

UJI KESESUAIAN STANDAR NILAI HVL FILTER ALUMINIUM PADA PESAWAT SINAR-X MAMMOGRAFI: STUDI KASUS DI RUANG INSTALASI RADIOLOGI RS. SILOAM MAKASSAR

Azri Mutmainna¹, Sri Dewi Astuty^{1,*}, Syamsir Dewang¹, dan Mulyadin²

¹ *Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin, Makassar*

² *BPFK, Makassar, Sulawesi Selatan*

Email: tuty_ilyas@yahoo.com

Received: 4 Januari 2020; revised: 25 Januari 2020; accepted: 27 Januari 2020

ABSTRACT

The quality control of X-ray radiation in a radiology device plays an important role in determining the clinical use feasibility. The HVL value test of a filter is very important because it determines the effective of X-ray energy. HVL values indicate the thickness of the absorbent material to absorb X-ray intensity up to half of its original intensity. This research is devoted to testing the feasibility of Mammography equipment in the radiology installation room of Siloam Makassar hospital by comparing two methods of determinations the HVL value in the variation of voltage 23, 25, 27, 29, 31 and 33 kVp. The HVL value that determined from direct methods without filters is used as a base value that to be compared with the HVL value which determined by indirect methods through calculations after the addition of aluminum filter thicks to gradually. HVL values by indirect measurements ranged from 0.268–0.401 mmAl, while by direct measurements between 0.291–0.338 mmAl with a deviation between 1.39–7.90%. The results obtained indicate that the HVL value for all X-ray tube voltage variations from the two methods in use still on ranges the tolerance standard so that it can be reported that the X-ray mammography at the Siloam hospital was declared feasible.

Keywords: *mammography, HVL value, the quality of radiation*

ABSTRAK

Kontrol kualitas radiasi sinar-X dalam perangkat radiologi memainkan peran penting dalam menentukan kelayakan penggunaan klinis. Uji nilai HVL filter sangat penting karena menggambarkan energi efektif sinar-X. Nilai HVL menunjukkan ketebalan bahan penyerap untuk menahan intensitas radiasi sinar-X hingga setengah dari intensitas mula-mula. Penelitian ini memiliki tujuan untuk menguji kelayakan peralatan Mammografi di ruang instalasi radiologi rumah sakit Siloam Makassar dengan membandingkan dua metode penentuan nilai HVL dalam variasi tegangan 23, 25, 27, 29, 31 dan 33 kVp. Nilai HVL yang ditentukan dari metode langsung tanpa filter digunakan sebagai nilai dasar yang akan dibandingkan dengan nilai HVL yang ditentukan dengan metode tidak langsung melalui perhitungan setelah penambahan tebal filter aluminium secara bertahap. Nilai HVL dengan pengukuran tidak langsung berkisar antara 0,268–0,401 mmAl, sedangkan dengan pengukuran langsung antara 0,291–0,338 mmAl dengan deviasi antara 1,39–7,90%. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa nilai HVL untuk semua variasi tegangan tabung sinar-X dari dua metode yang digunakan masih pada rentang

standar toleransi sehingga dapat dilaporkan bahwa mamografi sinar-X di rumah sakit Siloam dinyatakan layak.

Kata Kunci: mamografi, nilai HVL, kualitas radiasi

1. PENDAHULUAN

Penemuan sinar-X tahun 1895 oleh Wilhelm Conrad telah merevolusi bidang medik. Sinar-X digunakan secara luas dalam bidang medik di seluruh dunia. Diantara sifat sinar-X adalah daya tembus yang sangat besar dan mampu menghitamkan pelat fotografi. Sifat tersebut dimanfaatkan untuk mendapatkan informasi anatomis di dalam tubuh sehingga dapat digunakan untuk mengetahui penyakit dalam tubuh manusia. Selain memiliki dampak positif, sinar-X juga sangat berbahaya karena jika dosis penyinaran berlebihan dapat menimbulkan kerusakan pada sel-sel tubuh. Dosis yang sangat tinggi dari radiasi sinar-X harus diminimalisir agar tidak sampai merusak. Salah satu upaya untuk mereduksi dosis radiasi yaitu dengan menggunakan filter di dalam tabung sinar-X. Penggunaan jenis material dan ketebalan filter telah dipersyaratkan oleh Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN) dalam Peraturan nomor 2 tahun 2018 yang telah menetapkan nilai standar yang harus dipenuhi berdasarkan nilai *half-value layer* (HVL) pada setiap faktor eksposi tegangan tabung [1,2].

