang digunakan untuk pemotretan. Koordinat ditentukan menggunakan data dari kotak rekonstruksi dan citra sinar-X yang diperoleh serta persamaan matematik perpotongan dua garis lurus.
- Menentukan koordinat titik di kotak rekonstruksi yang ditentukan menggunakan citra sinar-X yang diperoleh, koordinat sumber sinar-X yang telah dihitung (ditentukan), dan persamaan matematik perpotongan dua garis lurus.

Uraian atas langkah proses rekonstruksi sehingga koordinat titik yang ditentukan dapat diketahui dan pola evaluasi yang dilakukan diuraikan sebagai berikut.

2.2.1 Perlengkapan dan Dimensi Kotak Rekonstruksi

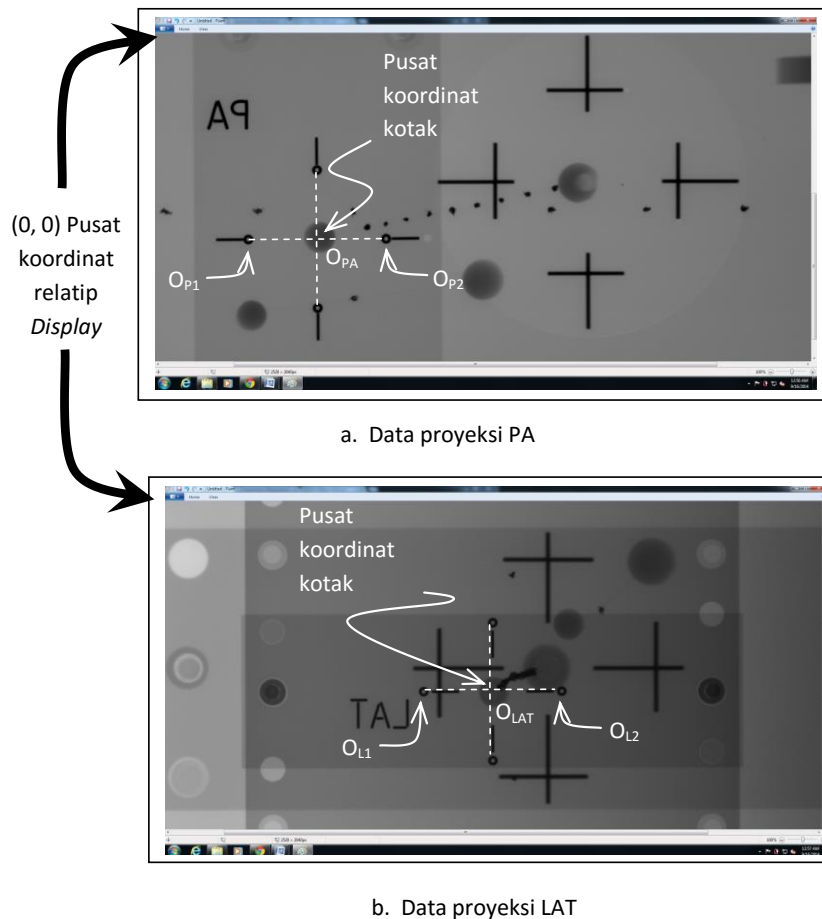


Gambar 2. Perlengkapan rekonstruksi koordinat.

Gambar 2 adalah perlengkapan proses rekonstruksi koordinat untuk proses evaluasi tersebut. Kotak rekonstruksi mempunyai ukuran tertentu dan dilengkapi dengan

tanda-tanda yang diperlukan untuk proses rekonstruksi koordinat yang akan terlihat pada citra hasil proyeksi menggunakan sinar-X, yaitu posisi *marker* untuk menentukan titik pusat koordinat (tanda +) dan label (PA dan LAT) agar hasil proyeksi tidak tertukar orientasi sehingga pembacaannya benar. Dengan perlengkapan yang telah diketahui ukurannya tersebut, proses rekonstruksi koordinat menggunakan dua citra proyeksi semi-orthogonal dapat dijalankan.

