

Analisis Variasi Faktor Eksposi dan Ketebalan Irisan Terhadap CTDI dan Kualitas Citra Pada Computed Tomography Scan

(Analysis of Variation of Exposure Factor and Slice Thickness On CTDI and Image Quality at Computed Tomography Scan)

Arry. Y Nurhayati, Nia. N. Nariswari, B. Rahayuningsih, Yuda. C. Hariadi
Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Jember (UNEJ)
Jln. Kalimantan 37, Jember 68121
E-mail: nianastitinariswari@gmail.com

Abstrak

CT Scan merupakan alat pencitraan sinar-X yang dipadukan dengan komputer pengolah data sehingga mampu menghasilkan gambar potongan melintang tubuh dan memiliki dosis relatif lebih tinggi, karena berasal dari radiasi primer dan radiasi hambur dari setiap *slice*. Dosis yang dihasilkan dipengaruhi oleh parameter *scan* yaitu faktor eksposi (tegangan tabung, arus-waktu rotasi) dan ketebalan irisan. Kuantitas dosis pada pemeriksaan CT Scan digunakan metode *Computed Tomography Dose Index* (CTDI). Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui efek variasi parameter *scan* terhadap CTDI dan kualitas citra dengan menggunakan phantom. Hasil data yang diperoleh menunjukkan bahwa pada variasi 200 mAs, 120 kV dan 5 mm menghasilkan CTDI_{vol} dan CNR optimum dengan nilai masing-masing 25.8 mGy dan 3.51. Hal ini disebabkan adanya keseimbangan nilai antara faktor eksposi yang tidak memiliki rentang yang terlalu jauh sehingga menghasilkan energi dan kuantitas sinar X yang seimbang dan ketebalan irisan tidak menghasilkan *noise* tinggi sehingga objek dalam phantom tetap dapat terlihat lebih baik.

Kata Kunci: CT Scan, CTDI, CTDI_{vol}, LCR, CNR.

Abstract

CT Scan is an X-ray imaging device integrated with a data processing computer so as to produce a cross-sectional image of the body and has a relatively higher dose, as it comes from primary radiation and scattering radiation from each slice. The resulting dose is affected by the scan parameters of the exposure factor (tubular incision, rotational current-time) and the thickness of the incision. The quantity of dosage on CT scan is used Computed Tomography Dose Index (CTDI) method. This study was conducted to investigate the effect of scanning parameter variation on CTDI and image quality using phantom. The results of the obtained data show that on variations of 200 mAs, 120 kV and 5 mm yields CTDI_{vol} and CNR optimum value of 25.8 mGy and 3.51 respectively. This is due to the balance of values between the exposure actors that do not have a range that is too far so as to produce energy and the quantity of X-ray is balanced and the thickness of the slice does not produce high noise so that the objects in the ph antom can still look better.

Keywords: CT Scan, CTDI, CTDI_{vol}, LCR, CNR.

PENDAHULUAN

Computed Tomography (CT) Scan adalah alat penunjang diagnostik yang menggunakan sinar-X melalui teknik tomografi dan komputerisasi modern untuk pemeriksaan organ tubuh manusia. CT Scan memiliki dosis yang relatif lebih tinggi dibanding dengan alat radiologi lainnya. Dosis yang tinggi pada CT Scan bukan hanya berasal dari radiasi primer dari setiap *slice*, tetapi juga berasal dari radiasi hambur dari *slice* di samping kanan kirinya [3].

Computed Tomography Dose Index (CTDI) merupakan konsep untuk mendapatkan dosis pada suatu titik sebagai gabungan dosis radiasi berkas utama dan radiasi dari *scanning* di sekitarnya:

$$CTDI = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{D(z)}{NT} dz \quad (1)$$

$D(z)$ = radiasi profil dosis sumbu z

N = jumlah irisan pada satu gambaran *scan* axial.

T = lebar irisan

Menurut [5], *scan* secara *spiral* dikembangkan konsep CTDI yang memperhitungkan pengaruh pergerakan meja atau *pitch* yaitu volume CTDI (CTDI_{vol}):

$$CTDI_{vol} = \frac{CTDI_w}{pitch} \quad (2)$$

Pitch adalah perbandingan besar pergerakan meja untuk satu kali putaran 360° (I) dengan lebar berkas terkolimasi NT [9].