Pesawat mammografi merupakan salah satu pesawat radiologi yang memanfaatkan sinar-X sebagai alat pendeteksi dini atau *screening* untuk mendiagnosis kanker payudara. Pesawat mammografi mampu memperlihatkan kelainan pada payudara dalam bentuk yang sangat kecil hingga kurang dari 5 mm (stadium nol). Tegangan tabung yang diaplikasi pada pesawat mammografi relatif rendah yaitu < 40 kVp karena jaringan payudara merupakan jaringan lunak dan tipis [3].

Salah satu parameter penting dalam pesawat mammografi yang harus dikontrol adalah kualitas berkas radiasi yang merupakan energi efektif sinar-X yang

dibutuhkan untuk menembus suatu objek. Kualitas berkas radiasi dikarakterisasi secara numerik dengan nilai HVL.

HVL adalah ketebalan filter yang mampu mengurangi paparan sampai setengah dari nilai awalnya. Semakin besar nilai HVL, maka daya tembus sinar-X akan semakin besar, demikian pula sebaliknya [4,5]. Nilai HVL bergantung pada nilai tegangan tabung dan jenis filter yang digunakan [6]. Semakin tinggi tegangan tabung, semakin besar energi sinar-X dan dibutuhkan filter yang lebih tebal agar intensitas sinar-X menjadi setengahnya.

Penelitian sebelumnya oleh Tung et al [7] telah menyelidiki nilai HVL untuk pesawat mamografi digital dengan filter internal tipe Mo/Mo, Mo/Rh dan Rh/Rh menggunakan *thermoluminescent dosimeters* (TLD-100H) pada tegangan tabung 23–30 kVp, dengan hasil berkisar antara 0,328–0,541 mmAl. Sidauruk et al [8] membandingkan nilai HVL untuk filter eksternal aluminium, tembaga, dan timah pada variasi tegangan tabung 50, 60, dan 70 kVp [8]. Sidauruk et al melaporkan bahwa nilai HVL aluminium antara 3,0–5,0 mmAl, tembaga antara 0,05–0,2 mmCu, sedangkan pada timah diperoleh sebesar 0,05–0,05 mmSn [8]. Hasil serupa oleh Aswad et al [9] yang menguji pesawat mammografi fabrikasi Siemens Co., Ltd memperoleh nilai HVL pada tegangan 23–35 kVp (filter eksternal aluminium) berkisar antara 0,288–0,588 mmAl dengan deviasi antara 0,00–1,19% [9].

Penelitian ini memiliki tujuan untuk menguji nilai HVL pada pesawat mammografi Phillips Medical Systems (DMC GmbH type 9890-010-83201) dengan membandingkan dua metode yaitu secara langsung tanpa menggunakan filter yang dirujuk sebagai nilai patokan dan secara

tidak langsung melalui perhitungan setelah penambahan ketebalan filter aluminium.

DASAR TEORI

Sinar-X

Berawal dari percobaan Heinrich Hertz tahun 1887 menggunakan tabung hampa, katoda dan anoda yang dihubungkan dengan sumber listrik pada tegangan rendah hingga ditemukanlah sinar-X karakteristik [10]. Sinar-X termasuk gelombang elektromagnetik dengan panjang gelombang antara 0,01–10 nm. Sinar-X digolongkan sebagai radiasi pengion karena energi sinar-X mampu mengionisasi materi yang dilalui [2,11].

