

KAJIAN LAJU DOSIS RADIASI KOSMIK DI WILAYAH UDARA REPUBLIK INDONESIA

I Made Ardana, Kristyo Rumboko, Aris Sanyoto

Direktorat Pengaturan Pengawasan Fasilitas Radiasi dan Zat Radioaktif

Badan Pengawas Tenaga Nuklir

e-mail: i.madeardana@bapeten.go.id

ABSTRAK

Permintaan perjalanan udara, domestik dan internasional, di wilayah udara Republik Indonesia semakin meningkat. Meningkatnya perjalanan udara berpotensi meningkatkan paparan dosis radiasi bagi awak kabin. Salah satu sumber radiasi alam yang memberikan dosis radiasi tinggi bagi awak kabin adalah radiasi kosmik. Untuk itu, telah dilakukan kajian laju dosis radiasi kosmik di wilayah udara Republik Indonesia. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik laju dosis radiasi kosmik di sekitar ketinggian area penerbangan domestik wilayah udara Republik Indonesia dengan cara metode simulasi menggunakan program EXPACS. Hasil penelitian menunjukkan bahwa laju dosis radiasi kosmik di area ketinggian penerbangan domestik wilayah udara Republik Indonesia melebihi Nilai Batas Dosis (NBD) radiasi tahunan untuk masyarakat umum ($> 1 \text{ mSv}$). Laju dosis radiasi kosmik disekitar daerah 5° LU memiliki nilai paling rendah. Nilai laju dosis radiasi kosmik ini akan bertambah seiring dengan perubahan garis lintang menuju daerah kutub. Selain itu, laju dosis radiasi kosmik juga semakin meningkat seiring dengan bertambahnya ketinggian area pengukuran. Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan, diperlukan adanya kajian terkait dengan dosis radiasi yang diterima oleh awak kabin yang beroperasi di wilayah udara Republik Indonesia. Selain itu, dibutuhkan pengaturan untuk menjamin seluruh awak kabin bekerja dengan aman dan selamat khususnya dari bahaya radiasi.

Kata kunci: dosis, radiasi, radiasi kosmik, laju dosis, awak kabin

ABSTRACT

Demand for air travel in Indonesia has increased significantly, both by domestic and international travellers. Increased of air travel has increase the potential exposure of radiation dose for air crew. One of the natural hazards faced by aircrew is cosmic radiation. For this reason, a cosmic radiation dose rate study has been carried out in the airspace of the Republic of Indonesia. This research was conducted to determine the characteristics of cosmic radiation dose rates around the domestic flight altitude of the Republic of Indonesia airspace based on simulation method using EXPACS program. The results showed that the cosmic radiation dose rate in the domestic flight altitude of the Republic of Indonesia exceeded the annual radiation dose limit for the public exposure ($> 1 \text{ mSv}$). The cosmic ray dose rate around the area of 5° (north latitude) has the lowest value. This cosmic radiation dose rate will increase as latitude changes to the polar region. In addition, the dose rate of cosmic radiation also increases with increasing height of the measurement area. Based on the results of this study, a research is needed regarding to the radiation doses received by air crew which is operating in the Indonesian airspace. In addition, arrangements are needed to ensure that all air crew are work safely and securely, especially from radiation hazards.

Keywords: dose, radiation, cosmic radiation, dose rate, air crew

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara kepulauan terbesar di dunia, membentang dari timur ke barat dengan panjang 5.200 km dan lebar 1.870 km antara 95° BT dan 141° BT, dan melintasi garis khatulistiwa dari 6° LU hingga 11° LS [1, 2]. Sarana penghubung antar pulau dapat dilakukan melalui sarana darat dan laut, akan tetapi perjalanan dengan kedua mode transportasi tersebut membutuhkan waktu yang cukup lama. Untuk itu, sarana penerbangan merupakan salah satu sarana yang dapat menghubungkan konektivitas antar pulau secara cepat melalui udara [2].

Permintaan perjalanan udara di Indonesia baik untuk rute penerbangan domestik, internasional, maupun pengiriman barang telah meningkat secara signifikan seiring dengan meningkatnya pertumbuhan ekonomi khususnya dalam bidang pariwisata. Dari tahun 2012 s/d 2016, jumlah penerbangan domestik tumbuh rata-rata sebesar 5,2% pertahun dan jumlah

penerbangan internasional sebesar 4,4% pertahun. Jumlah pesawat yang dioperasikan oleh lima maskapai terbesar di Indonesia tumbuh dari 331 pada tahun 2013 menjadi 539 pada tahun 2017. Disatu sisi, pemerintah telah merealisasikan rencana peningkatan investasi dibidang pariwisata melalui pembentukan sepuluh destinasi wisata baru yang dikenal sebagai program Sepuluh Bali Baru. Pembentukan destinasi wisata baru ini diprediksi akan meningkatkan kebutuhan perjalanan udara di Indonesia. [3].