2.2.2 Pembacaan Data Citra Sinar-X



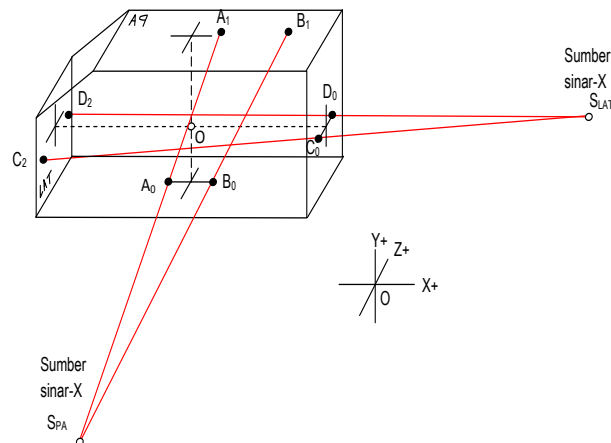
Gambar 3. Pembacaan koordinat proyeksi menggunakan PAINT Microsoft™.

Untuk membaca data hasil proyeksi yang ada pada film sinar-X digunakan perangkat lunak PAINT-Microsoft™. Dari perangkat lunak tersebut, akan diperoleh data koordinat relatif terhadap pusat koordinat layar komputer (*display*), yaitu kiri-atas sebagai titik (0, 0). Data koordinat tersebut kemudian dikonversi ke sistem koordinat kotak rekonstruksi. Pusat koordinat kotak rekonstruksi (O) di proyeksikan ke foto sinar-X menjadi O_{PA} dan O_{LAT} . Dua titik proyeksi tersebut adalah titik tengah *marker* (+) yang menempel pada film sinar-X ketika proses pemotertan sinar-X berlangsung (lihat Gambar 3). Koordinat dua titik tersebut diperoleh dari pertengahan titik O_{P1} dan O_{P2} untuk O_{PA} pada Gambar 3.a, serta O_{L1} dan O_{L2} untuk O_{LAT} pada Gambar 3.b. Oleh karena itu, kedua pasangan titik tersebut (O_{P1} dan O_{P2} serta O_{L1} dan O_{L2}) perlu diambil data koordinatnya, selain untuk menentukan pusat koordinat kotak rekonstruksi, juga digunakan untuk menentukan resolusi citra sinar-X yang digunakan. Jarak dua pasangan titik tersebut sesuai dengan ukuran kotak rekonstruksi pada Gambar 2.c adalah 5 cm, sehingga resolusi citra sinar-X dapat ditentukan yaitu: $(X_{OP2} - X_{OP1})/5$ untuk citra PA dan $(X_{OL2} - X_{OL1})/5$ untuk citra LAT. Nilai resolusi

digunakan untuk mengkonversi koordinat dari satuan pixel ke satuan cm selain menjadi nilai kualitas dari citra tersebut.

2.2.3 Menentukan Koordinat Sumber Sinar-X

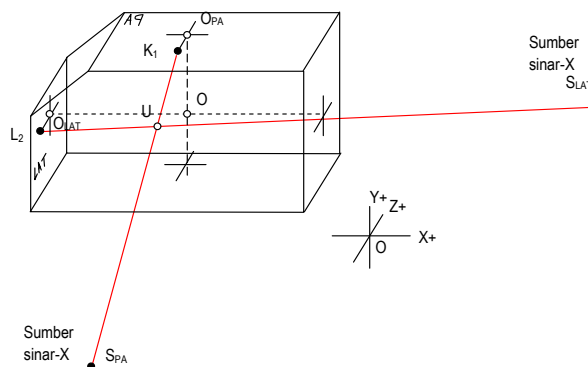
Koordinat marker (+) pada kotak rekonstruksi dapat diketahui relatif terhadap pusat koordinat kotak rekonstruksi, karena ukuran dari kotak rekonstruksi diketahui. Oleh karena itu, koordinat titik A_0 dan B_0 , serta titik C_0 dan D_0 pada Gambar 4 dapat diketahui. Koordinat proyeksi A_0 dan B_0 , serta C_0 dan D_0 yaitu titik A_1 dan B_1 , serta C_2 dan D_2 dapat ditentukan dari citra proyeksi sinar-X. Empat titik tersebut pada masing-masing posisi untuk PA dan LAT membentuk dua garis yang bersilangan, titik temu dua garis tersebut adalah titik koordinat sumber sinar-X, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. Dengan pola ini, koordinat sumber sinar-X dapat ditentukan dari data yang ada pada citra sinar-X dan ukuran kotak rekonstruksi.