Selanjutnya dengan perkembangan teknologi, pesawat sinar-X telah berkembang dan saat ini telah memanfaatkan teknologi digital (*digital radiography*, DR) sehingga lebih efisien dan lebih cepat dibandingkan dengan prosedur pengolahan film radiografi. Sinar-X terpancar setelah berkas elektron yang dipercepat dari katoda menuju anoda menumbuk target pada anoda pada kecepatan tinggi, dan keluar melalui kolimator sempit sebelum mencapai filter.

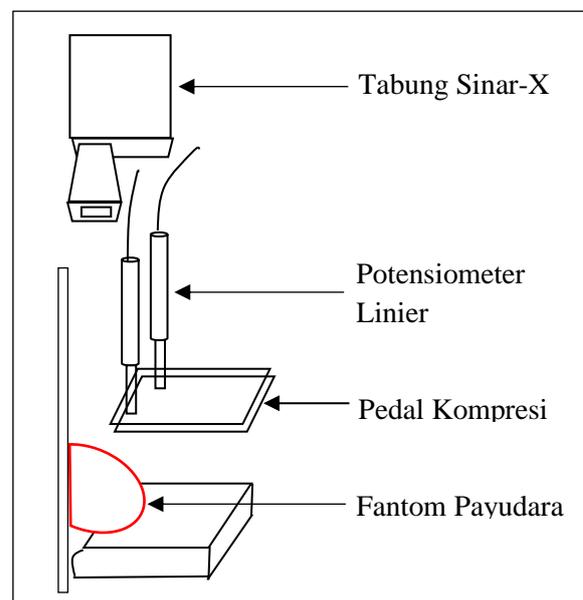
Pesawat mammografi

Pesawat mammografi merupakan suatu teknik pemeriksaan kanker payudara yang menggunakan sinar-X dosis rendah (umumnya berkisar 0,7 mSv) [11]. Pesawat mammografi mampu mengidentifikasi adanya mikrokalsifikasi berupa bintik kecil kalsium berukuran <5 mm (stadium nol), benjolan yang berukuran 1 cm atau lebih yang tidak dapat dirasakan oleh pasien atau tidak terlihat oleh dokter [5].

Prinsip kerja dari pesawat mammografi sama dengan prinsip kerja pesawat sinar-X biasa, yang membedakan adalah tegangan tabung (kV) yang digunakan pada pesawat mammografi lebih rendah serta bahan anoda dan filternya menggunakan Mo/Rh yang

berfungsi untuk menghasilkan sinar-X karakteristik. Dalam pemeriksaan mammografi, payudara pasien ditekan atau dikompresi hingga 50% sehingga hasil citra radiografi tampak lebih jelas dalam memperlihatkan posisi mikrokalsifikasi yang terbentuk.

Diagram perangkat pesawat mammografi tampak pada Gambar 1. *Focal spot* yang kecil pada tabung sinar-X berfungsi untuk menghasilkan citra dengan resolusi spasial yang tinggi. Sumbu anoda dan katoda sejajar dengan dinding dada sampai *nipple* agar terbentuk efek *heel* sehingga foton sinar-X dengan intensitas lebih tinggi mengenai daerah payudara yang paling tebal dan intensitas sinar-X yang rendah mengenai bagian *nipple*. Pedal kompresi digunakan untuk mengkompresi payudara sehingga mengurangi tebal payudara agar citra yang terbentuk lebih bagus karena hamburan yang lebih sedikit.



Gambar 1. Diagram perangkat pesawat mammografi.

HVL

Ukuran kualitas sinar-X biasanya dinyatakan dalam HVL yaitu ketebalan bahan yang dibutuhkan untuk mengurangi

intensitas sinar-X menjadi setengah dari intensitas semula [9,11,12]. Apabila energi efektif pada berkas sinar-X meningkat akibat penambahan *filter*, maka daya tembus dari sinar-X juga meningkat [11,13,14].