Perjalanan udara dengan pesawat telah menjauhkan manusia dari hiruk pikuk kehidupan di permukaan bumi. Ditinjau dari sisi radiasi, seluruh awak kabin dan penumpang pesawat yang melakukan perjalanan udara mendapatkan paparan radiasi yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan paparan radiasi yang diterima di permukaan bumi [4]. Paparan radiasi tersebut merupakan partikel-partikel yang berasal dari

matahari, bintang maupun sumber radiasi lain di ruang angkasa. Partikel-partikel berenergi tinggi yang merupakan sumber radiasi pengion yang berasal dari luar angkasa ini disebut sebagai radiasi sinar kosmik [5].

Radiasi sinar kosmik merupakan bentuk alami dari radiasi pengion yang berasal dari luar angkasa yang dikenal sebagai *Galactic Cosmic Ray* (GCR). Partikel berenergi tinggi seperti proton atau partikel alfa yang berasal dari luar angkasa bertabrakan dengan atom nitrogen, oksigen, dan unsur-unsur lain atmosfer bumi yang menciptakan radiasi kosmik dalam bentuk foton dan partikel subatomik lainnya. Sumber lain dari radiasi kosmik atau radiasi galaksi terjadi ketika partikel bermuatan dilepaskan langsung oleh matahari yang disebut sebagai *Solar Energetic Particle* (SEP) [6].

Terlepas dari sumbernya dan berdasarkan pada energinya, partikel-partikel radiasi kosmik memasuki atmosfer Bumi pada garis lintang magnet yang berbeda dan bertabrakan dengan molekul penyusun atmosfer. Pada lapisan bawah bagian atas atmosfer (~ 100 km), radiasi kosmik primer berkurang sebagai akibat dari penyerapan radiasi kosmik oleh atmosfer, sementara komponen radiasi sekunder meningkat sebagai bentuk hasil interaksi partikel-partikel radiasi kosmik dengan molekul penyusun atmosfir [7]. Medan radiasi sinar kosmik pada ketinggian area penerbangan pesawat komersial terdiri dari GCR, SEP dan partikel sekundernya (partikel bermuatan dan neutron) yang diproduksi di atmosfer bumi melalui interaksi nuklir [8, 9]. Radiasi kosmik merupakan radiasi alam paling berbahaya yang dihadapi oleh penumpang, awak kabin dan penjelajah luar angkasa. GCR dan SEP sangat berbahaya terutama saat kita berada di area ketinggian pesawat komersial atau diatasnya (8 km atau 26.000 kaki) [10].

International Commission on Radiological Protection (ICRP) merekomendasikan agar awak kabin dan *frequent flyers* diinformasikan tentang dosis radiasi yang diterima masing-masing selama melakukan penerbangan. Pada tahun 1991, radiasi kosmik dianggap sebagai salah satu risiko pekerjaan bagi awak kabin oleh ICRP. Hal ini merupakan keputusan penting yang menyiratkan bahwa diperlukan adanya pengawasan radiologis dan pengenalan pedoman keselamatan radiasi terhadap awak kabin. ICRP merekomendasikan bahwa awak kabin suatu maskapai tidak boleh menerima paparan radiasi melebihi 20 mSv per tahun, dan pekerja hamil tidak boleh menerima paparan radiasi melebihi dari 2 mSv selama masa kehamilan. Selain itu, juga direkomendasikan agar masyarakat umum tidak menerima paparan radiasi lebih dari 1 mSv per tahun [11].

Dosis radiasi kosmik dalam dunia penerbangan umumnya dapat dianalisis dengan menggunakan metode pemodelan [11]. Dosis individual yang diterima oleh awak kabin dan penumpang (*frequent flyers*) selama di pesawat umumnya dinilai menggunakan kode numerik. Beberapa perangkat lunak atau program yang mudah

digunakan untuk perhitungan dosis radiasi selama penerbangan telah dikembangkan dan digunakan oleh berbagai kelompok penelitian (FAA, 2018; HMGU, 2018; IRSN, 2018; PCAire Inc., 2018; QST, 2018). Untuk memverifikasi keakuratan program-program tersebut, pengukuran radiasi kosmik dalam penerbangan dilakukan secara langsung menggunakan instrumen portabel seperti detektor semikonduktor (Si) yang dioperasikan dengan baterai dan pencacah proporsional (TEPC) pada pesawat khusus atau pesawat komersial.

