

ISSN 1412-3258

PROSIDING

SEMINAR
KESELAMATAN
NUKLIR

SKN 2019

REGULASI DAN KESELAMATAN
NUKLIR MENYONGSONG
INDUSTRI 4.0



26 AGUSTUS 2019
GRAHA SANUSI HARDJADINATA
UNIVERSITAS PADJADJARAN-BANDUNG

SEMINAR KESELAMATAN NUKLIR 2019
TERSELENGGARA ATAS KERJASAMA
BAPETEN & UNPAD

P2STPIBN-BAPETEN
Jl. Gajah Mada No. 8
Jakarta

Fakultas Hukum UNPAD
Jl. Dipatiukur No. 35
Bandung

 @bapeten

 @universitaspadjaran

PROSIDING

SEMINAR
KESELAMATAN
NUKLIR

SKN 2019

REGULASI DAN KESELAMATAN
NUKLIR MENYONGSONG
INDUSTRI 4.0



26 AGUSTUS 2019
GRAHA SANUSI HARDJADINATA
UNIVERSITAS PADJADJARAN-BANDUNG

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI	I
KATA PENGANTAR	VII
SUSUNAN PANITIA SEMINAR KESELAMATAN NUKLIR 2019	VIII
PEMAKALAH	
PEMBELAJARAN KESELAMATAN TERHADAP OPERASI REAKTOR DARI KEJADIAN KEBOCORAN PADA TABUNG BERKAS NEUTRON DI REAKTOR RSG-GAS	
Jaja Sukmana, Rachmat Triharto dan Puspitasari Ramadania	1
SIMULASI PENGENDALIAN KRITIKALITAS DALAM RANGKA KAJIAN KONVERSI REAKTOR TRIGA PELAT BANDUNG MENGGUNAKAN SCALE	
Arif Isnaeni	10
ANALISIS KESELAMATAN IRADIASI THORIUM DI REAKTOR KARTINI	
Puradwi Ismu Wahyono dan Syarip	17
PERHITUNGAN PARAMETER NEUTRONIK REAKTOR TRIGA 2000 BANDUNG DENGAN SRAC2006	
Hidayati Amar	21
ANALISIS AKTIVITAS NUKLIDA HASIL <i>BURN UP</i> PADA FASILITAS <i>SUBCRITICAL ASSEMBLY FOR⁹⁹ MO PRODUCTION</i> (SAMOP) PSTA-BATAN MENGGUNAKAN <i>SOFTWARE</i> ORIGEN2	
Rahmat Riyadi, Suharyana, Fuad Anwar, Riyatun dan Soeparmi	29
ANALISIS NEUTRONIK KEMAMPUAN BATANG KENDALI AGINCD REAKTOR TRIGA BANDUNG DENGAN KELONGSONG BAHAN BAKAR BERBENTUK PELAT	
Anggita Andariska, Suharyana, Fuad Anwar, Riyatun dan Soeparmi	33
ANALISIS KECUKUPAN FILTER PADA PESAWAT SINAR-X MODEL SUPER 80 CP DALAM HUBUNGANNYA DENGAN <i>ENTRANCE SKIN EXPOSURE</i>	
Rini Indrati, Gatot M. Wibowo, Cokorda I. A. Widyastuti, Siti Daryati dan Sri Mulyati	37
IMPLIKASI <i>DECISION RULE</i> ISO/IEC 17025:2017 PADA SERTIFIKASI PESAWAT SINAR-X RADIOLOGI DIAGNOSTIK DAN INTERVENSIONAL	
Endang Kunarsih dan Haendra Subekti	47
ANALISIS TINGKAT REFERENSI DIAGNOSTIK UNTUK MODALITAS RADIOGRAFI UMUM DI INDONESIA	
Ida Bagus Gede Putra Pratama, Sudradjat dan Hermansyah	59
KAJIAN TREND PENGGUNAAN PESAWAT CT-SCAN CERETOM <i>MOBILE</i> DI MASA MENDATANG	
Sudradjat, Rusmanto dan Hermansyah	69
ANALISIS PERHITUNGAN PERISAI RADIASI PADA FASILITAS TERAPI RADIASI BERKAS PROTON (<i>PROTON BEAM RADIATION THERAPY</i>)	
Mukhlisin	78
JUSTIFIKASI PADA PENCITRAAN MANUSIA YANG DILAKUKAN BUKAN UNTUK TUJUAN MEDIK (<i>BODY SCANNER</i>)	
Intanung Syafitri dan Ardhiantoro Setyo Purnomo	86
KEWENANGAN PENGAWASAN BAPETEN DALAM PROSEDUR PENGANGKUTAN ZAT RADIOAKTIF	
Dhiana Puspitawati, Shinta Hadiyantina dan Nandaru Ramadhan	93
KAJIAN TERHADAP PENERAPAN UNDANG-UNDANG NOMOR 10 TAHUN 2014 TENTANG RATIFIKASI KONVENSI INTERNASIONAL PENANGGULANGAN TINDAKAN TERORISME NUKLIR	
Midiana Ariethia dan Reno Alamsyah	102

ANALISIS PASAL 9, PASAL 13, PASAL 23, DAN PASAL 34 UNDANG-UNDANG NOMOR 10 TAHUN 1997 TENTANG KETENAGANUKLIRAN TERHADAP UNDANG-UNDANG DASAR 1945

Donni Taufiq110

IMPLIKASI PERUBAHAN STANDAR *IAEA - SSR-6* TERHADAP PERATURAN PERUNDANG-UNDANGAN PENGANGKUTAN ZAT RADIOAKTIF DI INDONESIA

Nanang Triagung Edi Hermawan116

TINJAUAN ASPEK PERATURAN PERUNDANG-UNDANGAN IMPOR DAN PENGALIHAN PESAWAT SINAR-X UNTUK KEPERLUAN MEDIK

M. Rommy Ramadhan dan Sudradjat123

PENTINGNYA REVISI DAN PENGEMBANGAN TERHADAP PERATURAN KEPALA BAPETEN NOMOR 3 TAHUN 2008

Suci Prihastuti dan Mohamad Mamat127

DEVELOPMENT OF EXPERIMENT PROTOCOL FOR INTERNET REACTOR LABORATORY USING KARTINI RESEARCH REACTOR

Edi Sugianto, Taxwim, Tri N. H. Susanto, M. Subchan dan Umar S. Hidayat132

PERBANDINGAN ANTARA IAEA GSR *PART 2* DENGAN ISO 9001:2015 UNTUK PENERAPAN DI BIDANG KETENAGANUKLIRAN DI INDONESIA

Reno Alamsyah, Agus Waluyo, Arifin M. Susanto dan Farid Noor Jusuf138

PERTIMBANGAN ASPEK KEAMANAN PADA EVALUASI TAPAK INSTALASI NUKLIR

Rahmat Edhi Harianto, Icha Renisha Mulia dan Gede Ardana Mandala147

TINJAUAN INTEGRASI KONSEP *SAFETY INTEGRITY LEVEL* PADA OPSI 4 ANALISIS KESELAMATAN DETERMINISTIK

Farid Noor Jusuf153

KENDALI MUTU PENGUKURAN DOSIS TLD DI LABORATORIUM PEMANTAUAN DOSIS PERORANGAN PPIKSN - BATAN

Yanni Andriani, Muhammad Muhyidin Farid dan Ratih Kusuma Putri158

TINJAUAN ALIH PENGETAHUAN MELEKAT (*TACIT KNOWLEDGE*) DALAM RANGKA MELINDUNGI PENGETAHUAN KRITIS DI BAPETEN

Liya Astuti dan Supriatno164

TINJAUAN PENYUSUNAN PERATURAN BAPETEN TENTANG KLASIFIKASI KESELAMATAN STRUKTUR, SISTEM, DAN KOMPONEN INSTALASI NUKLIR NONREAKTOR