Nilai HVL suatu bahan dapat dihitung berdasarkan nilai koefisien serap linier (μ) bahan (persamaan 1) atau berdasarkan hubungan antara dosis radiasi yang menghasilkan tebal di bawah dan di atas setengah dosis mula-mula (persamaan 2).

$$HVL = \frac{0,693}{\mu} \quad (1)$$

$$HVL = \frac{t_b \ln(2D_a/D_0) - t_a \ln(2D_b/D_0)}{\ln(D_a/D_b)} \quad (2)$$

Dengan HVL adalah tebal bahan yang menghasilkan setengah dosis mula-mula $D_0/2$ (mm), D_0 adalah dosis mula-mula (mGy), t_a adalah tebal filter yang menghasilkan nilai di atas $D_0/2$ (mm), t_b adalah tebal filter yang menghasilkan nilai di bawah $D_0/2$ (mm), D_a adalah dosis pada ketebalan filter t_a (mGy), dan D_b adalah dosis pada ketebalan filter t_b (mGy).

Batasan nilai HVL yang dapat diterima, mengacu pada batasan nilai yang dikeluarkan oleh BAPETEN tahun 2018 untuk setiap faktor tegangan tabung [1]:

a. Batas minimum toleransi nilai HVL:

$$HVL = (0,01 \times kVp) + 0,03 \quad (3)$$

b. Batas maksimum toleransi nilai HVL:

$$HVL = (0,01 \times kVp) + c \quad (4)$$

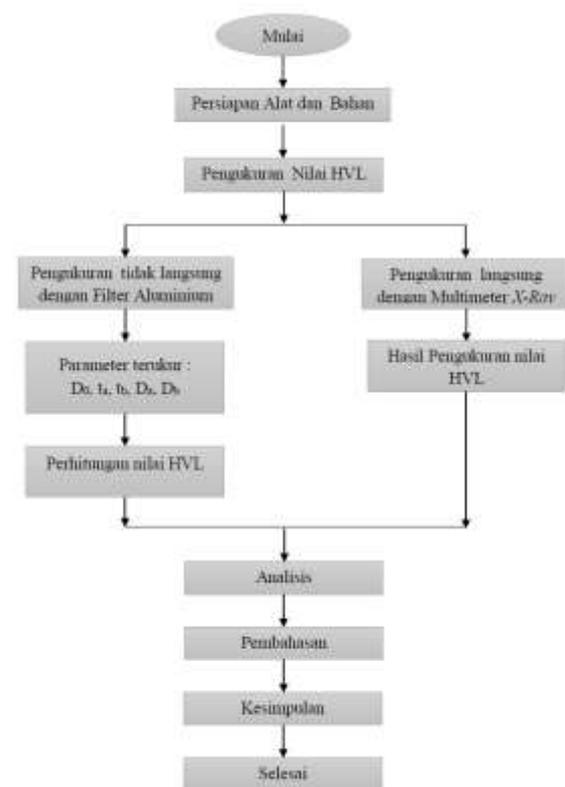
Sehingga batas toleransi yang dapat diterima adalah:

$$0,01(kVp) + 0,03 \leq HVL \leq 0,01(kVp) + c \quad (5)$$

Dengan c sebesar 0,12 untuk filter (Mo/Mo), 0,19 untuk *Molybdenum* dan *Rhodium* (Mo/Rh), dan 0,22 untuk *Rhodium* (Rh/Rh). Dalam penelitian, filter internal pesawat mammografi yang digunakan jenis Mo/Mo.

METODE

Penelitian ini dilakukan di Instalasi Radiologi RS. Siloam Makassar, Sulawesi Selatan. Alat yang digunakan pesawat mammografi (Type: Phillips Medical Systems DMC GmbH 9890-010-83201), filter eksternal bahan aluminium dengan variasi ketebalan 0,49; 0,055; dan 0,106 mm, multimeter X-ray (*Raysafe*), dan *waterpass*. Faktor eksposi arus-waktu sebesar 50 mAs dengan nilai tegangan tabung yang divariasikan yaitu 23, 25, 27, 29, 31 dan 33 kVp. Alur penelitian dicantumkan dalam Gambar 2.



Gambar 2. Desain Pengukuran HVL.