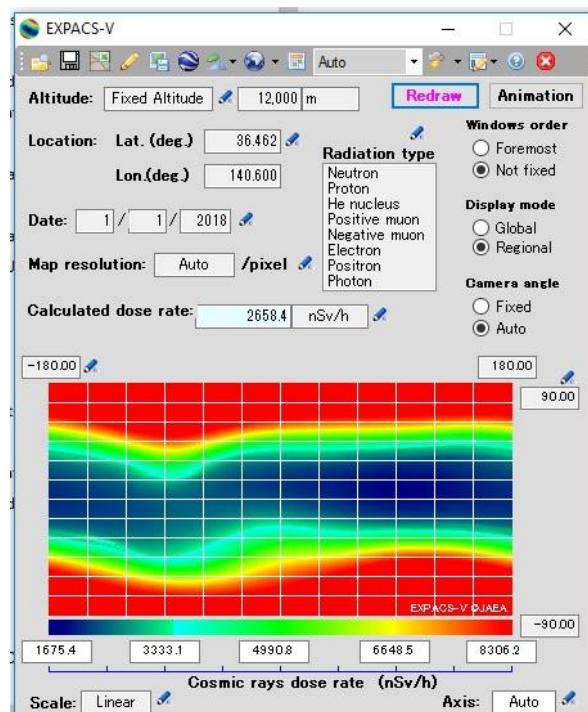
Hasil pengukuran dosis radiasi kosmik tersebut kemudian dibandingkan dengan hasil perhitungan yang dihasilkan dari metode pemodelan (simulasi) dengan program-program komputer. Program-program tersebut dapat digunakan untuk menganalisis laju dosis radiasi partikel proton, alpha dan partikel berat lainnya di wilayah udara tertentu pada ketinggian tertentu. Analisis laju dosis radiasi kosmik pada suatu wilayah udara tertentu sangat penting untuk dilakukan sebagai langkah awal dalam melakukan analisis paparan radiasi yang mungkin akan diterima oleh awak kabin dan *frequent flyer* dari pesawat-pesawat yang melewati wilayah udara tersebut [12].

Penelitian ini dilakukan untuk melakukan analisis laju dosis radiasi kosmik di wilayah udara Republik Indonesia. Analisis laju dosis ini dilakukan sebagai langkah awal dalam melakukan analisis paparan radiasi kosmik yang mungkin diterima oleh awak kabin dan *frequent flyer* pada penerbangan domestik di wilayah udara Republik Indonesia. Hasil analisis laju dosis radiasi kosmik di wilayah udara Republik Indonesia dapat digunakan sebagai acuan untuk menentukan kajian dan pengaturan terhadap paparan radiasi kosmik yang mungkin diterima oleh awak kabin dan *frequent flyer* pada penerbangan domestik di wilayah udara Republik Indonesia. Kajian terkait paparan radiasi kosmik yang mungkin diterima oleh awak kabin dan *frequent flyer* pada penerbangan domestik di wilayah udara Republik Indonesia merupakan hal yang penting untuk dilakukan sesuai dengan rekomendasi ICRP yang merekomendasikan awak kabin sebagai pekerja yang berpotensi menerima dosis radiasi melebihi Nilai Batas Dosis radiasi masyarakat. Selain itu, rekomendasi untuk melakukan kajian paparan radiasi kosmik yang mungkin diterima oleh awak kabin dan *frequent flyer* juga tertuang dalam dokumen standar keselamatan IAEA khususnya pada GSR Part 3 tentang *Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards*. Pada penelitian ini, analisis laju dosis radiasi kosmik di wilayah udara Republik Indonesia dilakukan dengan metode simulasi menggunakan program EXPACS.

METODE

Pengukuran laju dosis radiasi kosmik dapat dilakukan dengan bantuan beberapa program komputer. Program komputer juga dapat digunakan untuk menghitung laju dosis serta seluruh dosis efektif yang

diterima awak kabin dan *frequent flyers* selama dalam perjalanan udara berdasarkan data fisik dan data penentu penerbangan (ketinggian terbang, area terbang, waktu terbang dan lama waktu penerbangan) [13]. Pada penelitian ini, pengukuran laju dosis radiasi kosmik di wilayah udara Republik Indonesia dilakukan dengan program EXPACS. Program ini dapat digunakan untuk mengukur laju dosis radiasi kosmik disembarang tempat berdasarkan parameter garis bujur dan garis lintang dari ketinggian 0 km hingga ketinggian maksimal 20 km atau 65.617 kaki diatas permukaan laut. Jendela tampilan program EXPACS saat dioperasikan untuk mengukur laju dosis radiasi kosmik pada suatu area tertentu ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Tampilan jendela program EXPACS

Penelitian ini dilakukan dengan cara menentukan area wilayah udara yang akan diukur laju dosis radiasi kosmiknya yaitu wilayah udara Republik Indonesia. Berdasarkan letak astronomisnya, Wilayah udara Republik Indonesia terletak diantara garis lintang 6° LU– 11° LS dan garis bujur 95° BT – 141° BT. Untuk itu, pengukuran laju dosis radiasi kosmik akan dilakukan pada area garis lintang 5° LU – 10° LS dan garis bujur 95° BT – 141° BT. Pengukuran dilakukan dengan cara menetapkan area yang akan dihitung laju dosis radiasi kosmiknya berdasarkan variasi garis lintang yaitu pada garis lintang 5° LU, garis khatulistiwa, garis lintang 5° LS, dan garis lintang 10° LS. Masing-masing garis lintang tersebut kemudian dipasangkan dengan masing-masing garis bujur, yaitu dari 90° BT sampai dengan 150° BT dengan variasi interval masing-masing pengukuran sebesar 10° .