Catur Febriyanto S. dan Arifin M. Susanto171

ANALISIS EVAPORASI AIR TANGKI REAKTOR KARTINI

Diah Hidayanti Sukarno179

KAJIAN AWAL ANALISIS NEUTRONIK REAKTOR PRODUKSI ISOTOP *MOLLY* BERBASIS *THORIUM*

Bartolomeus Delphito dan Syarip185

URGENSI REVISI PERATURAN KEPALA BAPETEN NO.6 TAHUN 2008 TENTANG EVALUASI TAPAK REAKTOR DAYA UNTUK ASPEK KEJADIAN EKSTERNAL AKIBAT ULAH MANUSIA

Suci Prihastuti189

TANTANGAN DALAM PROSES PERIZINAN PLTN BERDASARKAN PERATURAN PEMERINTAH NOMOR 2 TAHUN 2014

Reno Alamsyah196

KAJIAN PENGEMBANGAN KEBIJAKAN PENGAWASAN KETENAGANUKLIRAN DALAM MENGHADAPI ERA INDUSTRI 4.0

Reno Alamsyah, Azizul Khakim dan Yudi Pramono205

TINJAUAN PENGATURAN NASIONAL TERKAIT PENAMBANGAN DAN PENGOLAHAN BAHAN GALIAN NUKLIR

Pandu Dewanto dan Agus Yudhi Pristianto	214
ANALISIS KESELAMATAN REAKTOR RSG-GAS SELAMA IRADIASI PIN TARGET 4,5%UO ₂ PADA <i>POWER RAMP TEST FACILITY</i> (PRTF)	
Octaviana Erawati Fadli, Azizul Khakim, Soeparmi, Suharyana dan Riyatun	220
KAJIAN PERATURAN PENGADAAN STRUKTUR, SISTEM DAN KOMPONEN (SSK) DALAM PEMBANGUNAN REAKTOR DAYA	
Arifin M. Susanto, Azizul Khakim, Nur Siwhan dan Agus Waluyo	226
FENOMENA <i>COUNTERFEIT, FRAUDULENT AND SUSPECT ITEM</i> (CFSI) DALAM KESELAMATAN PENGOPERASIAN REAKTOR DAYA	
Arifin Muhammad Susanto, Azizul Khakim, Nur Siwhan dan Agus Waluyo	233
INTEGRASI SISTEM SEIFGARD DAN SISTEM KEAMANAN BAHAN NUKLIR DI MBA RI-E	
Putra Oktavianto dan Susanto	240
ANALISIS KEKRITISAN PERTAMA HTR-10 DENGAN MENGGUNAKAN SCALE	
Agus Waluyo	246
PERHITUNGAN AKTIVITAS DAN PELURUHAN PANAS GAMMA PADA BAHAN BAKAR NUKLIR BEKAS DI RSG-GAS MENGGUNAKAN PROGRAM ORIGEN2	
F. Susanti, Azriani dan S.S. Retnoasih	253
DESAIN SISTEM MONITORING DAN PEREKAMAN DATA OPERASI REAKTOR RSG-GAS	
Heri Suherkiman dan Ranji Gusman	258
TINJAUAN AWAL PENENTUAN FAKTOR-FAKTOR YANG MEMPENGARUHI PRODUKTIVITAS KERJA INSPEKTUR INSTALASI DAN BAHAN NUKLIR	
Winda Sarmita, Rizal Palapa dan Arifin Muhammad Wibowo	268
REVIU SKALA KEPARAHAN EVALUASI TAPAK KEJADIAN EKSTERNAL AKIBAT ULAH MANUSIA PADA REVISI PERATURAN KEPALA BAPETEN	
Nur Siwhan dan Suci Prihastuti	274
TELAAH DOKUMEN IAEA DS 507 " <i>SEISMIC HAZARDS IN SITE EVALUATION FOR NUCLEAR INSTALLATIONS</i> " DAN KESESUAIANNYA DENGAN KONDISI DI INDONESIA	
Nur Siwhan dan Arifin M. Susanto	281
LAJU KOROSI <i>LINER</i> KOLAM KANAL HUBUNG INSTALASI PENYIMPANAN SEMENTARA BAHAN BAKAR NUKLIR BEKAS (KH-IPSB3)	
Kuat Heriyanto	288
KAJIAN SISTEM AKSES PERSONEL MENGGUNAKAN <i>SPEECH RECOGNITION</i> BERBASIS <i>WAVELET</i> PADA PENYIMPANAN BAHAN BAKAR SEGAR (KMP-A) DI RSG-GAS (MBA RI-C)	
Muhammad Alfarisie, Heri Suherkiman, Sunarko, Ariya wan Sunardi, Kawkab Mutofa, Sri Sundari R dan Rezky M	293
EVALUASI PELAKSANAAN MANAJEMEN PENUAAN INNRR	
Dedi Hermawan dan Agus Yudhi Pristianto	298
KAJIAN <i>SAFETY PERFORMANCE INDICATOR</i> UNTUK MENINGKATKAN KESELAMATAN DI FASILITAS INNRR	
Emy Triharjiyati	306
STUDI METODE PENENTUAN POTENSI SABOTASE DAN PERHITUNGAN KONSEKUENSI RADIOLOGI AKIBAT SABOTASE PADA INSTALASI NUKLIR	
Dwi Cahyadi	311

PENYELESAIAN PERMASALAHAN HUKUM AKIBAT WANPRESTASI PENYEDIA PADA PENGADAAN SISTEM KOMPUTASI KINERJA TINGGI DI BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR	
Dwi Cahyadi dan Dewi Prima Meiliasari	316
<i>LINEARITY ANALYSIS OF FISSION PRODUCT ACTIVITY CS-137 AS BURNUP INDICATOR FOR HTGR PEBBLE BED</i>	
Azizul Khakim	320
KINERJA PERHITUNGAN KRITIKALITAS MCNP6 PADA HPC	
Fibra Rhoma Firmanda	325
TINJAUAN DAN PENGEMBANGAN SERTIFIKASI PRODUK NUKLIR DI INDONESIA	
Ardiyani Eka Patriasari, Imron dan Widia Lastana Istanto	330
KETERLIBATAN PEMANGKU KEPENTINGAN DAN KOMUNIKASI DALAM PROGRAM PEMBANGUNAN PLTN	
Mohamad Mamat dan Bambang Eko Aryadi	336
KAJIAN ASPEK KELAYAKAN PETUGAS INSTALASI DAN BAHAN NUKLIR PURNABAKTI YANG DIPEKERJAKAN KEMBALI	
Dewi Prima Meiliasari dan Bambang Eko Aryadi	342
IMPLEMENTASI KETENTUAN MENGENAI PAPARAN KERJA DALAM PERKA BAPETEN NO. 17 TAHUN 2012 TERHADAP FASILITAS KEDOKTERAN NUKLIR DI INDONESIA	
Hesty Rimadianny dan Anry Amaldi Ridwan	350
KECEPATAN LAJU SEDIMENTASI BEBERAPA SUNGAI DI DAS CIUJUNG – LEBAK - BANTEN	
Nita Suhartini, Barokah Aliyanta dan Arief Adhari	354
PENGGUNAAN ISOTOP ALAM ²¹⁰ Pb UNTUK ESTIMASI LAJU EROSI/DEPOSISI DI SUB-DAS CIUJUNG HULU - LEBAK - BANTEN	
Nita Suhartini dan Barokah Aliyanta	363
USULAN BAGI PENERAPAN PROGRAM KESIAPSIAGAAN NUKLIR DI BIDANG PEMANFAATAN FASILITAS RADIASI DAN ZAT RADIOAKTIF (FRZR)	
Dewi Apriliani dan Idk Kerta Widana	371
USULAN BAGI PENERAPAN PROGRAM KESIAPSIAGAAN NUKLIR DI BIDANG PEMANFAATAN FASILITAS RADIASI DAN ZAT RADIOAKTIF (FRZR)	
Dewi Apriliani dan Idk Kerta Widana	380
<i>DETERMINATION OF DENSITY, LINEAR ATTENUATION COEFFICIENT, HVL AND TVL OF CONCRETE AND PARAFFIN FOR RADIATION SHIELDING OF CYCLOTRON DECY-13</i>	
Nazaroh, Eko Budi Jumpeno dan Iman Taufiq	388
KALIBRASI LUARAN BERKAS FOTON 6 DAN 10 MV TANPA <i>FLATTENING FILTER</i> PESAWAT PEMERCEPAT LINIER MEDIK ELEKTA VERSA HD DENGANMENGUNAKAN TRS NO. 483	
Assef Firnando F., Sri Inang S., Nurman R., Okky Agassy F. dan Yosi Sudarsi A	395
<i>PARTICIPATION OF SSDL JAKARTA IN THE 2018 IAEA/WHO TLD POSTAL DOSE QUALITY AUDIT FOR A COBALT-60 BEAMS</i>	
Assef Firnando Firmansyah	402
PENENTUAN KONTRIBUSI SUMBER SEDIMEN MELALUI PERUNUT GEOKIMIA DI SUB-SUB DAERAH ALIRAN SUNGAI (DAS) CISADANE HULU	
Barokah Aliyanta, Nita Suhartini dan Tommy Hutabarat	406
PERBANDINGAN EFEKTIFITAS PELATIHAN BAGI CALON PETUGAS PROTEKSI RADIASI BERDASARKAN PERBEDAAN JENIS BAHAN PEMBELAJARAN	
Indragini	414