CTDI_{vol} adalah ukuran dosis rata-rata yang diserap oleh phantom tertentu pada keluaran *scanning* tertentu [15].

Pemeriksaan menggunakan CT Scan ada tiga parameter *scan* yang berpengaruh terhadap dosis yang dihasilkan yaitu tegangan tabung, arus-waktu rotasi dan ketebalan irisan. Tegangan tabung menentukan distribusi energi dari berkas sinar-X. Meningkatkan tegangan tabung sinar-X akan meningkatkan jumlah radiasi, dan juga akan meningkatkan energi rata-rata foton. Energi sinar-X mempengaruhi dosis radiasi pasien secara langsung, semakin besar tegangan tabung sinar-X yang digunakan dosis radiasi yang diterima pasien juga semakin besar [1]. Variasi tegangan tabung sinar-X menyebabkan perubahan dosis CT, *noise* dan

kontras citra [14].

Parameter lain yang mempengaruhi kualitas citra dan dosis adalah produk dari arus-waktu rotasi, yang merupakan ukuran jumlah radiasi yang digunakan untuk menghasilkan citra radiografi atau citra CT. Pengurangan arus-waktu rotasi menjadi setengah awal akan menurunkan dosis dan *noise* sebesar 50% [15].

Ketebalan irisan atau *slice thickness* adalah tebalnya irisan atau potongan dari objek yang diperiksa. Umumnya ukuran yang tebal akan menghasilkan gambaran dengan detail yang rendah dan dosis radiasi yang rendah. Ketebalan irisan ditentukan oleh *beam width* (BW), *pitch* dan faktor lain seperti bentuk dan lebar dari filter rekonstruksi pada poros Z [13].

Kontras resolusi sebagai salah satu parameter kualitas citra dapat dinyatakan sebagai kemampuan CT Scan untuk menampilkan objek dalam ukuran 2 mm – 3 mm yang memiliki perbedaan densitas sangat kecil dari lokasi dimana objek itu berada. *Low contrast resolution* (LCR) adalah salah satu bagian dari kontras resolusi yang merupakan kemampuan untuk membedakan objek dengan densitas yang sedikit berbeda [10].

Menurut [8], program *American Collage of Radiology* (ACR) *accreditation* melakukan pengukuran LCR dengan ukuran kuantitas rasio kontras terhadap *noise* yaitu *contrast to noise ratio* (CNR) yang dapat ditentukan dengan membuat *region of interest* (ROI) pada objek yang terlihat pada hasil *scan*, sehingga CNR dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$CNR = \frac{A - B}{SD} \quad (3)$$

dimana A adalah *mean* ROI dari objek, B adalah *mean* ROI dari *background* diantara dua objek dan SD adalah standart deviasi dari B. Nilai CNR harus lebih besar dari 1.0 untuk protokol kepala dan perut orang dewasa. Sedangkan untuk protokol perut anak-anak harus lebih besar dari 0.4 dan lebih besar dari 0.7 untuk protokol kepala anak-anak [2].

Dosis yang dihasilkan dari pemeriksaan CT Scan juga berpengaruh pada kualitas citra. Kualitas citra dan dosis radiasi selalu dihubungkan satu sama lain, yang berarti bahwa perubahan kualitas citra merupakan efek dari dosis radiasi, dan dosis radiasi dipengaruhi oleh parameter *scan* (Soderberg, 2008). Berdasarkan hal tersebut akan dilakukan penelitian mengenai pengaruh parameter *scan* yaitu faktor eksposi dan ketebalan irisan terhadap dosis yang dihasilkan dengan menggunakan CTDIvol, yang kemudian dapat diketahui kualitas citra LCR berdasarkan nilai CNR yang dihasilkan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan alat *Computed Tomography* (CT) Scan Philips dan phantom Philips Brilliance 16 Series P. N: 453567135962 sebagai objeknya. *Setting* parameter pertama adalah variasi tegangan tabung, nilai yang digunakan yaitu 80 kV, 100 kV, 120 kV dan 140 kV dengan arus-waktu rotasi dan ketebalan irisan yang tetap yaitu 100 mAs dan 1 mm. Parameter kedua adalah variasi arus-waktu rotasi pada nilai 100 mAs, 200 mAs, 300 mAs dan 400 mAs dengan

tegangan tabung 120 kV dan ketebalan irisan 5 mm. Sedangkan parameter ketiga adalah variasi ketebalan irisan dengan ketebalan yang digunakan yaitu 1 mm, 3 mm, 5 mm dan 10 mm pada arus-waktu rotasi 100 mAs serta tegangan tabung 80 kV. Variasi ketiga parameter tersebut menghasilkan data dosis yang ditunjukkan oleh nilai CTDIvol dan citra phantom pada tampilan konsol komputer CT Scan.