Pada penelitian ini, laju dosis radiasi kosmik disekitar daerah garis lintang dan garis bujur tempat pengukuran dilakukan diasumsikan akan memiliki nilai yang sama atau mendekati nilai laju dosis radiasi

kosmik disekitar daerah garis lintang dan garis bujur tempat pengukuran dilakukan. Selain itu, pengukuran laju dosis radiasi kosmik pada penelitian ini dibatasi hanya untuk pengukuran laju dosis radiasi kosmik pada bulan Januari tahun 2018. Tahapan pengukuran laju dosis radiasi kosmik menggunakan program EXPACS disajikan pada Gambar 2. Berdasarkan pengukuran yang dilakukan, akan diperoleh 4 (empat) buah tabel data yang dapat menunjukkan laju dosis radiasi kosmik di wilayah udara Republik Indonesia. Keempat tabel tersebut adalah tabel laju dosis radiasi kosmik pada garis lintang 5° LU, garis khatulistiwa, garis lintang 5° LS, dan garis lintang 10° LS dengan masing-masing variasi garis bujur dan ketinggian area pengukurnya seperti yang ditunjukkan pada bagian hasil penelitian.



Gambar 2. Flowchart pengukuran laju dosis radiasi kosmik menggunakan program EXPACS

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perhitungan laju dosis radiasi kosmik menggunakan program EXPACS untuk wilayah udara Republik Indonesia telah dilakukan. Hasil perhitungannya disajikan pada Tabel 3, Tabel 4, Tabel 5 dan Tabel 6 pada bagian lampiran. Tabel 1 menunjukkan laju dosis radiasi kosmik di area khatulistiwa wilayah penerbangan domestik Republik Indonesia. Berdasarkan data penerbangan dari *flight radar*, penerbangan domestik di wilayah udara Republik Indonesia berada pada ketinggian 10 km sampai dengan 12 km. Hasil pengukuran yang dilakukan menunjukkan bahwa pada ketinggian dan garis lintang yang sama laju dosis radiasi kosmiknya mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya nilai garis bujur. Hal ini menunjukkan bahwa besar laju

dosis radiasi kosmik di wilayah udara Republik Indonesia pada garis lintang yang sama, akan mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya nilai garis bujur.

Tabel 2 menunjukkan perbedaan laju dosis radiasi antara variasi garis lintang yang diukur. Hal ini menunjukkan bahwa perubahan garis lintang memberikan dampak perubahan laju dosis radiasi yang cukup signifikan. Berdasarkan hasil analisis data yang dilakukan, diperoleh kesimpulan bahwa pada penelitian ini besar laju dosis radiasi kosmik dipengaruhi oleh letak garis lintang tempat area pengukuran. Laju dosis radiasi kosmik paling rendah diperoleh pada area 5° LU dan nilainya semakin besar seiring bertambahnya nilai garis lintang menuju ke lintang dan kutub selatan.

Rendahnya laju dosis radiasi kosmik di wilayah katulistiwa terjadi karena adanya pengaruh medan magnet bumi. Radiasi kosmik yang tersusun atas partikel-partikel bermuatan berenergi tinggi akan berinteraksi dengan medan magnet bumi. Pancaran radiasi kosmik yang searah dengan medan magnet bumi di daerah kutub akan menyebabkan radiasi kosmik tersebut tidak mendapatkan hambatan saat memasuki permukaan bumi. Sebaliknya, pancaran radiasi kosmik yang akan memasuki permukaan bumi di daerah katulistiwa akan terhambat oleh medan magnet bumi yang arahnya tegak lurus arah pancaran radiasi kosmik. Hanya partikel-partikel radiasi kosmik

berenergi tinggi yang akan mampu menembus hambatan medan magnet bumi, sisanya akan diblokkan mengikuti arah medan magnet bumi. Berdasarkan analisa tersebut, maka nilai laju dosis radiasi kosmik di wilayah khatulistiwa menjadi lebih rendah jika dibandingkan dengan nilai laju dosis radiasi di wilayah kutub.

Selain bergantung pada pengaruh medan magnet bumi, besaran nilai laju dosis radiasi kosmik juga dipengaruhi oleh jarak permukaan area perhitungan dengan sumber radiasi kosmik khususnya matahari. Semakin dekat permukaan bumi dengan matahari maka nilai laju dosis radiasi kosmiknya akan semakin besar. Bumi berputar pada porosnya dengan kemiringan $23,5^{\circ}$. Pengukuran pada penelitian ini dilakukan untuk kondisi bumi pada bulan Januari 2018 dan akan berdampak pada perbedaan nilai laju dosis radiasi kosmik di permukaan bumi. Pada bulan Januari, posisi revolusi bumi mengelilingi matahari menjauahkan bagian utara bumi dari permukaan matahari dan sebaliknya lebih mendekatkan bagian selatan bumi pada permukaan bumi. Hal ini menyebabkan daerah pada bagian utara bumi akan mendapatkan paparan radiasi kosmik yang berasal dari matahari lebih rendah daripada belahan bumi pada bagian selatan seperti data yang ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 1. Laju dosis radiasi kosmik di area penerbangan domestik wilayah udara Indonesia pada garis katulistiwa

Ketinggian (km)	Bujur Timur						
	90°	100°	110°	120°	130°	140°	150°
10	1217,50	1224,30	1231,10	1251,60	1280,60	1302,70	1332,20
11	1463,90	1472,30	1480,70	1505,90	1541,70	1569,00	1605,40
12	1696,30	1706,20	1716,20	1746,20	1788,70	1821,20	1864,50

Tabel 2. Laju dosis radiasi kosmik di area penerbangan domestik wilayah udara Republik Indonesia pada 120° BT