KARAKTERISTIK KINERJA RESIN PENUKAR ION PADA *WATER TREATMENT SYSTEM* IRADIATOR GAMMA MERAH PUTIH

Arif Rachmanto dan Bimo Saputro419

INVESTIGATION OF INTERNAL PIPELINE CONDITION USING INDUSTRIAL GAMMA COMPUTED TOMOGRAPHY (CT) SYSTEM

Bayu Azmi, Wibisono and Firliyani R. Ningsih429

STUDI AWAL PENGARUH CURAH HUJAN TERHADAP PERUBAHAN LAJU DOSIS RADIASI GAMMA LINGKUNGAN DI KAWASAN NUKLIR SERPONG

Nurhadiansyah433

PENGUATAN JAMINAN PERLINDUNGAN PEKERJA RADIASI DI FASILITAS KESEHATAN MELALUI PENILAIAN DIRI ATAS EFEKTIVITAS OPTIMISASI PROTEKSI RADIASI PADA PAPARAN KERJA: SEBUAH TINJAUAN

Endang Kunarsih439

JUSTIFIKASI INTERVENSI *NATURALLY OCCURRING RADIOACTIVE MATERIAL* (NORM) DI KABUPATEN MAMUJU

Moekhamad Alfiyan449

EVALUASI KEKUATAN DAN KELEMAHAN PENERAPAN BUDAYA KESELAMATAN DI PUSAT TEKNOLOGI RADIOISOTOP DAN RADIOFARMAKA PERIODE 2013 – 2018

Ade Lili Hermana, Rr. Djarwanti Rahayu Ps, Fath Priyadi dan Didik Setiaji455

DISTRIBUSI DOSIS PEKERJA RADIASI DI BIDANG MEDIS YANG DIUKUR OLEH NUKLINDOLAB PADA TAHUN 2018

Arini Saadati, Firli Nadia Adhisti, Adinda Tisha Desviana dan Drs. H. Bunawas463

KESELAMATAN RADIASI DALAM PRODUKSI RADIOFARMAKA SM-153 EDTMP

Bisma Barron Patrianesha, Didik Setiaji dan Agung Supriyanto467

PENERAPAN PRINSIP JUSTIFIKASI PADA PEMERIKSAAN MAMOGRAFI DI INDONESIA

Laily Savitri dan Intanung Syafitri485

PENGEMBANGAN SISTEM PENGAWASAN DALAM PENGUATAN PERAN PETUGAS PROTEKSI RADIASI

Titik Kartika dan Iswandarini493

TINJAUAN PENGATURAN TERHADAP PENGEMBANGAN STRATEGI NASIONAL DALAM PENDIDIKAN DAN PELATIHAN PETUGAS PROTEKSI RADIASI

Hermawan Puji Yuwana503

TINJAUAN PENGATURAN TERHADAP PEMENUHAN PERSYARATAN TENAGA AHLI DALAM PEMANFAATAN TENAGA NUKLIR

Hermawan Puji Yuwana510

TINJAUAN PENGATURAN TERHADAP MANAJEMEN PENUAAN DALAM PENGGUNAAN BUNGKUSAN ZAT RADIOAKTIF

Hermawan Puji Yuwana518

TINJAUAN PERATURAN TERHADAP KETENTUAN PENGIRIMAN KEMBALI (RE-EKSPOR) SUMBER RADIOAKTIF TERBUNGKUS

Ardhiantoro Setya Purnomo dan Hermawan Puji Yuwana526

TEKNOLOGI BARU RADIOTERAPI PADA RENCANA REVISI PERATURAN KEPALA BAPETEN NO. 3 TAHUN 2013 TENTANG KESELAMATAN RADIASI DALAM PENGGUNAAN RADIOTERAPI

Sawiyah dan Soengeng Rahadhy532

KONSENTRASI RADIOAKTIVITAS ALAMIAH ²²⁶RA, ²³²TH DAN ⁴⁰K DALAM AIR HUJAN DI WILAYAH INDONESIA: STUDI PEMANTAUAN TAHUN 2017

Muji Wiyono, Wahyudi, Leli Nirwani, Ceiga Nuzulia S. dan Eka Suharguniyawan536

ANALISIS ASPEK KESELAMATAN TEKNIK <i>COLUMN SCANNING</i> BERDASARKAN SISTEM KOLIMASI DAN PERHITUNGAN DOSIS PADA PENGUKURAN KOLOM <i>STRIPPER CONDENSATE</i>	
Firliyani Rahmatia Ningsih, Wibisono dan Bayu Azmi	547
KAJIAN KESELAMATAN RADIASI PEMANFAATAN BETATRON SEA-7 UNTUK FASILITAS TERBUKA	
Sigit Purnomo, Werdi P. D. Beta, Praptana, Tasih Mulyono dan Sigit Suryantono	552
PERAN PELAKSANAAN INSPEKSI PRA-OPERASI PADA IRADIATOR KATEGORI II DAN IV	
Anet Hayani dan Hermawan Puji Yuwana	558
PENGEMBANGAN PETA PROSES BISNIS BAPETEN	
Satria Prahara	564
KAJIAN LAJU DOSIS RADIASI KOSMIK DI WILAYAH UDARA REPUBLIK INDONESIA	
I Made Ardana, Kristyo Rumboko dan Aris Sanyoto	574
TELAAH EKSISTENSI BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR DI MASYARAKAT LUAS	
Fery Putrawan Cusmanri, Ratna Sari Sudayat dan Muhammad F. S. Putra	584

KATA PENGANTAR

Dengan rahmat Allah yang Maha Kuasa, Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN) menyelenggarakan Seminar Keselamatan Nuklir pada tanggal 26 Agustus 2019 dalam rangkaian peringatan Hari Kebangkitan Teknologi Nasional (HAKTEKNAS) ke 24, dengan tema:

“Regulasi dan Keselamatan Nuklir Menyongsong Industri 4.0”

Tema ini berdekatan dengan tema HAKTEKNAS XXIV yaitu Iptek dan Inovasi dalam Industri Kreatif 4.0, dimana Industri Kreatif 4.0 perlu diperjuangkan dalam kerangka kemandirian dan daya saing bangsa.

Sesuai dengan tema, maka Seminar Keselamatan Nuklir ini diharapkan dapat menjadi forum pertemuan ilmiah antara pihak pengawas dengan pengguna, pakar dan masyarakat/publik melalui pertukaran informasi, pengetahuan, pengalaman dan pandangan untuk peningkatan keselamatan dan keamanan dalam pemanfaatan tenaga nuklir di Indonesia, terutama untuk menyongsong era industri 4.0. Keseimbangan peran otoritas, peran pakar, dan peran publik dalam diri insan- insan pengawas ketenaganukliran digelorakan antara lain dengan melibatkan lebih banyak aspek humanisme dalam lingkungan nuklir.