Tahapan penelitian ada tiga. Tahap pertama adalah pengukuran dosis mula-mula (D_0) tanpa filter untuk setiap variasi tegangan tabung untuk menghitung acuan nilai setengah dosis mula-mula ($D_0/2$). Tahap kedua merupakan penentuan nilai

HVL secara tidak langsung dimana nilai-nilai D_a , D_b , t_a dan t_b selanjutnya akan diolah untuk mendapatkan nilai HVL berdasarkan persamaan (2). Tahap ketiga adalah pengukuran nilai HVL secara langsung tanpa menggunakan filter untuk memperoleh nilai HVL patokan yang terbaca langsung melalui multimeter. Pada tahap kedua, penetapan nilai dosis di atas dan di bawah nilai dosis $D_0/2$ disesuaikan dengan kombinasi ketebalan filter aluminium yang disusun untuk setiap variasi tegangan tabung.

Pengaturan tebal filter yang dipilih sebagai t_a dan t_b pada setiap variasi tegangan pada tahap kedua disesuaikan dengan hasil pembacaan dosis yang menghasilkan nilai sedikit di atas dan di bawah nilai dosis $D_0/2$. Selisih nilai di atas dan di bawah dosis $D_0/2$ yang paling mendekati secara pasti tidak dapat ditentukan karena pengaturan penambahan filter hanya disesuaikan dengan ketersediaan tebal pelat filter yang ada.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Nilai dosis mula-mula pada setiap variasi tegangan tabung dapat dilihat dalam Tabel 1. Dosis mula-mula (D_0) sebagai dasar untuk mendefinisikan nilai dosis yang terukur

untuk satu nilai tegangan tabung. Setengah dari dosis mula-mula ($D_0/2$) merupakan dasar perkiraan bahwa nilai HVL dari suatu filter akan mampu melewati intensitas radiasi yang setara dengan nilai $D_0/2$ tersebut.

Tabel 1 menunjukkan terjadinya peningkatan nilai dosis mula-mula setiap peningkatan tegangan tabung sinar-X. Demikian juga untuk nilai $D_0/2$, perubahan dosis setara dengan kenaikan faktor tegangan eksposi.

Hasil pengukuran dosis atas (D_a) dan dosis bawah (D_b) dari nilai setengah dosis mula-mula ($D_0/2$) ditunjukkan pada Tabel 2. Tahapan penelitian yang kedua ini merupakan metode penentuan nilai HVL secara tidak langsung. HVL diperoleh melalui perhitungan berdasarkan nilai D_a , D_b , t_a dan t_b yang terukur.

Untuk pengukuran secara tidak langsung menggunakan filter aluminium pada ketebalan berbeda untuk memperkirakan nilai dosis di atas dan dosis di bawah nilai setengah dosis mula-mula. Selain itu, ditunjukkan juga batas nilai minimum dan maksimum dari toleransi nilai HVL yang memenuhi untuk setiap faktor tegangan tabung.

Tabel 1. Data nilai dosis mula-mula (D_0) dan nilai setengah dosis mula-mula ($D_0/2$).

No	Tegangan (kVp)	Arus-waktu (mAs)	D_0 (mGy)			Rata-rata	$D_0/2$ (mGy)
			1	2	3		
1	23	50	4,120	4,121	4,121	4,121	2,061
2	25		5,272	5,272	5,272	5,272	2,636
3	27		6,596	6,595	6,596	6,596	3,298
4	29		8,017	8,018	8,019	8,018	4,009
5	31		9,561	9,562	9,563	9,562	4,781
6	33		11,15	11,14	11,15	11,15	5,575

Tabel 2. Data nilai D_a , D_b , t_a , t_b serta hasil perhitungan nilai HVL pada metode tidak langsung.