Gambar 4. Menentukan koordinat Sumber sinar-X, S_{PA} dan S_{LAT} ^[5].

2.2.4 Menentukan Koordinat Titik Dalam Kotak Rekonstruksi

Titik K_1 dan L_2 pada Gambar 5 dapat ditentukan koordinatnya relatif terhadap pusat koordinat kotak rekonstruksi dari citra proyeksi sinar-X. Koordinat sumber sinar-X juga telah diketahui, oleh karena itu empat titik S_{PA} , K_1 , dan S_{LAT} , L_2 yang telah diketahui koordinatnya tersebut membentuk dua garis lurus yang bersilangan, dan titik potong dua garis tersebut adalah titik U yang ditentukan seperti pada Gambar 5. Dengan pola ini, koordinat titik di dalam kotak rekonstruksi dapat ditentukan.



Gambar 5. Menentukan koordinat titik U ^[5].

2.2.5 Pola Evaluasi

Dua jenis percobaan untuk proses evaluasi ini dilakukan. Pertama untuk mengetahui angka kesalahan hasil rekonstruksi koordinat, yaitu obyek yang akan direkonstruksi ditempatkan pada titik tertentu yang telah diketahui nilai koordinatnya.

Namun demikian penempatan obyek tersebut pada koordinat yang ditentukan tidak akan bebas juga dari kesalahan, dan diperkirakan kesalahan penentuan lokasi obyek tersebut secara subyektif tidak akan lebih dari 0,01 cm. Perbedaan koordinat tersebut dengan koordinat hasil rekonstruksi adalah nilai kesalahan dari proses rekonstruksi ini.

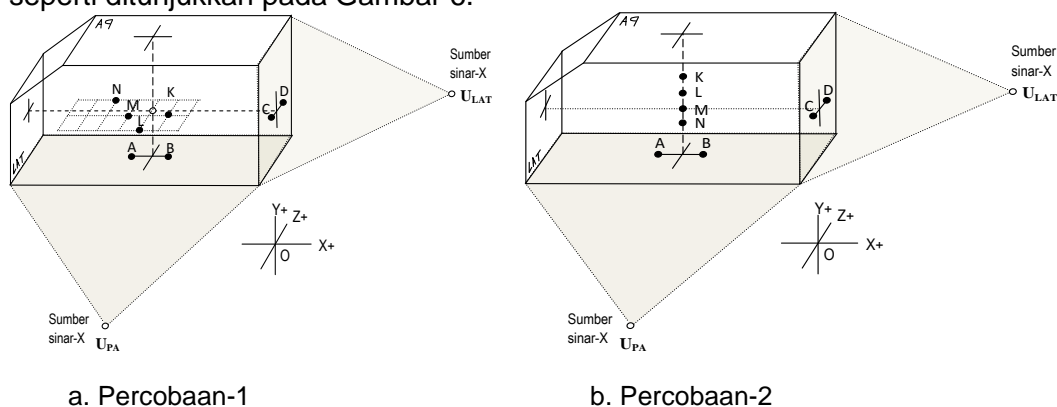
Kedua untuk menentukan deviasi hasil rekonstruksi koordinat. Hal ini dilakukan dengan merekonstruksi suatu obyek yang tetap dengan menggunakan citra proyeksi yang dihasilkan dari jarak sumber sinar-X yang berbeda-beda. Perbedaan hasil rekonstruksi atas sebuah obyek yang posisi nya tetap tersebut merupakan angka deviasi dari proses rekonstruksi koordinat. Semua penyelesaian persamaan matematik dalam proses rekonstruksi ini dilaksanakan menggunakan program komputer (bahasa C) dan Microsoft-Excel™.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil

3.1.1 Angka Kesalahan Rekonstruksi Koordinat

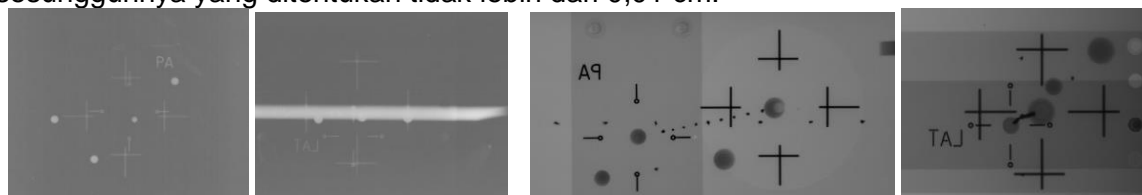
Ada dua set data yang diambil dengan jarak sumber sinar-X ke kotak rekonstruksi berbeda dan komposisi posisi obyek yang akan direkonstruksi koordinatnya juga berbeda seperti ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Pemotretan beberapa obyek yang diketahui koordinatnya (K, L, M, N) dengan jarak sumber sinar-X yang berbeda.

Koordinat titik-titik yang ada di kotak rekonstruksi baik percobaan-1 dan 2 pada Gambar 6 (titik K, L, M, N) telah diketahui koordinatnya relatif terhadap pusat kotak rekonstruksi. Penempatan titik-titik tersebut dilakukan secara manual sedemikian rupa sehingga koordinatnya mendekati nilai sesungguhnya. Gambar 7 adalah citra hasil proyeksi pada Gambar 6 dengan resolusi 80 pixel per cm.

Hasil pembacaan koordinat dari citra proyeksi sinar-X menggunakan perangkat lunak PAINT-microsoft™ yang kemudian dikonversi ke koordinat kotak rekonstruksi dan selanjutnya menggunakan persamaan matematik perpotongan dua garis lurus, maka koordinat titik bersangkutan dapat ditentukan. Tabel 1 adalah hasil untuk titik-titik K,L,M,N percobaan-1 dan 2. Perbedaan nilai koordinat hasil rekonstruksi dengan nilai sesungguhnya yang ditentukan tidak lebih dari 0,01 cm.



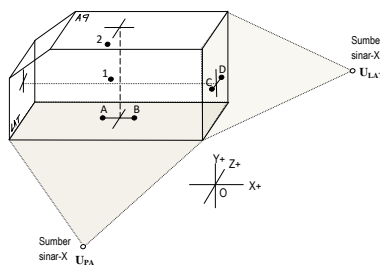
Gambar 7. Citra hasil pemotretan dari
Tabel 1. Data hasil pengujian untuk angka kesalahan (dalam cm).