Pada tahun 2019 ini seminar ini terselenggara atas kerjasama antara BAPETEN dan Fakultas Hukum Universitas Padjadjaran Bandung dengan segala pertimbangan positifnya.

Pada seminar ini makalah yang masuk ke panitia sebanyak 122 buah. Setelah diadakan penilaian oleh tim editor penilai, diputuskan sebanyak 83 makalah dapat disajikan pada seminar, yang terdiri dari 24 makalah disampaikan pada sidang oral dan 59 makalah disajikan poster 4 (empat) pembicara kunci dari BAPETEN, IAEA, dan Universitas Padjadjaran, akan menyajikan materi yang sesuai dengan tema seminar ini.

Kami ucapkan terima kasih kepada para pejabat di lingkungan BAPETEN beserta UNPAD dan jajarannya, pembicara yang telah menyampaikan materi yang sangat bermanfaat, serta para pemakalah yang telah berpartisipasi dalam acara ini.

Di akhir kata, saya ucapkan terima kasih kepada seluruh panitia yang telah berupaya semaksimal mungkin untuk terselenggaranya acara ini serta berkomitmen untuk kesuksesan Seminar Keselamatan Nuklir 2019 ini. Kami sebagai panitia penyelenggara mohon maaf apabila terdapat kekurangan dalam pelaksanaan acara ini.

Wassalamuaalikum Wr. Wb

Jakarta, Agustus 2019

Dr. Ir. Yudi Pramono M.Eng.
Ketua Panitia

**SUSUNAN PANITIA SEMINAR KESELAMATAN NUKLIR 2019
BAPETEN – UNPAD**

1. Pengarah : Kepala BAPETEN
: Deputi Bidang Perizinan dan Inspeksi BAPETEN
: Sekretaris Utama BAPETEN
: Rektor UNPAD
2. Penanggung Jawab : Deputi Bidang Pengkajian Keselamatan Nuklir BAPETEN
: Dekan Fakultas Hukum UNPAD
3. Penyelenggara :
Ketua : Dr. Yudi Pramono - BAPETEN
Wakil ketua : Bintoro Aji, MT - BAPETEN
: R. Adi Nurzaman, MH - UNPAD
Sekretaris : Nur Siwhan, MT - BAPETEN
4. Penilai makalah :
Koordinator : Dahlia Sinaga MT - BAPETEN
Anggota : Dr. Ing. Sihana - UGM
: Prof. Abdul Waris - ITB
: Damianus T., Sony, M.Eng - BATAN
: Dr. Dadong Iskandar - BATAN
: Drs. Azhar, M.Sc - BAPETEN
: Dr. Azizul Khakim - BAPETEN
: Drs. Reno Alamsyah, M.Sc - BAPETEN
: Gusman C. Siswandi, S.H., LL.M., Ph.D - UNPAD
: Prita Amalia, S.H., M.H. - UNPAD

[Halaman ini Sengaja Dikosongkan]

KALIBRASI LUARAN BERKAS FOTON 6 DAN 10 MV TANPA *FLATTENING FILTER* PESAWAT PEMERCEPAT LINIER MEDIK ELEKTA VERSA HD DENGAN MENGGUNAKAN TRS No. 483

Assef Firnando F¹, Sri Inang S¹, Nurman R¹, Okky Agassy F¹, Yosi Sudarsi A²

¹Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi BATAN, Jakarta

²Departemen Radioterapi Rumah Sakit Mayapada, Jakarta

e-mail : firnando3154@gmail.com

ABSTRAK

Makalah ini menguraikan penentuan laju dosis serap air berkas foton 6 dan 10 MV tanpa *flattening filter*. Pesawat pemercepat linier medic yang digunakan adalah Elekta Versa HD no. seri 154719. Penelitian dilakukan di Rumah Sakit Mayapada Lebak Bulus Jakarta Selatan. Pengukuran persentase dosis di kedalaman dilakukan di dalam Blue Phantom (IBA Dosimetry GmbH) yang dilengkapi dengan perangkat lunak MyQC Accept untuk memindai berkas radiasi, sedangkan kalibrasi dilakukan menggunakan detektor ionisasi volume 0,6 cc tipe TW 30013 yang dihubungkan dengan elektrometer PTW Unidos Weblin tipe T 10022. Pengukuran kalibrasi dilakukan di dalam fantom 1 D Scanner pada jarak sumber radiasi ke permukaan air 100 cm, lapangan radiasi 10 cm x 10 cm dengan kedalaman detektor 10 cm. Perhitungan hasil pengukuran dilakukan menggunakan protokol dosimetri IAEA yang terdapat dalam International Atomic Energy Agency (IAEA) Technical Report Series (TRS) No. 483 dan IAEA TRS No. 398. Data menunjukkan adanya selisih perbedaan dari data sebelum dan sesudah kalibrasi. Nilai dosis pada kedalaman maksimum (D_{max}) untuk berkas foton 6 MV FF, 10 MV FF, 6 MV FFF, dan 10 MV FFF setelah dikalibrasi adalah 2002 mGy/200 MU, 2002,9 mGy/200 MU, 1998 mGy/200 MU dan 2002 mGy/200 MU. Nilai kualitas radiasi berkas foton ($TPR_{20/10}$) dan nilai koreksi kualitas berkas radiasi (K_Q) untuk 6 MV FF, 6 MV FFF, 10 MV dan 10 MV FFF didapatkan nilai tidak berbeda secara signifikan.

Kata kunci: Linac, Absorbed dose to water, IAEA TRS No. 398, IAEA TRS No. 483

ABSTRACT

This paper describes the determination of the absorbed dose to water for flattening filter free photon beams. The linier accelerator used is an Elekta Versa HD medical linear accelerator machine serial No. 154719. This research has been carried out at Mayapada Hospital, Lebak Bulus, South Jakarta. Measurement of the percentage depth dose has been carried out inside the Blue Phantom water tank (IBA Dosimetry GmbH) equipped with a OmniPro Accept versi 7.3 software to scan the beam, while output calibration measurement using a 0.6 cc ionization chamber type of TW 30013 connected to a PTW Unidos Weblin electrometer type of T 10022 inside a 1 D Scanner water phantom at depth of 10 cm with the source to the surface distance of 100 cm and a field size of 10 cm x 10 cm. Calculation of the measurement was based on the International Atomic Energy Agency (IAEA) publication in the Technical Report Series (TRS) No. 483 and IAEA TRS No. 398. Data shows the difference value on absorbed dose before and after calibration. The value of maximum dose (D_{max}) for 6 MV FF, 10 MV FF, 6 MV FFF, and 10 MV FFF after calibration were 2002 mGy/200 MU, 2002.9 mGy/200 MU, 1998 mGy/200 MU and 2002 mGy/200 MU. The value of photon beam quality ($TPR_{20/10}$) and value of photon beam quality correction (K_Q) for 6 MV FF, 6 MV FFF, 10 MV and 10 MV FFF obtained not significantly different.

Keywords: Linac, Absorbed dose to water, IAEA TRS No. 398, IAEA TRS No. 483

PENDAHULUAN

Penggunaan berkas foton tanpa *flattening filter* [*flattening filter free* (FFF)] pertama kali diteliti oleh O' Brien dan kawan-kawan pada pesawat pemercepat linier medik Therac – 6 [1]. Tantangan dan tujuan dari penelitian tentang penyinaran dengan pesawat mode FFF adalah untuk mendapatkan laju dosis yang tinggi untuk mengurangi waktu penyinaran khususnya pada teknik stereotaktik *intracranial* [2]. Beberapa penelitian mengenai karakteristik dosimetri berkas foton tanpa *flattening filter* (FFF) dibandingkan dengan berkas foton yang menggunakan *flattening filter* (FF) telah dilakukan. Salah satunya adalah mengenai karakteristik dosimetri. Karakteristik dosimetri tersebut antara lain persentase dosis di kedalaman, profil, faktor keluaran, laju dosis dan lain-lain [3].