Setelah dilakukan *setting*, kemudian *scan* phantom dimulai sesuai petunjuk yang terlihat pada komputer, sehingga akan terlihat topogram phantom keseluruhan. Kemudian diatur area *scan* untuk memperoleh citra LCR yaitu pada bagian multipin phantom, setelah itu dilakukan *scan* lagi pada area *scan* yang telah dipilih.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini terdiri dari dua analisis, yaitu analisis untuk mengetahui pengaruh variasi tiga parameter *scan* yaitu tegangan tabung, arus-waktu rotasi dan ketebalan irisan terhadap dosis (CTDIvol) dan kualitas citra LCR berdasarkan nilai (CNR) yang dihasilkan.

Hasil dan analisis data dosis *Computed Tomography Dose Index Volume* (CTDIvol)

Variasi tegangan tabung

Data CTDIvol yang diperoleh melalui variasi parameter pertama yaitu tegangan tabung dengan-waktu rotasi erta ketebalan irisan yang tetap disajikan dalam Tabel 1 dibawah ini:

Tabel 1. Data pengaruh variasi tegangan tabung terhadap CTDIvol

No	Tegangan Tabung (kV)	Arus-Waktu (mAs)	Ketebalan Irisan (mm)	CTDIvol (mGy)
1	80	100	1	3.9
2	100	100	1	7.9
3	120	100	1	12.9
4	140	100	1	18.8

Berdasarkan Tabel 1 dengan variasi tegangan tabung yang dilakukan menghasilkan dosis berupa nilai CTDIvol yang juga bervariasi. Setiap kenaikan tegangan tabung yang diberikan, menyebabkan kenaikan CTDIvol yang dihasilkan. Semakin besar tegangan tabung maka semakin besar pula CTDIvol yang dihasilkan. Selisih CTDIvol dari tegangan tabung terkecil hingga terbesar adalah sekitar 4 mGy hingga 5.9 mGy. Hal tersebut berarti bahwa pada penelitian ini memiliki perubahan CTDIvol yang sama dengan penelitian [7] yang mengalami kenaikan sekitar 1.4 kali pada tegangan tabung 120 kV dan 140 kV. Hal ini karena tegangan tabung menentukan besarnya energi sinar-X yang diemisikan oleh tabung sinar-X. Semakin besar beda tegangan antara anoda dan katoda, elektron akan semakin dipercepat dan energi sinar-X yang dihasilkan memiliki energi rata-rata yang lebih tinggi yang menghasilkan dosis radiasi tinggi [6].

Variasi Arus-waktu rotasi

Parameter kedua yang divariasikan adalah arus-waktu rotasi dengan tegangan tabung dan ketebalan irisan yang

tetap yaitu masing- masing 120 kV dan 5 mm, dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 2. Data pengaruh variasi arus-waktu rotasi terhadap CTDIvol

No	Arus-Waktu (mAs)	Tegangan Tabung (KV)	Ketebalan Irisan (mm)	CTDIvol l (mGy)
1	100	120	5	12.9
2	200	120	5	25.8
3	300	120	5	38.7
4	400	120	5	51.7

Berdasarkan Tabel 2 dapat diketahui bahwa semakin besar arus-waktu rotasi yang diberikan, maka semakin besar pula CTDIvol yang dihasilkan. Perubahan kenaikan CTDIvol pada variasi arus-waktu rotasi ini lebih besar dibandingkan kenaikan CTDIvol pada variasi tegangan tabung. Arus-waktu rotasi berhubungan dengan kuantitas sinar-X, pada penggunaan arus-waktu rotasi sebanding dengan nilai elektron yang mengalir dari katoda ke anoda persatuan waktu. Sehingga dosis radiasi meningkat secara linear dengan arus-waktu rotasi (Brilliance CT, 2006).

Variasi ketebalan irisan

Parameter ketiga yang dilakukan pada penelitian ini adalah variasi ketebalan irisan, dengan tebal irisan yang digunakan yaitu 1 mm, 3 mm, 5 mm dan 10 mm.