PERCOBAAN -1									
Sumber sinar-X:									
Koordinat sinar-X untuk Proyeksi PA					Koordinat sinar-X untuk Proyeksi LAT				
X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	
-0,878	-105,68	1,135	97,863	-2,735	0,443				
Rekonstruksi Koordinat:									
Titik	Koordinat obyek			Koordinat hasil rekonstruksi			Perbedaan nilai pada rekonstruksi		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
K	5,4	0,5	-0,5	5,50262	0,47385	-0,41238	-0,10262	0,02615	-0,08762
L	2,5	0,5	-3,5	2,52621	0,52537	-3,45722	-0,02621	-0,02537	-0,04278
M	-0,6	0,6	-0,5	-0,5358	0,68362	-0,43391	-0,0642	-0,08362	-0,06609
N	-3,6	0,6	2,5	-3,59329	0,6684	2,49441	-0,00671	-0,0684	0,00559

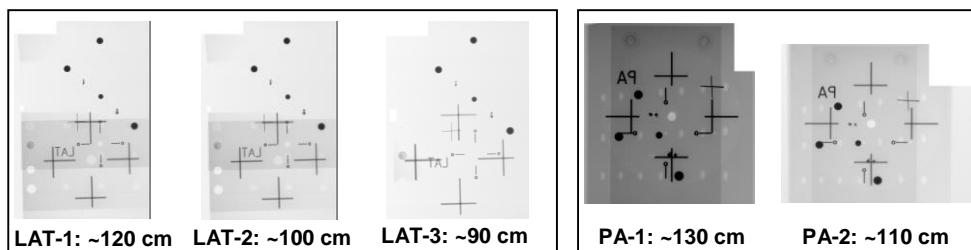
PERCOBAAN -2									
Sumber sinar-X:									
Koordinat sinar-X untuk Proyeksi PA					Koordinat sinar-X untuk Proyeksi LAT				
X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	
29,82	-127,944	-6,34	121,8	-1,456	3,5				
Rekonstruksi Koordinat:									
Titik	Koordinat obyek			Koordinat hasil rekonstruksi			Perbedaan nilai pada rekonstruksi		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
K	-0,1	6,2	0	-0,1568	6,2189	-0,0034	0,0568	-0,0189	0,0034
L	-0,1	3,2	0	-0,08016	3,148	0,0155	-0,01984	0,052	-0,0155
M	-0,1	0,1	0	-0,0337	0,1801	0,0077	-0,0663	-0,0801	-0,0077
N	0	-2,9	0	0,02136	-2,8266	0,0096	-0,02136	-0,0734	-0,0096

3.1.2 Standard Deviasi Nilai Rekonstruksi

Dua titik bebas yang tetap koordinatnya di dalam kotak rekonstruksi (titik 1 & 2 pada Gambar 9) dan diproyeksikan menggunakan jarak sumber sinar-X yang berbeda. Percobaan ini untuk melihat konsistensi hasil rekonstruksi dari persamaan matematik yang digunakan atas data yang berlokasi tetap tersebut. Gambar 9 adalah pola proyeksi dan Gambar 10 citra hasil proyeksi dengan 3 proyeksi LAT (LAT-1 s/d LAT-3) serta 2 proyeksi PA (PA-1 & PA-2) dengan resolusi 40 pixel per cm yang dihasilkan dari proyeksi menggunakan jarak yang berbeda-beda. Tabel 2 adalah hasil rekonstruksi koordinat dua titik tersebut dan harga rata-rata serta nilai standard deviasinya. Dari Tabel terlihat bahwa nilai standard deviasi tidak lebih dari 2 mm.



Gambar 9. Pemotretan untuk dua obyek tetap dengan posisi sumber sinar-X berbeda.



Gambar 10. Citra proyeksi dari jarak sumber sinar-X berbeda untuk obyek yang sama, resolusi 40 pixel per cm.

Tabel 2. Data hasil pengujian untuk konsistensi rekonstruksi koordinat (dalam cm).