Salah satu bahasan dari beberapa referensi tersebut di atas adalah rasio laju dosis berkas foton FFF terhadap FF pada suatu kedalaman setelah dilakukan kalibrasi. Nilai rasio tersebut berbeda dari satu pesawat dengan pesawat yang lain bergantung pada merek dan model. Saat ini pesawat pemercepat linier medik moderen dilengkapi juga dengan berkas foton tanpa *flattening filter*. Pesawat pemercepat linier medik Varian Trilogy dilengkapi dengan berkas foton 6 MV FFF, sementara itu Pesawat Elekta Versa HD dilengkapi dengan berkas foton 6 MV FFF dan 10 MV FFF [4]. Nurman dkk telah melakukan penelitian pada pesawat pemercepat linier medik tanpa flattening filter (FFF) milik rumah sakit Pasar Minggu[5]. Pada makalah tersebut disebutkan pesawat yang digunakan adalah pesawat pemercepat linier medik dengan merek Varian Trilogy.

Pada akhir tahun 2017 IAEA memublikasi Technical Report Series No. 483 dengan judul : *Dosimetry of Small Static Fields Used in External Beam Radiotherapy, An International Code of Practice for Reference and Relative Dose Determination*. Salah satu aspek yang dibahas dalam publikasi ini adalah berkas foton tanpa *flattening filter*.

Untuk menentukan laju dosis serap air berkas foton tanpa *flattening filter*, protokol dosimetri IAEA yang terdapat dalam Technical Report Serie no. 398 tidak dapat digunakan karena protokol tersebut hanya untuk berkas foton menggunakan *flattening filter*. Kondisi terkini, di Indonesia baru terdapat 4 buah pesawat pemercepat linier medik dengan ditur penyinaran tanpa *flattening filter*. Maka diperlukan adanya penelitian untuk menentukan laju dosis serap air menggunakan protokol IAEA TRS 483 tersebut.

Makalah ini menguraikan penentuan laju dosis serap air berkas foton 6 dan 10 MV dengan dan tanpa *flattening filter* yang dipancarkan dari pesawat pemercepat linier medik Elekta Versa HD yang dilakukan di Rumah Sakit Mayapada, Lebak Bulus, Jakarta. Penentuan laju dosis serap air dilakukan dengan menggunakan protokol terbaru dari IAEA TRS 483 *Dosimetry of Small Static Fields Used in External Beam Radiotherapy*.

LANDASAN TEORI

Penentuan Kualitas Radiasi Berkas Foton

Untuk penentuan kualitas radiasi berkas foton menggunakan *flattening filter* (FF) dicantumkan di publikasi IAEA dalam *Technical Report Series* No. 398 [6], sedangkan untuk berkas radiasi tanpa menggunakan *flattening filter* (FFF) dicantumkan dalam IAEA *Technical Report Series* No. 483 [7]. Metoda untuk penentuan kualitas berkas foton didasarkan pada rasio dosis pada kedalaman 20 cm dan 10 cm. Selanjutnya dengan menggunakan suatu persamaan akan diperoleh kualitas radiasi berkas foton yang dinyatakan dalam *Tissue Phantom Ratio* ($TPR_{20/10}$).

$$TPR_{20/10} = 1,2661 \cdot PDD_{20/10}^{-0,0959} \quad (1)$$

dengan :

$TPR_{20/10}$: *Tissue Phantom Ratio* (kualitas berkas radiasi) pada $PDD_{20/10}$

$PDD_{20/10}$: Perbandingan bacaan dosimeter terkoreksi temperatur, tekanan dan rekombinasi ion dan polaritas pada kedalaman 100 mm dan 200 mm.

Penentuan Dosis Serap Air ($D_{w,Q}$)

Dosis serap air berkas foton tanpa *flattening filter* dari sebuah pesawat pemercepat linier medik pada titik acuan pengukuran dapat ditentukan dengan persamaan berikut [7]:

$$D_{w,Q} = M_Q \cdot N_{D,W} \cdot k_{Q_{msr}}^{f_{msr}-f_{msr}} \quad (2)$$

dengan :

$D_{w,Q}$: Dosis serap pada titik pengukuran acuan

M_Q : Bacaan dosimeter terkoreksi temperatur, tekanan dan rekombinasi ion dan polaritas

$N_{D,W}$: Faktor kalibrasi dosimeter dalam besaran dosis serap air

$k_{Q_{msr}}^{f_{msr}-f_{msr}}$: Faktor koreksi kualitas radiasi dari detektor yang digunakan.

METODE

Sebagai sumber radiasi digunakan pesawat pemercepat linier medik Elekta Versa HD no. seri 154719. Pesawat ini dapat memancarkan berkas elektron dengan energi nominal 4, 6, 9, 12, 15, 18 MeV dan berkas foton 6 dan 10 MV menggunakan *flattening filter* (FF) dan 6 MV tanpa *flattening filter* (FFF) [4].

Sebagai alat ukur radiasi untuk pengukuran persentase dosis di kedalaman berkas foton digunakan detektor ionisasi volume 0,13 cc tipe CC 13 dan detektor semi konduktor Razor. Pengukuran dilakukan di dalam fantom air Blue Phantom water tank buatan IBA Dosimetry GmbH berukuran 48 cm x 48 cm x 48 cm yang dilengkapi perangkat lunak OmniPro Accept versi 7.3 untuk pemindaian data [8].

Untuk pengukuran kualitas radiasi dan keluaran berkas foton digunakan detektor volume 0,6 cc tipe TW 30013 yang dirangkai dengan elektrometer PTW Weblin tipe T 10022. Pengukuran dilakukan di dalam fantom air 1 D Scanner berukuran 30 cm x 30 cm x 30 cm buatan Sun Nuclear.

Pengukuran Persentase Dosis di Kedalaman Berkas Foton

Pengukuran persentase dosis di kedalaman berkas foton 6 MV dilakukan menggunakan *flattening filter* dan tanpa *flattening filter*. Pengukuran dilakukan di dalam fantom air Blue Phantom IBA pada kondisi acuan dengan jarak sumber radiasi ke permukaan 100 cm dan lapangan radiasi 10 cm x 10 cm menggunakan detektor ionisasi volume 0,13 cc tipe CC 13. Pengukuran yang sama dilakukan untuk berkas foton 10 MV FF dan 10 MV FFF.

Kualitas Radiasi Berkas Foton

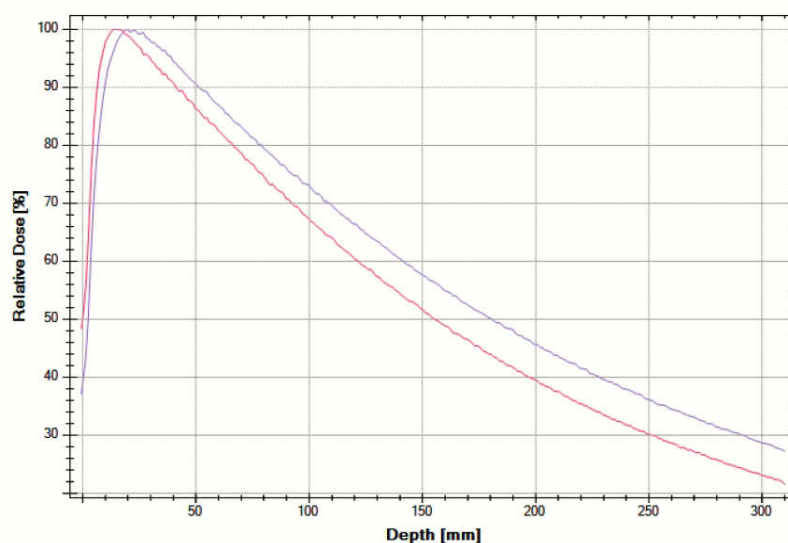
Pengukuran ionisasi berkas radiasi foton 6 MV dengan dan tanpa *flattening filter* pada kedalaman 10 cm dan 20 cm pada kondisi acuan menggunakan detektor volume 0,6 cc tipe TW 30013 yang dirangkai dengan elektrometer PTW Weblin tipe T 10022. Dari pengukuran ini akan diperoleh kualitas radiasi berkas foton yang dinyatakan dalam nilai $TPR_{20/10}$. Dengan diperoleh nilai $TPR_{20/10}$ akan diperoleh faktor koreksi kualitas radiasi (K_Q) untuk faktor kalibrasi detektor yang digunakan dalam pengukuran.