Tabel 3 Data pengaruh variasi ketebalan irisan terhadap CTDIvol

No	Ketebalan Irisan (mm)	Tegangan Tabung (KV)	Arus-Waktu (mAs)	CTDIvol l (mGy)
1	1	80	100	3.9
2	3	80	100	3.9
3	5	80	100	3.9
4	10	80	100	3.9

Berdasarkan Tabel 3 variasi ketebalan irisan yang digunakan tidak berpengaruh terhadap CTDIvol jika tegangan tabung dan arus-waktu rotasi dibuat tetap. Hal ini dikarenakan energi dari tegangan tabung (kV) dan jumlah sinar-X dari arus-waktu rotasi pada setiap variasi dibuat sama. Hasil penelitian ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh [11], menunjukkan bahwa nilai CTDIvol pada konsol memiliki nilai yang selalu sama dari variasi ketebalan irisan (mm) yang dilakukan. Tetapi jika salah satu dari tegangan tabung dan arus-waktu rotasi divariasikan, variasi ketebalan irisan akan tetap berpengaruh pada nilai CTDIvol.

Hasil dan analisis data kualitas citra LCR berdasarkan nilai CNR

Berikut merupakan hasil dan analisis data pengaruh variasi tegangan tabung (KV), arus dan waktu rotasi (mAs), serta ketebalan irisan (mm) terhadap kualitas citra LCR dengan nilai CNR

Variasi tegangan tabung (kV)

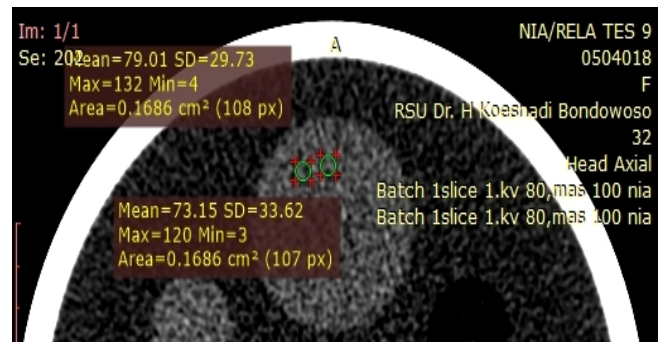
Nilai CNR yang dihasilkan dari variasi tegangan tabung disajikan dalam Tabel 4.4, yang menunjukkan bahwa

variasi tegangan tabung menghasilkan nilai CNR yang bervariasi.

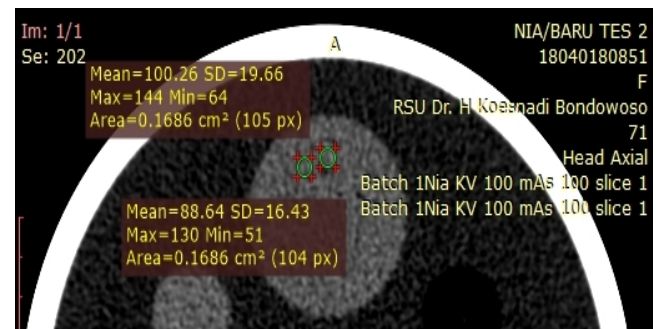
Tabel 4. Data pengaruh variasi tegangan tabung terhadap CNR

Tegangan Tabung (kV)	Arus-Waktu Rotasi (mAs)	Ketebalan Irisan (mm)	Area ROI (cm ²)	ROI Objek Lexan		ROI Background Aculon		CNR
				Mean (HU)	Standart Deviasi	Mean (HU)	Standart Deviasi	
80	100	1	0.1686	79.01	29.73	73.15	33.62	0.17±0.18
100	100	1	0.1686	100.26	19.66	88.64	16.43	0.71±0.21
120	100	1	0.1686	103.81	7.241	94.05	6.949	1.40±0.20
140	100	1	0.1686	109.45	12.3	107.29	13.39	0.16±0.18