No	Tegangan (kVp)	D_0 (mGy)	$D_0/2$ (mGy)	D_a (mGy)	D_b (mGy)	t_a (mmAl)	t_b (mmAl)	HVL (mmAl)	Batas nilai HVL	
									Min	Maks
1	23	4,121	2,061	2,292	1,860	0,216	0,318	0,268	0,26	0,35
2	25	5,272	2,636	2,802	2,541	0,271	0,326	0,305	0,28	0,37
3	27	6,596	3,298	3,332	3,253	0,318	0,326	0,321	0,30	0,39
4	29	8,018	4,009	4,190	3,771	0,318	0,373	0,341	0,32	0,41
5	31	9,562	4,781	5,147	4,659	0,318	0,373	0,359	0,34	0,43
6	33	11,15	5,575	6,018	5,174	0,373	0,428	0,401	0,36	0,45

Penjelasan dari penetapan nilai t_a dan t_b pada Tabel 2 adalah sebagai berikut. Misalkan untuk data tegangan 23 kVp dengan nilai $D_0/2$ sebesar 2,061 mGy, dibutuhkan dosis di atas (D_a) nilai setengah dosis mula-mula ($D_0/2$) sebesar 2,292 mGy, sedangkan dosis di bawah (D_b) nilai setengah dosis mula-mula ($D_0/2$) sebesar 1,860 mGy. Untuk mendapatkan estimasi kedua dosis tersebut (D_a dan D_b) diperoleh dengan menggunakan dua atau tiga pelat aluminium yang ditumpuk. Nilai D_a diperoleh melalui penggabungan filter aluminium yaitu 1 pelat ukuran 0,106 mmAl dan 2 pelat ukuran 0,055 mmAl dengan tebal keseluruhan filter (t_a) sebesar 0,216 mmAl. Sedangkan untuk nilai dosis di bawah (D_b)

nilai setengah dosis mula-mula sebesar 1,860 mGy, dibutuhkan tebal filter (t_b) sebesar 0,318 mmAl melalui penumpukan 3 pelat aluminium ukuran 0,106 mmAl.

Demikian seterusnya untuk variasi tegangan eksposi 25, 27, 29, 31 dan 33 kVp, dilakukan prosedur seperti di atas (data kalkulasi tidak ditampilkan). Dari hasil perhitungan nilai HVL yang ditunjukkan pada Tabel 2, rata-rata hasil tidak jauh dari penetapan nilai batas minimum *range* toleransi HVL. Semua data hasil perhitungan masuk dalam *range* tersebut sehingga dapat dinyatakan bahwa pesawat mammografi di Instalasi Radiologi RS. Siloam Makassar dalam kondisi layak.

Tabel 3. Data nilai HVL dari pengukuran secara langsung.

No	Tegangan (kVp)	Arus (mAs)	HVL (mmAl)			Rata-rata	Batas nilai HVL	
			1	2	3		Min.	Maks.
1	23	50	0,291	0,292	0,291	0,291	0,26	0,35
2	25		0,311	0,311	0,312	0,311	0,28	0,37
3	27		0,335	0,335	0,335	0,335	0,30	0,39
4	29		0,355	0,355	0,355	0,355	0,32	0,41
5	31		0,373	0,373	0,373	0,373	0,34	0,43
6	33		0,388	0,388	0,387	0,388	0,36	0,45

Tabel 4. Perbandingan nilai HVL pada metode langsung dan tidak langsung.

No.	Tegangan (kVp)	Arus-waktu (mAs)	Nilai HVL (mmAl)		Deviasi (%)
			Tidak langsung	Langsung	
1	23	50	0,268	0,291	7,90
2	25		0,305	0,311	1,93
3	27		0,321	0,335	4,18
4	29		0,341	0,355	3,94
5	31		0,359	0,373	3,75
6	33		0,401	0,388	3,35

Pada tahap ini, penentuan nilai HVL dilakukan dengan cara langsung membaca nilai HVL yang terukur pada *display* multimeter *X-ray Raysafe* untuk setiap variasi tegangan tabung.

Tabel 3 menunjukkan hasil pengukuran langsung nilai HVL untuk setiap nilai tegangan tabung. Dengan nilai batas minimal dan maksimum toleransi *range* yang dipersyaratkan, hasil pengukuran nilai HVL untuk semua variasi tegangan tabung pada pengukuran langsung berada pada nilai tengah *range*.