Faktor koreksi kualitas radiasi (K_Q) disesuaikan dengan detektor yang sedang dipakai untuk melakukan pengukuran. Faktor koreksi kualitas radiasi untuk berkas foton FF dapat dilihat pada tabel K_Q di TRS No. 398, sedangkan untuk berkas foton FFF dapat dilihat pada tabel K_Q TRS No. 483 : untuk berkas FFF

Pengukuran Keluaran Berkas Foton

Faktor koreksi dihitung untuk perhitungan laju dosis serap air berkas foton 6 MV dengan dan tanpa *flattening filter* seperti faktor koreksi rekombinasi dan polaritas. Pengukuran dilakukan menggunakan detektor ionisasi volume 0,6 cc tipe PTW TW 30013 no. seri 6367 yang dirangkai dengan elektrometer elektrometer PTW Weblin tipe T 10022. Detektor diletakkan pada kondisi acuan dengan kedalaman 10 cm, jarak sumber radiasi ke permukaan fantom 100 cm dan lapangan radiasi pada permukaan fantom 10 cm x 10 cm.

Pengukuran keluaran berkas foton dilakukan pada kondisi acuan, temperatur dan tekanan udara selama pengukuran diamati.



Gambar 9. Persentase dosis di kedalaman berkas foton 6 MV FF dan 10 MV FF pada jarak sumber radiasi 100 cm dan lapangan radiasi 10 cm x 10 cm. Keterangan : warna merah muda (6 MV FF) dan warna ungu (10 MV FF).

Dari gambar presentase dosis di kedalaman berkas foton 6 MV FF dan 10 MV FF tersebut diketahui berkas foton 6 MV memperoleh nilai dosis 67,25 % pada kedalaman 100 mm (D_{10}) relatif yang lebih rendah dari pada berkas foton 10 MV yang mendapatkan nilai 73,01 %. Hal tersebut dapat dilihat juga pada kedalaman maksimum (d_{max}) yang didapatkan. Berkas foton 6 MV FF mendapatkan kedalaman maksimum 14,7 mm, sedangkan berkas foton 10 MV mendapatkan kedalaman maksimum 19,4 mm. Berkas foton 10 MV FF memiliki energi penyinaran yang lebih besar dari pada berkas foton 6 MV.

Dari tabel 1 dapat diketahui perbandingan parameter dosimetri antara berkas foton FF dan FFF pada energi penyinaran 6 MV dan 10 MV. Untuk berkas foton 6 MV FFF mendapatkan nilai 67,12 % pada kedalaman 100 mm (D_{10}), sedangkan berkas foton 10 MV FFF mendapatkan nilai 72,66 %. Pada berkas foton 6 MV didapatkan perbedaan 0,2% antara 6 MV FF dan 6 MV FFF. Sedangkan pada 10 MV didapatkan perbedaan 0,5% antara 10 MV FF dan 10 MV FFF.

Tabel 9. Perbandingan Hasil Pengukuran pada berkas foton 6 MV FFF dan 10 MV FFF

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berkas Foton 6 MV FF dan 6 MV FFF

Hasil pengukuran persentase dosis di kedalaman berkas foton 6 dan 10 MV pesawat Elekta Versa HD no. seri 154719 dengan *flattening filter* (6 MV FF) dapat dilihat pada Gambar 1. Dari kurva tersebut diperoleh parameter dosimetrisnya seperti PDD_{10} , PDD_{20} , R_{100} dan kualitas radiasinya yang ditunjukkan pada Tabel 2, demikian juga dengan berkas foton 6 dan 10 MV FFF yang parameter dosimetrisnya ditunjukkan pada tabel yang sama.

Berkas Foton	D_{10} (%)	D_{20} (%)	Q (%)
6 MV FF	67,25	39,56	0,685
6 MV FFF	67,12	39,38	0,674
10 MV FF	73,01	45,63	0,732
10 MV FFF	72,66	45,00	0,722

Hasil penentuan kualitas radiasi berkas foton 6 MV FF, 6 MV FFF, 10 MV FF dan 10 MV FFF dalam parameter $TPR_{20/10}$ dapat dilihat pada Tabel 2 dibawah ini.

Tabel 10. Hasil penentuan kualitas radiasi berkas foton

Berka s Foton	D_{10} (nC)	D_{20} (nC)	$D_{20/10}$	$TPR_{20/10}$	K_Q
6 MV FF	23,8	13,8	0,58	0,678	0,990
6 MV FFF	0	6	2	0,674	3
10 MV FF	28,4	16,4	0,57	0,736	0,992
10 MV FFF	1	5	9		2
6 MV FF	25,1	15,8	0,62	0,736	0,980
6 MV FFF	9	3	9		7
10 MV FF	30,1	18,5	0,61	0,722	0,984
10 MV FFF	3	9	7		6

Hasil penentuan kualitas radiasi berkas foton paling tinggi didapatkan oleh berkas foton 10 MV FF dengan nilai $TPR_{20/10}$ sebesar 0,736. Sedangkan kualitas radiasi berkas foton paling rendah didapatkan oleh berkas foton 6 MV FFF dengan nilai $TPR_{20/10}$ sebesar 0,674.

Hasil penentuan dosis serap air berkas foton 6 MV FF dan 6 MV FFF pesawat permercepat linier medik Elekta Versa HD no. seri 154719 pada jarak sumber radiasi ke permukaan air 100 cm, lapangan radiasi 10 cm x 10 cm dan kedalaman detektor 10 cm sebelum dan sesudah kalibrasi dapat dilihat pada Tabel 3 dan Tabel 4 di bawah.

Pada berkas foton 6 MV FFF didapatkan bacaan (M_Q) sebelum kalibrasi sebesar 23,849 nC/200 MU. Perhitungan laju dosis serap air menggunakan faktor koreksi K_Q sebesar 0,9903 sesuai dengan dengan nilai $TPR_{20/10}$ yang diperoleh, sebesar 0,678. Setelah kalibrasi dan dilakukan penyesuaian terhadap pesawat, didapatkan bacaan (M_Q) 25,088 nC/200 MU. Keluaran berkas foton sebelum kalibrasi pada D_{max} mendapatkan nilai 1898 mGy/200 MU yang berarti -5 % lebih kecil dari 1 cGy = 1 MU. Setelah dilakukan kalibrasi maka diperoleh keluaran dengan nilai 2002

mGy/200 MU yang mendapatkan 0,01 % terhadap 1 cGy = 1 MU.

Pada berkas foton 6 MV FFF didapatkan bacaan (M_Q) sebelum kalibrasi sebesar 28,557 nC/200 MU. Perhitungan laju dosis serap air menggunakan faktor koreksi K_Q sebesar 0,9922 sesuai dengan dengan nilai $TPR_{20/10}$ yang diperoleh, sebesar 0,674. Setelah kalibrasi dan dilakukan penyesuaian terhadap pesawat, didapatkan bacaan (M_Q) 24,882 nC/200 MU. Dari Tabel 4 dapat dilihat bahwa untuk berkas 6 MV FFF sebelum kalibrasi, keluaran berkas foton 6 MV FFF mendapatkan nilai 2281 mGy/200 MU yang berarti lebih tinggi sebesar 14% terhadap 1 cGy = 1 MU. Setelah dilakukan kalibrasi maka diperoleh nilai 1998 mGy/200 MU yang berarti lebih rendah 0,1% terhadap 1 cGy = 1 MU.