Ketinggian (km)	Garis Lintang			
	5°	0°	-5°	-10°
10	1251,60	1280,60	1332,20	1421,10
11	1505,90	1541,70	1605,40	1715,50
12	1746,20	1788,70	1864,50	1995,60

Perubahan laju dosis radiasi yang paling terlihat terdapat pada variasi ketinggian area perhitungan. Berdasarkan data pada Tabel 1 dan Tabel 2 (lebih lengkap pada bagian lampiran), semakin tinggi wilayah udara yang diukur, maka laju dosis radiasi kosmiknya akan semakin besar. Telah

diketahui bahwa sinar kosmik dapat dibedakan menjadi sinar kosmik primer dan sekunder. Sinar kosmik primer adalah sinar kosmik yang berasal dari luar angkasa dan memasuki batas luar atmosfer bumi. Sinar kosmik

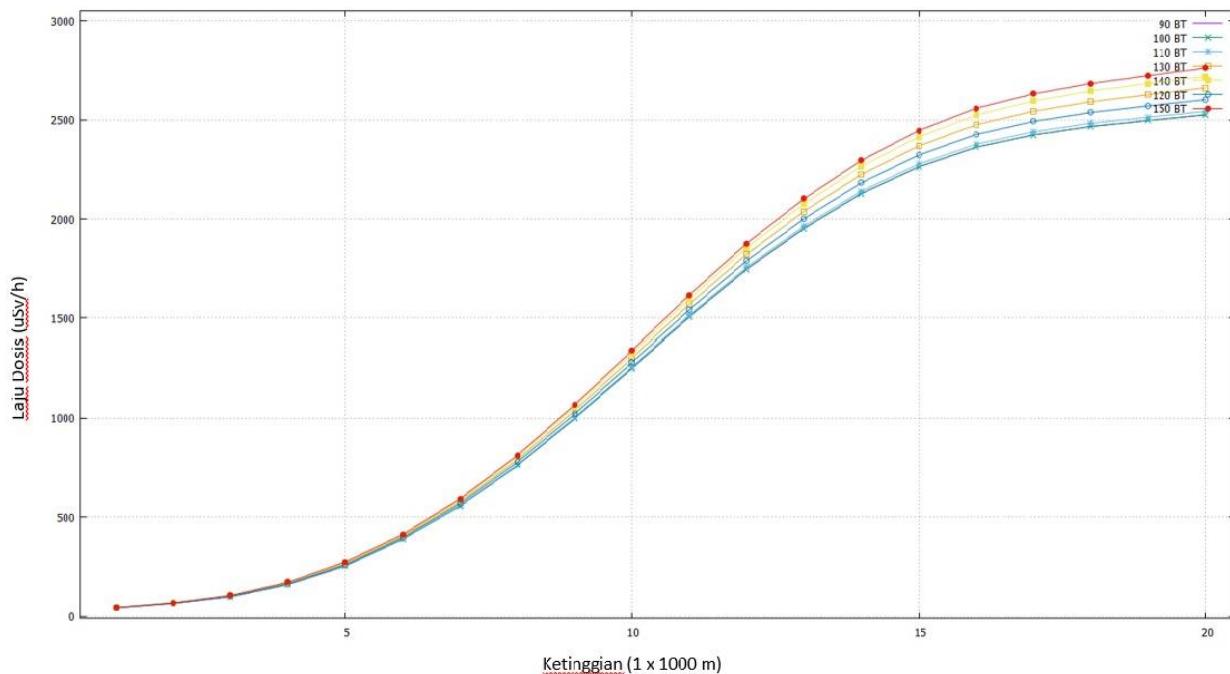
primer terdiri dari 90% proton, 9% inti helium dan sisa inti berat. Sinar kosmik sekunder dihasilkan ketika sinar kosmik primer berinteraksi dengan gas di lapisan atas atmosfer. Sinar kosmik sekunder ini terdiri dari partikel alpha, proton, elektron, positron, meson, dan foton dalam proporsi yang berbeda. Sinar kosmik sekunder inilah yang akan berada di ruang udara bumi dan terus bergerak menuju permukaan bumi. Sepanjang lintasannya menuju permukaan bumi, partikel-partikel tersebut kehilangan energinya saat berinteraksi dengan molekul-molekul penyusun ruang udara bumi, sehingga semakin mendekati permukaan bumi energi radiasinya akan semakin rendah. Hal ini menyebabkan perhitungan laju dosis radiasi kosmik yang dilakukan akan memperoleh nilai yang semakin kecil seiring dengan berkurangnya ketinggian area pengukuran.

Gambar 3 menunjukkan grafik laju dosis radiasi kosmik pada daerah khatulistiwa. Pada grafik tersebut terlihat bahwa laju dosis radiasi kosmik di daerah khatulistiwa semakin besar seiring dengan bertambahnya ketinggian area pengukuran. Pada area ketinggian yang mendekati permukaan air laut, perubahan garis bujur tidak memperlihatkan

perbedaan. Perbedaan nilai laju dosis radiasi kosmik di daerah khatulistiwa untuk garis bujur yang berbeda mulai terlihat pada ketinggian 10 km dan seterusnya. Akan tetapi perbedaan nilai laju dosisnya tidak terlalu besar.