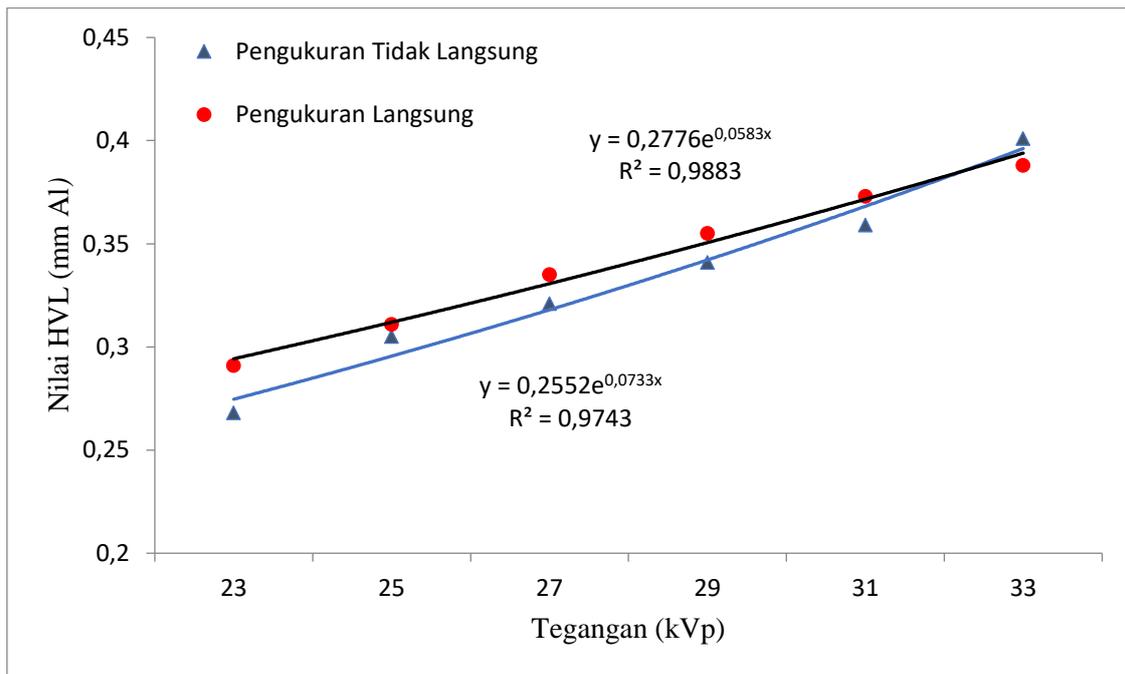
Hal ini yang menyebabkan dalam analisis penelitian nilai HVL hasil pengukuran dengan metode langsung dapat dijadikan sebagai nilai patokan. Selain itu, nilai HVL dari pengukuran langsung dapat diasumsikan merupakan nilai HVL yang sebenarnya dari setiap nilai tegangan tabung karena alat ukur multimeter *X-ray Raysafe* yang digunakan sensitif dan akurat. Setiap kenaikan tegangan 2 kVp diperoleh peningkatan nilai HVL sebesar 0,02 mmAl.

Perbandingan nilai HVL dari kedua metode pengukuran secara langsung dan tidak

langsung untuk semua variasi tegangan selengkapnya disajikan dalam Tabel, 4 sedangkan Grafik perbandingan nilai HVL dari kedua metode disajikan dalam Gambar 3.

Perbandingan nilai HVL dari kedua metode pengukuran sebagaimana dalam Tabel 4 tidak jauh berbeda dengan deviasi <10%. Nilai HVL yang diperoleh melalui dua metode yang dilakukan untuk semua variasi tegangan tabung sebesar 0,291–0,388 mmAl (untuk pengukuran langsung) dan sebesar 0,268–0,401 mmAl (pengukuran tidak langsung) dengan deviasi sebesar 3,35–7,90 %.

Pada tegangan 25 kVp didapatkan nilai HVL sebesar 0,305 mmAl untuk pengukuran tidak langsung dan 0,311 mmAl pada pengukuran secara langsung dengan deviasi yang menurun cukup signifikan dibanding tegangan 23 kVp yaitu menurun sebesar 5,97 % karena adanya sebaran dari variabel data yang kecil atau tidak adanya kesenjangan yang cukup besar terhadap kedua pengukuran.