Dapat dilihat bahwa perolehan nilai dosis maksimum (D_{max}) sebelum dikalibrasi antara berkas foton 6 MV FF dan 6 MV FFF memiliki perbedaan. Perolehan D_{max} sebelum dikalibrasi pada berkas foton 6 MV FF terlihat lebih rendah dari pada D_{max} setelah dikalibrasi. Sedangkan pada berkas foton 6 MV FFF didapatkan D_{max} jauh lebih tinggi dibandingkan dengan D_{max} setelah kalibrasi.

Tabel 11. Luaran berkas foton 6 MV FF pesawat permercepat linier medik Elekta Versa HD seri 154719

Elekta Versa HD seri 154719	Dose rate (nA)	M_Q (nC/200MU)	$N_{D,W}$ (mGy/nC)	K_Q	D_{10} (mGy/200 MU)	$PDD_{10\%}$	D_{max} (mGy/200 MU)
Sebelum kalibrasi	1,077	23,849	54,04	0,9903	1276,3	67,25	1898
Sesudah Kalibrasi	1,135	25,088	54,04	0,9903	1345,2	67,25	2002

*Ketidakpastian terentang (*expanded uncertainty* $\pm 2,17\%$) untuk tingkat kepercayaan 95% [9][10]

Tabel 12. Luaran berkas foton 6 MV FFF pesawat permercepat linier medik Elekta Versa HD seri 154719

Elekta Versa HD seri 154719	Dose rate (nA)	M_Q (nC/200MU)	$N_{D,W}$ (mGy/nC)	K_Q	D_{10} (mGy/200 MU)	$PDD_{10\%}$	D_{max} (mGy/200 MU)
Sebelum kalibrasi	3,480	28,557	54,04	0,9922	1531,2	67,12	2281
Sesudah Kalibrasi	3,503	24,882	54,04	0,9922	1341,2	67,12	1998

*Ketidakpastian terentang (*expanded uncertainty* $\pm 2,17\%$) untuk tingkat kepercayaan 95% [9][10]

Berkas Foton 10 MV FF dan 10 MV FFF

Hasil penentuan kualitas radiasi berkas foton 10 MV FF dan 10 MV FFF dalam parameter $TPR_{20/10}$ dapat dilihat pada Tabel 5 dan Tabel 6.

Pada berkas foton 10 MV FF didapatkan bacaan (M_Q) sebelum kalibrasi sebesar 25,19 nC/200 MU. Perhitungan laju dosis serap air menggunakan faktor koreksi K_Q sebesar 0,9807 sesuai dengan dengan nilai $TPR_{20/10}$ yang diperoleh, sebesar 0,736. Setelah kalibrasi dan dilakukan penyesuaian terhadap pesawat, didapatkan bacaan (M_Q) 27,74 nC/200 MU

Dari tabel 5 dapat dilihat bahwa sebelum kalibrasi, keluaran berkas foton 10 MV FF mendapatkan nilai pada D_{max} 1836 mGy/200 MU yang berarti 8,2% lebih kecil dari 1 cGy = 1 MU. Setelah dilakukan kalibrasi maka diperoleh keluaran dengan nilai 2002,9 mGy/200 MU yang mendapatkan nilai selisih 0,1% lebih besar terhadap 1 cGy = 1 MU.

Pada berkas foton 10 MV FFF didapatkan bacaan (M_Q) sebelum kalibrasi sebesar 30,13 nC/200 MU. Perhitungan laju dosis serap air menggunakan faktor koreksi K_Q sebesar 0,9846 sesuai dengan dengan nilai

TPR_{20/10} yang diperoleh, sebesar 0.722. Setelah kalibrasi dan dilakukan penyesuaian terhadap pesawat, didapatkan bacaan (M_Q) 27,07 nC/200 MU. Dapat dilihat bahwa perolehan nilai dosis maksimum (D_{max}) sebelum dikalibrasi antara berkas foton 10 MV FF dan 10 MV FFF memiliki perbedaan. Perolehan

D_{max} sebelum dikalibrasi pada berkas foton 10 MV FF terlihat lebih rendah dari pada D_{max} setelah dikalibrasi. Sedangkan pada berkas foton 10 MV FFF didapatkan D_{max} jauh lebih tinggi dibandingkan dengan D_{max} setelah kalibrasi.

Tabel 13. Luaran berkas foton 10 MV FF pesawat permercepat linier medik Elekta Versa HD seri 154719.

Elekta Versa HD seri 154719	Dose rate (nA)	M_Q (nC/200MU)	$N_{D,w}$ (mGy/nC)	K_Q	D_{10} (mGy/200 MU)	PDD _{10%}	D_{max} (mGy/200 MU)
Sebelum kalibrasi	1,225	25,19	54,04	0.9807	1340,5	73,01	1836
Sesudah Kalibrasi	1,336	27,74	54,04	0.9807	1462,3	73,01	2002,9

*Ketidakpastian terentang (expanded uncertainty $\pm 2,17\%$) untuk tingkat kepercayaan 95% [9][10]

Tabel 14. Luaran berkas foton 10 MV FFF pesawat permercepat linier medik Elekta Versa HD seri 154719

Elekta Versa HD seri 154719	Dose rate (nA)	M_Q (nC/200MU)	$N_{D,w}$ (mGy/nC)	K_Q	D_{10} (mGy/200 MU)	PDD _{10%}	D_{max} (mGy/200 MU)
Sebelum kalibrasi	6,116	30,13	54,04	0.9846	1618,7	72,66	2228
Sesudah Kalibrasi	5,495	27,07	54,04	0.9846	1454,5	72,66	2002

*Ketidakpastian terentang (expanded uncertainty $\pm 2,17\%$) untuk tingkat kepercayaan 95 % [9][10]

Dari tabel di atas dapat dilihat bahwa untuk berkas 10 MV FFF sebelum kalibrasi, keluaran berkas foton 10 MV FFF mendapatkan nilai pada D_{max} 2228 mGy/200 MU yang berarti terlalu tinggi sebesar 11%. Setelah dilakukan kalibrasi maka diperoleh nilai 2002 mGy/200 MU yang berarti 0,1% terhadap 1 cGy =1 MU.

PEMBAHASAN

Penggunaan protokol TRS NO. 483 sebagai protokol untuk pengukuran dosis serap air pada lapangan kecil telah dilakukan. Untuk berkas FFF nilai K_Q dari protokol TRS NO. 483 telah diterapkan dan disesuaikan dengan nilai kualitas berkas radiasi (TPR_{20/10}) nilai K_Q yang didapatkan pada Tabel 2.

Nilai K_Q yang didapatkan oleh berkas foton FFF cenderung lebih rendah persentasenya dibandingkan dengan nilai K_Q berkas foton FF, baik pada pengukuran pada kedalaman 100 mm (D_{10}) dan kedalaman 200 mm (D_{20}). Perolehan nilai tersebut diakibatkan karena pada berkas foton FFF terdapat kontaminasi elektron dan banyak komponen energi rendah dari berkas foton yang sampai di permukaan dan terakumulasi oleh detektor[11].

Deviasi dari K_Q berkas foton 6 MV dan 6 MV FFF adalah sebesar -0,2%, sedangkan deviasi nilai K_Q antara berkas foton 10 MV FF dan 10 MV FFF adalah sebesar -0,4%. Deviasi didapatkan tidak signifikan berbeda, namun penggunaan K_Q harus tetap disesuaikan dengan berkas foton yang digunakan. Berkas foton FF menggunakan protokol TRS NO. 398 dan berkas foton FFF menggunakan protokol TRS NO. 483.