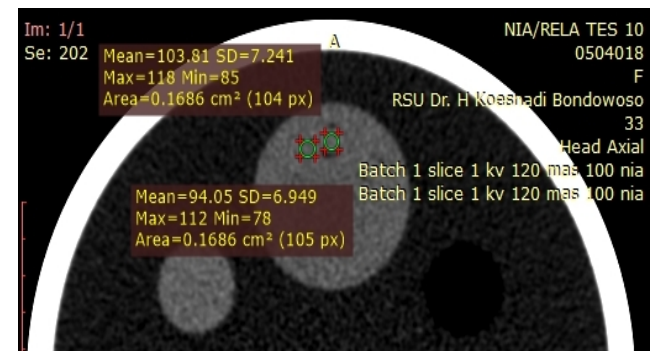
Berdasarkan Tabel 4 setiap kenaikan tegangan tabung menghasilkan perubahan nilai CNR yang tidak tetap. Ketika digunakan tegangan tabung 120 kV memiliki nilai CNR terbesar yaitu 1.40. Sedangkan CNR terkecil pada saat digunakan tegangan tabung 140 kV yang hanya mempunyai selisih 0.01 saat digunakan tegangan tabung 100 kV. Hal tersebut menunjukkan bahwa pada penelitian ini variasi tegangan tabung dengan nilai yang paling tinggi menghasilkan nilai CNR yang paling rendah.



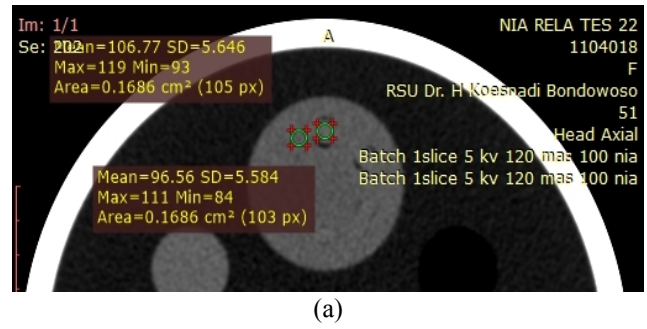
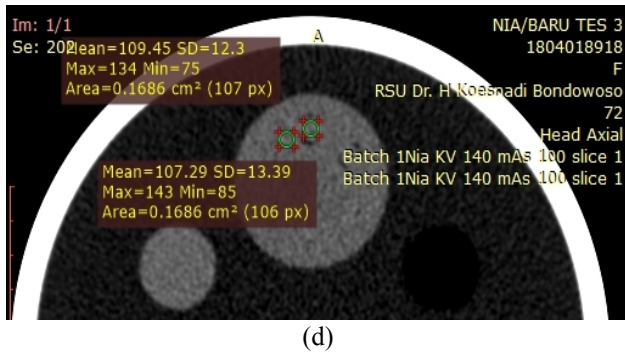
(a)



(b)



(c)



Gambar 1. Hasil citra variasi tegangan tabung (a) 80 kV, 100 mAs, 1 mm; (b)100 kV, 100 mAs, 1 mm; (c) 120 kV, 100 mAs, 1 mm; (d) 140 kV, 100 mAs, 1 mm

Berdasarkan Tabel 4 nilai tertinggi CNR yang diperoleh akibat variasi tegangan tabung ketika digunakan 120 kV yaitu 1.40. Sedangkan CNR terkecil diperoleh ketika digunakan 140 kV yaitu 0.16. Tabel 4 juga menunjukkan bahwa semakin besar tegangan tabung maka nilai CNR juga semakin besar, kecuali pada nilai CNR dari kenaikan tegangan tabung 120 kV ke 140 kV. Dari nilai CNR tersebut 1.40 merupakan nilai yang sesuai untuk protokol kepala dewasa yaitu harus lebih besar dari 1.0 (ACR, 2017). Setiap kenaikan tegangan tabung yang dilakukan, nilai CNR yang dihasilkan mengalami kenaikan dan penurunan yang tidak tetap. Hasil citra tegangan tabung dapat dilihat dalam Gambar 1.