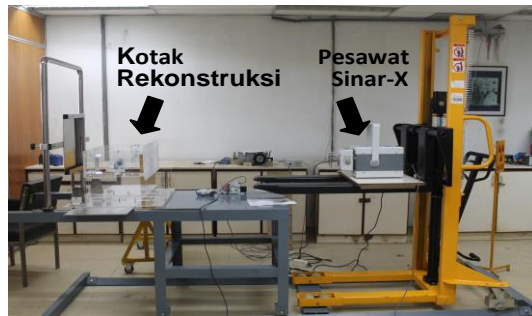
Kombinasi Posisi Sinar-X	Koordinat Sumber Sinar-X						Koordinat Obyek						
	PA			LAT			Titik-1			Titik-2			
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	
PA_1—LAT_1	-	-	-	124.559	2.132	0.921	-	4.889	-	-	9.843	-	
	1.484	129.455	4.258				3.564	4.889	0.679	0.614	9.843	0.481	
PA_1—LAT_2	-	-	-	102.519	2.608	1.422	-	4.884	-	-	9.802	-	
	1.484	129.455	4.258				3.564	4.884	0.680	0.614	9.802	0.482	
PA_1—LAT_3	-	-	-	87.085	0.691	1.920	-	4.772	-	-	9.455	-	
	1.484	129.455	4.258				3.563	4.772	0.682	0.617	9.455	0.491	
PA_2—LAT_1	-	-	-	124.559	2.132	0.921	-	4.889	-	-	9.843	-	
	1.526	110.686	4.351				3.565	4.889	0.735	0.604	9.843	0.441	
PA_2—LAT_2	-	-	-	102.519	2.608	1.422	-	4.884	-	-	9.801	-	
	1.526	110.686	4.351				3.565	4.884	0.735	0.604	9.801	0.442	
PA_2—LAT_3	-	-	-	87.085	0.691	1.920	-	4.773	-	-	9.454	-	
	1.526	110.686	4.351				3.563	4.773	0.738	0.607	9.454	0.454	
							Rata-rata	3.564	4.849	0.708	0.610	9.700	0.465
							Standard deviasi	0.0010	0.0589	0.0305	0.0058	0.1909	0.0223

Sesungguhnya ada empat titik-tetap yang diambil sebagai obyek yang akan direkonstruksi koordinatnya, tetapi rekonstruksi dua obyek lain tersebut ada yang gagal total tidak bisa direkonstruksi dan ada yang sebagian dapat direkonstruksi, sehingga hanya dua titik (1 & 2) saja yang ditampilkan sebagai data pengukuran pada Tabel 2. Hal ini terjadi karena kesalahan penentuan titik ketika memilih titik proyeksi pada citra proyeksi (*human error*). Hal ini terjadi karena resolusi citra untuk jenis percobaan tersebut menggunakan resolusi 40 pixel per cm.

3.2 Pembahasan

Hasil proses rekonstruksi koordinat menggunakan teknik perpotongan dua garis sangat ditentukan oleh data koordinat pendukung yang berasal dari citra proyeksi untuk proses rekonstruksi tersebut yang ditentukan oleh operator pengguna proses rekonstruksi (*manual*). Kesalahan data dapat berakibat dua garis dalam proses rekonstruksi tersebut tidak saling berpotongan, sehingga proses rekonstruksi gagal menghasilkan koordinat hasil rekonstruksi. Dapat dipahami dari kondisi tersebut bahwa resolusi citra proyeksi memegang peran yang sangat penting. Untuk citra dengan resolusi rendah, maka kesalahan penentuan titik pada citra akan berakibat besar, karena perubahan lokasi pixel mewakili perubahan lokasi yang relatif besar, sehingga sangat mungkin mengakibatkan dua garis sebagai penentu rekonstruksi tidak berpotongan atau proses rekonstruksi gagal. Untuk citra proyeksi dengan resolusi tinggi, perubahan lokasi pixel akan mewakili perubahan lokasi pilihan yang relatif kecil, sehingga proses rekonstruksi dapat berhasil. Dari pengalaman dalam evaluasi ini, citra dengan resolusi 80 pixel per cm merupakan batas aman untuk proses rekonstruksi menggunakan cara ini.