Berkas foton 6 MV FF mendapatkan nilai PDD_{10%} sebesar 67,25% sedangkan berkas foton 6 MV FFF

mendapatkan nilai sebesar 67,12%. Hal tersebut menunjukkan bahwa berkas foton 6 MV FFF lebih besar 3,1 kali dari pada berkas foton 6 MV FF. Dibandingkan dengan berkas foton 6 MV FFF pesawat Varian Trilogi yang mendapatkan 2,14 kali, hasil ini jauh lebih besar. Demikian juga studi terhadap pesawat Varian Clinac 600 menggunakan perhitungan Monte Carlo yang mendapatkan kelipatan 2,31 terhadap 6 MV FF [11]

Sedangkan untuk berkas foton 10 MV dan 10 MC FFF (Tabel 5 dan 6) dapat dilihat bahwa laju dosis serap air pada kedalaman 10 cm menunjukkan bahwa berkas foton 10 MV FFF 4,1 kali lebih besar dari pada berkas foton 10 MV FF. Hasil ini lebih kecil dari studi yang dilakukan oleh Ankit Kajaria dkk pada pesawat permercepat linier medik Varian Clinac 600 yang mendapatkan 2,40 [11].

KESIMPULAN

Kalibrasi pesawat permercepat medik Versa HD dengan menggunakan IAEA TRS 483 dan IAEA TRS 398 telah dilakukan. Penggunaan faktor koreksi berkas radiasi (K_Q) untuk berkas foton FFF juga telah dievaluasi. Data menunjukkan adanya selisih perbedaan dari data sebelum dan sesudah kalibrasi. Nilai dosis pada kedalaman maksimum (D_{max}) untuk berkas foton 6 MV FF, 10 MV FF, 6 MV FFF, dan 10 MV FFF setelah dikalibrasi adalah 2002 mGy/200 MU, 2002,9 mGy/200 MU, 1998 mGy/200 MU dan 2002 mGy/200 MU.

Kualitas radiasi berkas foton 6 MV FF, 6 MV FFF, 10 MV dan 10 MV FFF yang diperoleh tidak berbeda secara signifikan. TPR_{20/10} dari berkas foton FFF cenderung lebih rendah dari pada berkas foton FF. Bergantung pada nilai TPR_{20/10} yang didapat, dapat

dilihat selisih nilai K_Q berkas foton 6 MV dan 6 MV FFF adalah sebesar -0,2%, sedangkan deviasi nilai K_Q antara berkas foton 10 MV FF dan 10 MV FFF adalah sebesar -0,4%. Selisih nilai K_Q yang didapatkan juga tidak signifikan berbeda antara berkas foton 6 MV FF, 6MV FFF, 10 MV FF dan 10 MV FFF.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada staf Unit Radioterapi Rumah Sakit Mayapada, Lebak Bulus, Jakarta atas bantuannya untuk menggunakan fasilitas pesawat pemercepat linier medik Versa HD no. seri 154719 sehingga penulisan ini dapat terlaksana.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. F. O. Brien, et.al (1990) Radiosurgery with unflattened 6MV photon beams. *Med. Phys.*, vol. 18, no. 3, p. 519.
- [2] N. M. Antonio, et.al, (2013) Intracranial Stereotactic Radiosurgery Concepts and Techniques. *Neurosurg. Clin. NA*, vol. 24, no. 4, pp. 491–498.
- [3] F. Firmansyah et al. (2017) Karakteristik Berkas Radiasi Foton 6 MV dan 10 MV Tanpa Flattening Filter dari Pesawat Pemercepat Linier Medik Versa HD. *Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir (PSTA BATAN)*. pp. 245–250.
- [4] N. Papanikolaou and S. Stathakis. (2016) “Commissioning an Elekta Versa HD linear accelerator,” *J. Appl. Clin. Med. Phys.*, vol. 17, no. 1, pp. 179–191.
- [5] F. Firmansyah, I. Sunaryati, N. Rajagukguk, and D. Ryangga. (2018) Karakteristik Berkas Foton 6 MV Tanpa Flattening Filter Pesawat Pemercepat Linier Medik Varian Trilogy. *Pertemuan Ilmiah Tahunan Fisika Medis dan Biofisika*, vol.2, No.1, pp. 222–226.
- [6] International Atomic Energy Agency (2004) Technical Report Series (TRS) 398: Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy: An International Code of Practice for Dosimetry based on Standards of Absorbed Dose to Water. IAEA. Austria.
- [7] International Atomic Energy Agency (2017) Technical Report Series (TRS) 483: Dosimetry of Small Static Fields Used in External Beam Radiotherapy : An Code of Practice for reference and Relative Dose Determination. IAEA. Austria.
- [8] W. Masanga, P. Tangboonduangjit, C. Khamfongkhruca, and C. Tannanonta, (2016) Determination of small field output factors in 6 and 10 MV flattening filter free photon beams using various detectors. *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 694, no. 1.
- [9] JCGM100:2008. (2008) Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement. *Int. Organ. Stand. Geneva ISBN*, vol. 50, no. 1, p. 134.
- [10] International Atomic Energy Agency (2008) IAEA TEC DOC 1585 Measurement Uncertainty : A Practical Guide for Secondary Standards Dosimetry Laboratories.
- [11] Kajaria, N. Sharma, and S. Sharma, (2016) Study of the Dosimetric Properties of an Unflattened 6-MV Photon Beam By Using the BEAMnrc Code vol. 69, no. 4.
- [12] P. F. O. Brien, B. A. Gillies, M. Schwartz, C. Young, and P. Davey, “Radiosurgery with unflattened 6MV photon beams,” *Med. Phys.*, vol. 18, no. 3, p. 519, 1990.
- [13] N. M. Antonio A.F. De Salles, Alessandra A. Gorgulho, Julio L.B. Pereira, MD, “Intracranial Stereotactic Radiosurgery Concepts and Techniques,” *Neurosurg. Clin. NA*, vol. 24, no. 4, pp. 491–498, 2013.
- [14] A. F. Firmansyah *et al.*, “Karakteristik Berkas Radiasi Foton 6 MV dan 10 MV Tanpa Flattening Filter dari Pesawat Pemercepat Linier Medik Versa HD,” in *Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir (PSTA BATAN)*, 2017, no. November, pp. 245–250.
- [15] N. Papanikolaou and S. Stathakis, “Commissioning an Elekta Versa HD linear accelerator,” *J. Appl. Clin. Med. Phys.*, vol. 17, no. 1, pp. 179–191, 2016.
- [16] A. F. Firmansyah, I. Sunaryati, N. Rajagukguk, and D. Ryangga, “Karakteristik Berkas Foton 6 MV Tanpa Flattening Filter Pesawat Pemercepat Linier Medik Varian Trilogy,” in *Pertemuan Ilmiah Tahunan Fisika Medis dan Biofisika*, 2018, pp. 222–226.
- [17] P. Andreo *et al.*, “Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy: An International Code of Practice for Dosimetry based on Standards of Absorbed Dose to Water,” 2004.
- [18] International Atomic Energy Agency, “Dosimetry of Small Static Fields Used in External Beam Radiotherapy : An Code of Practice for reference and Relative Dose Determination,” 2017.
- [19] W. Masanga, P. Tangboonduangjit, C. Khamfongkhruca, and C. Tannanonta, “Determination of small field output factors in 6 and 10 MV flattening filter free photon beams using various detectors,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 694, no. 1, 2016.
- [20] JCGM100:2008, “Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement,” *Int. Organ. Stand. Geneva ISBN*, vol. 50, no. 1, p. 134, 2008.
- [21] International Atomic Energy Agency, “IAEA TEC DOC 1585 Measurement Uncertainty :

A Practical Guide for Secondary Standards
Dosimetry Laboratories,” 2008.
[22] A. Kajaria, N. Sharma, and S. Sharma,

“Study of the Dosimetric Properties of an
Unflattened 6-MV Photon Beam By Using
the BEAMnrc Code,” vol. 69, no. 4, 2016.