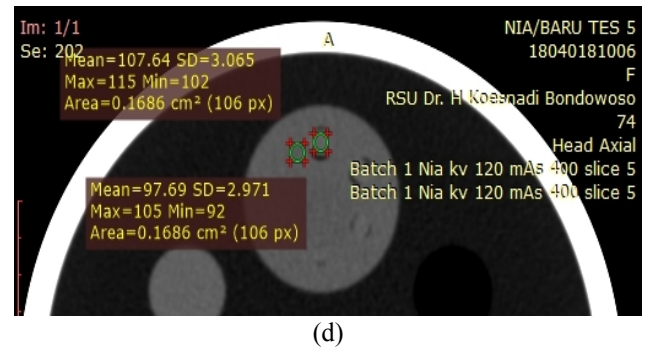
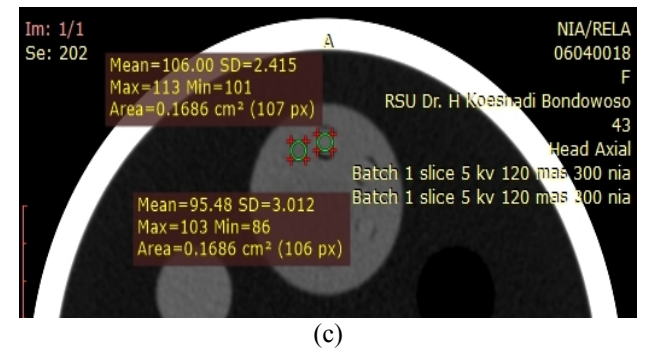
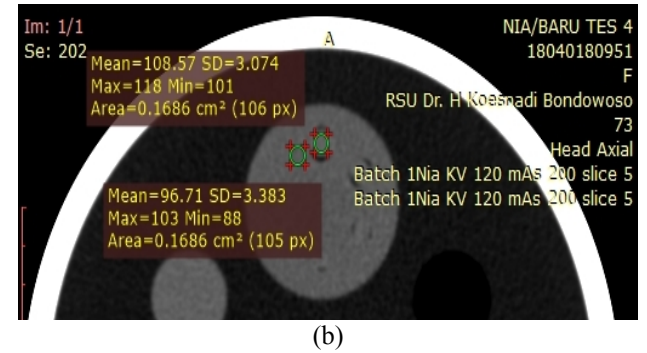
Variasi arus-waktu rotasi

Variasi arus-waktu rotasi yang dilakukan juga menghasilkan nilai CNR yang berbeda-beda. Hal ini ditunjukkan pada Tabel 4.5 yaitu data pengaruh variasi arus-waktu rotasi terhadap nilai CNR berikut:

Tabel 5. Data pengaruh variasi arus-rotasi terhadap nilai CNR

Arus-Waktu Rotasi (mAs)	Tegangan Tabung (kV)	Ketebalan Irisan (mm)	Area ROI (cm ²)	ROI Objek Leksan		ROI Background Aculon		CNR
				Mean (HU)	Standart Deviasi	Mean (HU)	Standart Deviasi	
100	120	5	0.1686	106.77	5.646	96.56	5.584	1.83±0.19
200	120	5	0.1686	108.57	3.074	96.71	3.383	3.51±0.18
300	120	5	0.1686	106	2.415	95.48	3.012	3.49±0.17
400	120	5	0.1686	107.64	3.065	97.69	2.971	3.35±0.19

Berdasarkan Tabel 5 variasi arus-waktu rotasi menghasilkan nilai CNR yang berbeda-beda. Setiap kenaikan arus-waktu rotasi menghasilkan perubahan nilai CNR yang tidak tetap. Kenaikan dari arus-waktu rotasi 100 mAs ke 200 mAs nilai CNR semakin besar. Tetapi pada saat kenaikan arus-waktu rotasi 200 mAs hingga 400 mAs nilai CNR semakin kecil. Saat digunakan 100 mAs memiliki nilai CNR yang terkecil yaitu 1.83. Sedangkan pada nilai arus-waktu rotasi terbesar yaitu 200 mAs menghasilkan nilai CNR 3.51.



Gambar 2. Hasil citra variasi arus-waktu rotasi (a) 100 mAs, 120 kV, 5 mm (b) 200 mAs, 120 kV, 5 mm; (c) 300 mAs, 120 kV, 5 mm (d) 400 mAs, 120 kV, 5 mm

Variasi arus-waktu rotasi menghasilkan nilai CNR yang lebih besar dibandingkan dengan variasi dua parameter yang lain yaitu tegangan tabung dan ketebalan irisan. Hal ini dikarenakan digunakan tegangan tabung dan ketebalan irisan yang besar yaitu 120 kV dan 5 mm dan berpengaruh pada citra yang dihasilkan. Nilai dalam Tabel menunjukkan bahwa semua variasi arus-waktu rotasi yang dilakukan menghasilkan CNR yang sesuai dengan [2] yaitu pada

pemeriksaan kepala dewasa nilai CNR harus lebih besar dari 1.0. Berdasarkan Tabel 4.5 nilai CNR meningkat hanya pada kenaikan dari arus-waktu rotasi 100 mAs ke 200 mAs, sedangkan dari kenaikan arus-waktu rotasi dari 200 mAs ke 400 mAs nilai CNR semakin menurun. Kenaikan nilai arus-waktu rotasi tidak selalu menyebabkan kenaikan nilai CNR yang dihasilkan.