Penempatan titik yang telah diketahui koordinatnya yang akan dipakai sebagai referensi dalam penentuan nilai kesalahan rekonstruksi koordinat dilakukan menggunakan benda yang tidak tembus oleh sinar-X dan ditempelkan pada benang yang diikatkan pada kotak rekonstruksi pada posisi tertentu sehingga koordinat benda tersebut dapat diketahui nilainya. Gambar 11.b adalah cara penentuan posisi titik referensi tersebut. Dengan cara ini diperkirakan kesalahan penempatan posisi koordinat tidak akan lebih dari 0,1 cm. Perubahan orientasi proyeksi dalam hal ini jarak sumber sinar-X dan posisi kotak rekonstruksi dilakukan menggunakan instalasi fasilitas sinar-X seperti pada Gambar 11.a. Kotak rekonstruksi dapat diputar untuk mendapatkan proyeksi PA dan LAT, sedangkan jarak sumber sinar-X dapat dirubah karena terletak pada derek (*crane*) yang dapat diatur posisinya.



a. Fasilitas instalasi percobaan sinar-X.



b. Penempatan titik uji koordinat.

Gambar 11. Instalasi perangkat sinar-X dan penempatan titik uji koordinat.

Nilai koordinat hasil rekonstruksi dipilih menggunakan citra dengan resolusi 80 pixel per cm dan diperoleh perbedaan nilai koordinat dengan koordinat titik referensi tersebut tidak lebih dari 0,1 cm (Tabel 1). Menggunakan proyeksi citra dengan resolusi 40 pixel per cm menghasilkan perbedaan rekonstruksi 0,2 cm (Tabel 2). Teknik rekonstruksi menggunakan perpotongan dua garis ini baik untuk kondisi resolusi citra proyeksinya tinggi, diatas 80 pixel per cm.

4. KESIMPULAN

Persamaan matematik menggunakan pola perpotongan dua garis di ruang tiga dimensi baik digunakan untuk proses rekonstruksi koordinat jika resolusi citra proyeksi yang digunakan mempunyai nilai 80 pixel per cm atau lebih besar. Resolusi citra akan mempengaruhi nilai kesalahan rekonstruksi, dan dengan resolusi 80 pixel per cm tersebut akan diperoleh nilai kesalahan rekonstruksi tidak lebih dari 0,1 cm. Resolusi rendah akan memperbesar kesalahan dan bahkan dapat membuat gagal nya proses rekonstruksi. Kebaikan menggunakan teknik ini adalah, kegagalan proses rekonstruksi dapat digunakan sebagai peringatan (*warning*) bahwa data yang diberikan oleh operator rekonstruksi mengandung kesalahan yang besar. Jika data tersebut tetap dipaksakan untuk digunakan dalam proses rekonstruksi, yaitu dengan memberi nilai toleransi yang besar pada proses perpotongan dua garis dalam proses rekonstruksi tersebut sehingga proses rekonstruksi akan mengeluarkan hasil, maka akan memberi hasil rekonstruksi koordinat dengan nilai kesalahan yang besar.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Budiyo Tris., Brachytherapy Intracavitair Nasofarings Menggunakan mHDR Ir-192 di RS Dr. Sardjito, Prosiding Seminar Persatuan Ahli Radiografi Indonesia, Denpasar Bali., 2007.
- [2]. Abbot P., Trigonometry., Hodder and Stoughton., Kent., 1970.
- [3]. Mathematics, <http://math.stackexchange.com/questions/28503/how-to-find-intersectionof-two-lines-in-3d>. di unduh Agustus 2014.
- [4]. Suntoro A., Rekonstruksi Koordinat Menggunakan Kotak Rekonstruksi dan Foto Proyeksi Sinar-X., PRIMA., Volume 8, No. 2., November 2011, Tangerang Selatan.
- [5]. Suntoro A., Konsep Algoritma Rekonstruksi Dosis-Matrik Sumber Batang Pada Brakiterapi Servik Menggunakan Transformasi Geometri., Seminar Nasional SDM Teknologi Nuklir VII., Yogyakarta, 16 November 2011.