Berdasarkan data pada Tabel 1 dan Tabel 2, maka laju dosis radiasi kosmik area penerbangan domestik wilayah udara Republik Indonesia yang paling besar terdapat pada area yang terletak pada garis lintang 10° LS dan bujur 120° BT dengan ketinggian 12 km yaitu sebesar 1995,60 nSv/jam. Berdasarkan data tersebut, apabila seorang awak kabin memaksimalkan jam terbangnya sebagaimana yang ditetapkan oleh Kementerian Perhubungan dan *International Civil Aviation Organization* (ICAO) yaitu sebanyak 1.050 jam terbang dalam setahun, maka kemungkinan awak kabin tersebut menerima dosis radiasi kosmik sebesar 2,09 mSv/tahun. Besar dosis radiasi tersebut melebihi Nilai Batas Dosis radiasi untuk masyarakat umum yang ditetapkan di Republik Indonesia yaitu sebesar 1 mSv.

Mengingat besarnya potensi paparan radiasi yang diterima oleh awak kabin dan *frequent flyer*, beberapa negara dan organisasi internasional telah merekomendasikan pengelompokan paparan radiasi untuk awak kabin dan *frequent flyer*. ICRP dan FAA, secara resmi mempertimbangkan awak kabin sebagai pekerja yang menerima paparan kerja [14]. ICRP 132 merekomendasikan bahwa paparan awak kabin pesawat harus diperlakukan sebagai penerima paparan kerja dalam *Existing Exposure*. Sementara itu, IAEA melalui GSR Part 3, *Radiation Protection and Safety of Radiation Sources*, mengelompokkan awak kabin kedalam kelompok *Existing Exposure* yang artinya awak kabin juga ditetapkan sebagai pekerja yang menerima paparan radiasi. Sedangkan standar keselamatan Uni Eropa mengelompokkan paparan radiasi yang diterima awak kabin kedalam situasi paparan terencana dan menerapkan beberapa rekomendasi untuk proteksi dan keselamatan radiasi bagi awak kabin saat bekerja di udara [15].



Gambar 3. Grafik laju dosis radiasi kosmik pada garis khatulistiwa

KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini menjadi salah satu tahap awal terhadap kajian paparan dosis radiasi yang dapat diterima oleh awak kabin pesawat domestik di Republik Indonesia. Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan, laju dosis radiasi kosmik di wilayah udara Republik Indonesia bervariasi sesuai dengan letak area pengukurannya. Laju dosis radiasi kosmik disekitar daerah 5° LU memiliki nilai paling rendah. Nilai laju

dosis radiasi kosmik ini akan bertambah seiring dengan perubahan garis lintang menuju daerah kutub. Sementara itu, perubahan sangat terlihat apabila pengukuran dilakukan dengan memvariasikan ketinggian pengukuran. Semakin tinggi area

pengukuran, maka laju dosis radiasi kosmiknya akan semakin besar.

Laju dosis radiasi kosmik pada area penerbangan domestik wilayah udara Republik Indonesia yang paling besar terdapat pada area yang terletak pada garis lintang 10° LS dan bujur 120° BT dengan ketinggian 12 km yaitu sebesar 1995,60 nSv/jam. Berdasarkan data tersebut, apabila seorang awak kabin memaksimalkan jam terbangnya sebanyak 1050 jam terbang dalam setahun, maka awak kabin tersebut dapat menerima dosis radiasi kosmik sebesar 2,09 mSv/tahun.

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan, potensi dosis radiasi kosmik yang dapat diterima oleh awak kabin di area penerbangan Republik Indonesia melebihi NBD masyarakat umum (> 1 mSv/tahun),