Gambar 3. Hubungan tegangan terhadap nilai HVL dari dua metode pengukuran secara langsung dan tidak langsung.

Hubungan variasi tegangan terhadap nilai HVL dari dua metode pengukuran yaitu secara langsung dan tidak langsung masing-masing menunjukkan kenaikan yang signifikan dengan korelasi 0,98 atau 98 % (pengukuran tidak langsung) dan korelasi sebesar 0,97 atau 97 % (pengukuran secara langsung).

KESIMPULAN

Nilai HVL yang diperoleh dari kedua metode pengukuran untuk semua nilai tegangan tabung memenuhi nilai batas toleransi yang distandarkan dalam Peraturan BAPETEN RI Nomor 2 tahun 2018, sehingga pesawat Mammografi di ruang Instalasi Radiologi RS. Siloam Makassar layak digunakan dalam pemeriksaan klinis.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis ucapkan terima kasih kepada pihak RS. Siloam Makassar, Sulawesi Selatan yang telah memberikan ijin penulis melakukan penelitian dan terkhusus kepada pihak BPFK Makassar atas pengadaan

supervisor lapangan untuk memperlancar penelitian penulis.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Peraturan Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN) Republik Indonesia (RI) Nomor 2 Tahun 2018 Tentang Uji Kesesuaian Pesawat Sinar-X Radiologi Diagnostik dan Intervensional. 2018.
- [2] Ferry S. *Aplikasi radiasi sinar-X di bidang kedokteran untuk menunjang kesehatan masyarakat*. Prosiding Seminar Nasional IV Sumber Daya Manusia (SDM), Sekolah Tinggi Teknologi Nuklir – BATAN; 2008.
- [3] Johns HE. *The quality of X-ray (half value layer)*, In: *The Physics of Radiology*. fourth edition. Illinois: Charles C Thomas Publisher; 1983.
- [4] Bushberg JT, Seibert JA, Leidholdt Jr EM, Boone JM. *The essential physics of medical imaging*. Second Edition. Philadelphia USA: Lippincott Williams & Wilkins; 2002.

- [5] Richard B. The impact of increased Al filtration on X-ray tube loading and image quality in diagnostic radiology. *Medical Physics*. 2003;30:69–78.
- [6] Papp J. *Quality management in the imaging sciences*. Mosby Elsevier; 2006.
- [7] Tung CJ, Lin MT, Hsu FY, Lee JH, Chu CH, Tsai HY. Half-value layer determination using thermoluminescent dosimeters for digital mammography. *Radiation Measurement*. 2015;45:729-732.
- [8] Lincewati S, Afrina SH, Martha R, Timbangan S, Alemin BD. Determination of half value layer (HVL) value on X-rays radiography with using aluminum, copper and lead (Al, Cu, and Sn) attenuators. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018;1116:032032.
- [9] Aswad M, Abdullah B, Tahir D. Determination of the half-value layer by using filter aluminum sheets for digital mammography. *International Journal of Engineering and Science Applications*. 2018;15-22.
- [10] Hendee WR, Ritenour ER. *Medical imaging physics*. New York: Wiley-Liss, Inc; 2002.
- [11] Muslim G. *Penentuan half value layer (HVL) pada computed radiography (CR) dengan metode pengolahan citra digital*. Makassar: Skripsi, Departemen Fisika, Fakultas Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin; 2017.
- [12] Yudi P. *Penentuan nilai HVL (half value layer) dari pelat aluminium dengan variasi ketebalan filter menggunakan pesawat linac (linear accelerator) dengan metode ekstrapolasi*. Makassar: Skripsi, Departemen Fisika, Fakultas Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin; 2017.
- [13] Cicilia A, Suryono, Evi S. Penentuan nilai tebal paruh (HVL) pada citra digital computed radiography. *Youngster Physics Journal*. 2015;4:55–60.
- [14] Devi YH, Evi S, Choirul A. Evaluasi metode penentuan half value layer (HVL) menggunakan multi purpose detector (MPD) Barracuda pada pesawat sinar-X mobile. *Youngster Physics Journal*. 2014;3113–118.