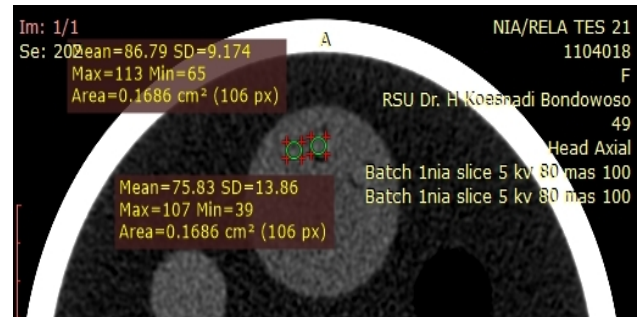
Variasi Ketebalan Irisan

Variasi ketebalan irisan yang digunakan menghasilkan nilai CNR yang berbeda-beda seperti yang terlihat dalam Tabel 6 berikut:

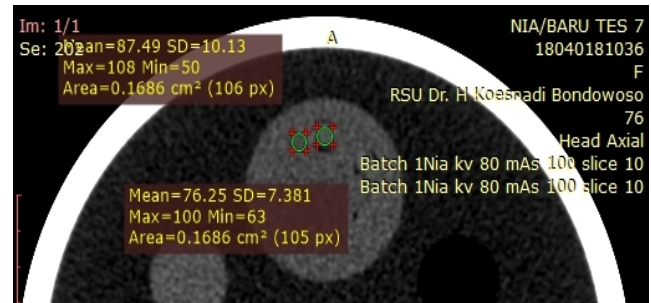
Tabel 6. Data pengaruh variasi ketebalan irisan terhadap nilai CNR

Ketebalan Irisan (mm)	Tegangan Tabung (kV)	Arus-Waktu (mAs)	Area ROI (cm ²)	ROI Objek Lexan		ROI Background Aculon		CNR
				Mean (HU)	Standart Deviasi	Mean (HU)	Standart Deviasi	
1	80	100	0.1686	79.01	29.73	73.15	33.62	0.17±0.18
3	80	100	0.1686	85.99	18.52	74.57	16.86	0.68±0.20
5	80	100	0.1686	86.79	9.174	75.83	13.86	0.79±0.16
10	80	100	0.1686	87.49	10.13	76.25	7.381	1.52±0.23

Berdasarkan Tabel 6 variasi ketebalan irisan menghasilkan nilai CNR yang beda-beda. Perubahan nilai CNR pada variasi ketebalan irisan ini lebih teratur dari pada perubahan nilai CNR pada variasi tegangan tabung dan variasi arus-waktu rotasi, yaitu mengalami kenaikan seiring dengan kenaikan nilai ketebalan irisan yang digunakan. Nilai CNR terbesar yaitu 1.52 ketika digunakan ketebalan irisan 10 mm. Sedangkan CNR terkecil adalah 0.17 ketika digunakan ketebalan irisan 1 mm.



(c)



(d)

Gambar 3. Hasil citra variasi ketebalan irisan (a) 1 mm, 80 kV, 100 mAs; (b) 3 mm, 80 kV, 100 mAs; (c) 5 mm, 80 kV, 100 mAs; (d) 10 mm, 80 kV, 100 mAs

Setiap kenaikan ketebalan irisan yang digunakan menghasilkan kenaikan nilai CNR. Hal ini dikarenakan semakin besar irisan maka citra yang dihasilkan akan lebih detail. Ketebalan 10 mm merupakan ketebalan yang menghasilkan CNR lebih dari 1.0 yaitu 1.52. Hasil ini menunjukkan bahwa berdasarkan nilai CNR tersebut pada ketebalan irisan 10 mm citra yang dihasilkan memiliki detail yang lebih baik dibandingkan dengan ketebalan irisan yang lain. Perubahan nilai CNR pada variasi ketebalan irisan lebih teratur dibandingkan pada variasi tegangan tabung dan arus-waktu rotasi. Nilai CNR yang kecil disebabkan banyaknya *noise* pada citra menjadi indikasi rendahnya nilai kontras resolusi. Sedangkan nilai CNR yang besar menunjukkan *noise* yang sedikit sehingga resolusi kontras citra semakin baik [12].