maka diperlukan pengaturan untuk memastikan awak kabin tetap selamat dari bahaya radiasi selama bekerja. Pengaturan tersebut dapat mengacu pada rekomendasi yang tertuang pada ICRP 132 dan IAEA GSR Part 3 terkait dengan keselamatan radiasi bagi awak kabin dan *frequent flyers*. Saat ini peraturan ketenaganukliran di Republik Indonesia belum mewadahi aturan tentang paparan radiasi untuk awak kabin dan *frequent flyers* tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] U.S. Embassy Jakarta Economic Section. (2012). The Aviation Sector – Opportunities in Indonesia. (March 2012).
- [2] Kuncoro, M. (2013). Economic Geography of Indonesia: Can Mp3Ei Reduce Inter-Regional Inequality? South East Asia Journal of Contemporary Business, Economics and Law, 2(2), 17–32.
- [3] Smith, B. J. (n.d.). Director, PT Pricewaterhouse Coopers Indonesia Advisory. PPPs in Indonesia. 1–4.
- [4] Lewis, B. J., McCall, M. J., Green, A. R., Bennett, L. G. I., Pierre, M., Schrewe, U. J., Felsberger, E. (2001). Aircrew exposure from cosmic radiation on commercial airline routes. Radiation Protection Dosimetry, 93(4), 293–314.
- [5] Lewis, A. 2018. Flight Safety Information December 27, 2017 No. 257.
- [6] Aw, J. W. (2019). Cosmic Radiation and Commercial Air Travel. Medcan Health Management, Inc. 150 York Street, Suite 1500, Toronto, ON, Canada M5H 3S5.
- [7] Wilkins, R., Mertens, C., Beck, P., Ryden, K., Tobiska, W. K., Getley, I., Hwang, J. (2015). Advances in Atmospheric Radiation Measurements and Modeling Needed to Improve Air Safety. Space Weather, 13(4), 202–210.
- [8] Zhou, D., O'Sullivan, D., & Flood, E. (2006). Radiation field of cosmic rays measured at aviation altitudes by CR-39 detectors. Advances in Space Research, 37(6), 1218–1222.
- [9] Hwang, J., Dokgo, K., Choi, E., Park, J. S., Kim, K. C., & Kim, H. P. (2014). Modeling of space radiation exposure estimation program for pilots, crew and passengers on commercial flights. Journal of Astronomy and Space Science, 31(1), 25–31.
- [10] Tobiska, W. K., Meier, M. M., Matthiae, D., & Copeland, K. (2017). Characterizing the variation in atmospheric radiation at aviation altitudes. In Extreme Events in Geospace: Origins, Predictability, and Consequences.
- [11] Yasuda, H., & Yajima, K. (2018). Verification of cosmic neutron doses in long-haul flights from Japan. Radiation Measurements, 119(July), 6–11.
- [12] Sato, T. (2018). EXPACS: Excel-based Program for calculating Atmospheric Cosmic-ray Spectrum User's Manual.
- [13] Frasch, G., Stegemann, R., & Kammerer, L. (2005). Aircrew Monitoring of Occupational Exposure to Ionising Radiation. (October), 1–6.
- [14] Nkwanyana, T. S. (2018). Aircrew Exposure to Cosmic Radiation. File Presentasi.
- [15] Janžekovič, H. (2017). Differences between IAEA and EU Basic Safety Standards. Proceedings of the International Conference Nuclear Energy for New Europe, Bled, Slovenia.

LAMPIRAN

A. Laju Dosis Radiasi Kosmik di Daerah Katulistiwa (nSv/h)

Tabel 3. Laju Dosis Radiasi Kosmik di Daerah Katulistiwa (nSv/h)

Ketinggian (km)	Bujur Timur						
	90 ⁰	100 ⁰	110 ⁰	120 ⁰	130 ⁰	140 ⁰	150 ⁰

1	42,68	42,68	42,81	43,20	43,59	43,99	44,25
2	64,69	64,69	64,94	65,70	66,45	67,20	67,70
3	98,41	98,84	99,27	100,56	102,34	103,68	105,47
4	159,95	160,70	161,45	163,71	166,80	169,13	172,24
5	253,57	254,87	256,17	260,07	265,38	269,38	274,72
6	388,67	388,67	390,63	396,82	403,00	409,18	413,42
7	556,79	556,79	559,61	568,68	577,74	586,80	593,07
8	760,88	760,88	764,83	777,57	790,31	803,05	811,89
9	998,42	998,42	1003,70	1020,90	1038,00	1055,20	1067,10
10	1251,60	1251,60	1258,40	1280,60	1302,70	1324,80	1340,20
11	1505,90	1505,90	1514,30	1541,70	1569,00	1596,30	1615,40
12	1746,20	1746,20	1756,20	1788,70	1821,20	1853,60	1876,30
13	1951,70	1951,70	1963,20	2000,60	2038,00	2075,30	2101,40
14	2127,80	2127,80	2140,60	2182,40	2224,30	2266,20	2295,40
15	2262,40	2262,40	2276,40	2322,10	2367,80	2413,50	2445,40
16	2361,70	2361,70	2376,70	2425,70	2474,70	2523,70	2557,90
17	2423,70	2423,70	2439,50	2491,30	2543,00	2594,80	2631,00
18	2466,00	2466,00	2482,50	2536,70	2591,00	2645,20	2683,20
19	2496,10	2496,10	2513,20	2569,80	2626,40	2683,00	2722,60
20	2524,70	2524,70	2542,50	2601,60	2660,70	2719,80	2761,10

B. Laju Dosis Radiasi Kosmik di Daerah 5° Lintang Utara (nSv/h)

Tabel 4. Laju Dosis Radiasi Kosmik di Daerah 5° Lintang Utara (nSv/h)