KESIMPULAN

Variasi tegangan tabung berpengaruh terhadap nilai CTDIvol karena menentukan energi sinar-X yang diemisikan dan berpengaruh terhadap dosis yang dihasilkan. Variasi arus-waktu rotasi mempunyai pengaruh lebih besar terhadap nilai CTDIvol dibandingkan variasi tegangan tabung karena arus-waktu rotasi menentukan banyaknya atau jumlah sinar-X yang dihasilkan dan dosis radiasi meningkat secara linear dengan arus-waktu rotasi. Sedangkan ketebalan irisan tidak berpengaruh terhadap nilai CTDIvol jika tegangan tabung dan arus-waktu rotasi dibuat tetap.

Variasi tegangan tabung yang semakin maka nilai CNR juga semakin besar, kecuali pada nilai CNR dari kenaikan tegangan tabung 120 kV ke 140 kV. Kenaikan nilai arus-waktu rotasi tidak selalu menyebabkan kenaikan nilai CNR yang dihasilkan. Sedangkan pada variasi ketebalan irisan yang semakin besar menyebabkan nilai CNR yang semakin besar. Secara umum nilai CTDI_{vol} dan nilai CNR optimum diperoleh pada variasi 200 mAs, 120 kV dan 5 mm.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Alsafi, K. G. 2016. Radiation protection in x-ray computed tomography: Literature review. *International Journal of Radiology and Imaging Technology*. 2(3): 2.
- [2] American Collage of Radiology (ACR). 2017. *American College of Radiology CT Accreditation Program Testing Instructions*. Revisi 2017. New York: American Institute of Physics.
- [3] Bauhs, J. A., T. J. Vrieze, A. N. Primak, M. R. Bruesewitz, dan C. H. McCollough. 2008. CT dosimetry: Comparison of measurement techniques and devices. *RadioGraphics*. 28: 245-253.
- [4] Brilliance CT. 2006. *O – Level System Performance Manual 453567359211 Revision E*. Philips Medical System.
- [5] Bushberg, J. T., J. A. Seibert, E. M. Leidholdt dan J. M. Boone. 2012. *The Essential Physics of Medical Imaging*. Third Edition. Baltimore: Williams and Wilkins.
- [6] Chesney, D. N. 1980. *Radiographic Imaging*. University Park: Press London.
- [7] Dewang, S., dan U. Rosyidah. Analisis dosis radiasi yang diterima pasien pada pemeriksaan computed tomography (ct) scan. Jurusan Fisika. Fakultas Matematika dan Ilmu pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin. Makassar.
- [8] Kofler, J. M., L. Yu., S. Leng., Y. Zhang., Z. Li., R. E. Carter, dan C. H. McCollough. 2016. Assessment of low-contrast resolution fir the acr ct accreditation program: what is the impact of iterative reconstruction?. *HHS Public Access Author Manuscript*. 39(4): 619-623.
- [9] McNitt-Gray, M. F. 2002. AAPM/RSNA physics tutorial for residents: Topics in ct radiation dose in ct. *RadioGraphics*. 22: 1541-1553.
- [10] Morgan, C. L. 1983. *Basic Principles of Computed Tomography*. Baltimore: University Park Press.
- [11] Mulyono, N. P. N., Hidayanto. E., Arifin. Z., dan Anam. C. 2014. Analisis distribusi computed tomography dose index (ctdi) pada body phantom. *Younger Physics Journal*. 3(4): 357-362.
- [12] Rozanah, W. S. Budi, dan Z. Arifin. 2015. Perbandingan kualitas citra CT Scan pada protokol dosis tinggi dan dosis rendah untuk pemeriksaan kepala pasien dewasa dan anak. *Youngster Physics Journal*. 4(1): 117-126.
- [13] Seeram. 2001. *Computed Tomography: Physical Principles, Clinical Applications, and Quality Control*. W. B Saunders Company.
- [14] Soderberg, M. 2008. *Automatic Exposure Control in CT: An Investigation Between Different Manufacturers Considering Radiation Dose ang Image Quality*. Swedia: Lund University.
- [15] Tsapaki, V., dan M. Rehani. 2007. Dose management in ct facility. *Biomedical Imaging and Interventional Journal*. 3(2):e43.