Ketinggian (km)	Bujur Timur						
	90°	100°	110°	120°	130°	140°	150°
1	42,03	42,16	42,29	42,68	43,20	43,59	44,12
2	63,44	63,69	63,69	64,69	65,70	66,45	67,45
3	98,41	98,84	99,27	100,56	102,34	103,68	105,47
4	159,95	160,70	161,45	163,71	166,80	169,13	172,24
5	253,57	254,87	256,17	260,07	265,38	269,38	274,72
6	378,88	380,84	382,80	388,67	396,82	403,00	411,24
7	542,69	545,51	548,33	556,79	568,68	577,74	589,82
8	741,15	745,10	749,04	760,88	777,57	790,31	807,29
9	971,88	977,19	982,50	998,42	1020,90	1038,00	1060,90
10	1217,50	1224,30	1231,10	1251,60	1280,60	1302,70	1332,20
11	1463,90	1472,30	1480,70	1505,90	1541,70	1569,00	1605,40
12	1696,30	1706,20	1716,20	1746,20	1788,70	1821,20	1864,50
13	1894,40	1905,90	1917,30	1951,70	2000,60	2038,00	2087,80
14	2063,30	2076,50	2089,30	2127,80	2182,40	2224,30	2280,10
15	2195,20	2206,50	2220,40	2262,40	2322,10	2367,80	2428,70
16	2286,80	2301,80	2316,80	2361,70	2425,70	2474,70	2540,00
17	2344,80	2360,60	2376,40	2423,70	2491,30	2543,00	2612,20
18	2383,60	2400,10	2416,60	2466,00	2536,70	2591,00	2663,30
19	2410,50	2427,60	2444,70	2496,10	2569,80	2626,40	2701,90
20	2435,60	2453,50	2471,30	2524,70	2602,60	2660,70	2739,50

C. Laju Dosis Radiasi Kosmik di Daerah 5° Lintang Selatan (nSv/h)

Tabel 5. Laju Dosis Radiasi Kosmik di Daerah 5° Lintang Selatan (nSv/h)

Ketinggian (km)	Bujur Timur						
	90°	100°	110°	120°	130°	140°	150°
1	43,73	43,72	43,89	44,12	44,38	44,77	44,90
2	66,70	66,70	66,95	67,45	67,95	68,70	68,95
3	90,00	104,13	104,58	105,47	106,40	107,78	108,24
4	169,91	169,91	170,69	172,24	173,85	176,25	177,05
5	270,72	270,72	272,05	274,72	277,46	281,57	282,94
6	405,06	405,06	407,12	411,24	415,59	422,12	424,29
7	580,76	580,76	583,78	589,82	596,32	606,07	609,32
8	794,55	794,55	798,80	807,29	816,48	830,26	834,85
9	1043,80	1043,80	1049,50	1060,90	1073,30	1092,00	1098,20
10	1310,10	1310,10	1317,40	1332,20	1348,20	1372,30	1380,30
11	1578,10	1578,10	1587,20	1605,40	1625,30	1655,00	1665,00
12	1832,00	1832,00	1842,80	1864,50	1888,10	1923,50	1935,40
13	2050,40	2050,40	2062,90	2087,80	2115,00	2155,90	2169,50
14	2238,20	2238,20	2252,20	2280,10	2310,60	2356,40	2371,60
15	2383,10	2383,10	2398,30	2428,70	2462,00	2511,90	2528,60
16	2491,00	2491,00	2507,40	2540,00	2575,70	2629,30	2647,10
17	2560,30	2560,30	2577,60	2612,10	2649,80	2706,50	2725,40
18	2609,10	2609,10	2627,20	2663,30	2703,00	2762,50	2782,30
19	2645,30	2645,30	2664,20	2701,90	2743,30	2805,40	2826,10
20	2680,40	2680,40	2700,10	2739,50	2782,80	2847,60	2869,30

D. Laju Dosis Radiasi Kosmik di Daerah 10^0 Lintang Selatan (nSv/h)

Tabel 6. Laju Dosis Radiasi Kosmik di Daerah 10^0 Lintang Selatan (nSv/h)

Ketinggian (km)	BUJUR TIMUR						
	90^0	100^0	110^0	120^0	130^0	140^0	150^0
1	45,43	42,30	45,30	45,55	45,68	45,94	45,94
2	69,95	69,70	69,70	70,19	70,44	70,44	70,93
3	110,08	109,62	109,62	110,55	111,02	111,96	111,96
4	180,26	179,46	179,46	181,91	181,91	183,57	183,57
5	288,42	287,05	287,05	289,83	291,24	294,06	294,06
6	432,99	430,82	430,82	435,30	437,60	442,20	442,20
7	622,32	619,07	619,07	625,82	629,33	636,34	636,34
8	853,23	848,63	848,63	858,22	863,21	873,18	873,18
9	1123,00	1116,80	1116,80	1129,80	1136,50	1150,10	1150,10
10	1412,40	1404,30	1404,30	1421,10	1429,90	1447,40	1447,40
11	1704,60	1694,70	1694,70	1715,50	1726,40	1748,10	1748,10
12	1982,60	1970,80	1970,80	1995,60	2008,60	2034,50	2034,50
13	2223,90	2210,30	2210,30	2238,90	2253,90	2283,90	2283,90
14	2432,60	2417,40	2417,40	2449,50	2466,30	2499,90	2499,90
15	2595,30	2578,50	2578,50	2613,50	2631,80	2668,50	2668,50
16	2718,50	2700,60	2700,60	2738,20	2757,80	2797,10	2797,10
17	2800,90	2782,00	2782,00	2821,80	2842,60	2884,30	2884,30
18	2861,60	2841,70	2841,70	2883,50	2905,40	2949,20	2949,20
19	2909,00	2888,30	2888,30	2931,90	2955,00	3000,70	3000,70
20	2960,50	2954,30	2954,30	2966,40	2972,30	2984,00	2984,00