

ANALISA PAPANAN RADIO FREQUENCY RADIATION (RFR) DARI RADAR PERTAHANAN TNI AU TERHADAP PERSONEL PENGAWAK RADAR BERDASARKAN STANDAR INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION (ICNIRP)

ANALYSIS OF RADIO FREQUENCY RADIATION (RFR) EXPOSURE FROM TNI AU DEFENSE RADAR TO RADAR MANUFACTURERS BASED ON INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION (ICNIRP) STANDARDS

Najih Abdul Haq¹, Sungkono², Luhut Simbolon³

PROGRAM STUDI TEKNOLOGI PENGINDERAAN, UNIVERSITAS PERTAHANAN^{1,2,3}
(najihabdulhaq85@gmail.com, sungkono.510425@gmail.com, lsimbolon427@gmail.com)

Abstrak– Radar adalah suatu perangkat yang memancarkan gelombang elektromagnetik ke suatu objek serta menerima gelombang pantulan dari objek yang diinginkan selama masih dalam jangkauannya. Pada umumnya radar memiliki daya pancar puncak (*peak transmit power*) melebihi 1 MW dan daya pancar rata-rata (*average power*) diatas 1 kW. Besarnya daya pancar radar tersebut menimbulkan isu keselamatan dan keamanan bagi personel pengawak radar. Paparan *Radio Frequency Radiation (RFR)* yang terlalu tinggi dalam jangka waktu tertentu dapat menimbulkan masalah keselamatan dan keamanan. Berdasarkan hal tersebut, maka dilakukan analisa tentang paparan RFR dari radar pertahanan TNI AU terhadap personel pengawak radar berdasarkan standar ICNIRP. Peneliti menggunakan metode kuantitatif dalam pengambilan data terhadap paparan Radar PSR dan SSR. Dari kelima titik lokasi di Satuan Radar-211/Tanjung Kait menunjukkan nilai aman, dibawah 0,4 W/kg untuk SAR rata-rata seluruh tubuh (*whole-body average*), sesuai standar ICNIRP. Untuk mencegah bahaya paparan radiasi radar dan sejauh mana dampak radiasi radar bagi personel Satrad, diberikan analisis perhitungan tentang jarak minimum kemiringan aman SAR, dimana jarak minimum kemiringan aman SAR dengan sudut 30,91° adalah 8,36 meter untuk radar PSR, radar SSR 7,67 meter, sedangkan apabila sudut 50,86° minimal jarak kemiringan aman SAR 3,49 meter untuk radar PSR, dan radar SSR yaitu 12,77 meter. Selanjutnya dalam menentukan keselamatan dan keamanan terhadap paparan RFR diberikan perhitungan tentang minimal jarak horizontal aman SAR di luar ruangan, saat di Lapangan Upacara untuk radar PSR 7,17 meter, radar SSR 6,58 meter, Halaman Tower 2,20 meter radar PSR, dan radar SSR 8,06 meter.

Kata Kunci: *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), Paparan Radio Frequency Radiation (RFR), Radar, Satuan Radar, Specific Absorption Rate (SAR).*

Abstract – Radar is a device that emits electromagnetic waves to an object and receives reflected waves from the desired object as long as it is within its range. In general, radars have a peak transmit power exceeding 1 MW and an average power transmit power above 1 kW. The large transmit power of the radar raises safety and security issues for radar control personnel. Exposure to Radio Frequency Radiation (RFR) that is too high for a period of time can create safety and security concerns. Based on this, an analysis of the RFR exposure of the TNI AU radar defense against radar crew personnel was carried out based on ICNIRP standards. Researchers used quantitative methods in collecting data on exposure to Radar PSR and SSR. From the five location points in the Radar-211 / Tanjung Kait Unit, it shows a safe value, below 0.4 W / kg for the whole-body average SAR, according to the ICNIRP standard. To prevent the danger of exposure to radar radiation and the extent of the impact of radar radiation on Satrad personnel, a calculation analysis of the minimum safe slope of the SAR is provided,

where the minimum safe slope distance of the SAR with an angle of $30,91^\circ$ is 8,36 meters for PSR radar, SSR radar 7,67 meters, whereas if the angle is $50,86^\circ$ the minimum safe tilt distance of SAR is 3,49 meters for the PSR radar and SSR radar which is 12,77 meters. Furthermore, in determining the safety and security of RFR exposure, a calculation of the minimum safe horizontal distance of SAR outdoors, while in the Ceremony Field for the PSR radar 7,17 meter, 6,58 meter SSR radar, 2,20 meter PSR radar tower page, SSR radar 8,06 meters.

Keywords: International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), Radio Frequency Radiation (RFR) Exposure, Radar, Radar Unit (Satrad), Specific Absorption Rate (SAR).

Pendahuluan

Pertahanan negara diselenggarakan melalui usaha membangun dan membina untuk menanggulangi setiap ancaman yang bersifat aktual maupun potensial. Markas Besar Tentara Nasional Indonesia (Mabes TNI) dalam hal ini Komando Pertahanan Udara Nasional (Kohanudnas) yang didukung oleh 20 Satuan Radar (Satrad) TNI AU yang tersebar di seluruh Indonesia mempunyai tugas sebagai pengawal keamanan wilayah Indonesia terhadap sejumlah ancaman, khususnya yang berasal dari luar negeri karena perannya sebagai mata dan telinga terhadap informasi yang masuk ke negara Indonesia. Satrad mengoperasikan radar yang memancarkan gelombang EM, berdaya puncak (>1 MW), daya pancar (>1 kW), menimbulkan isu keamanan dan keselamatan bagi pengawak radar.

Keselamatan dan keamanan adalah aspek penting yang harus diutamakan, termasuk bagi para personel yang

mengawaki radar di Satrad. Oleh sebab itu perlu dilakukan pengkajian dan penelitian untuk mengetahui aspek keselamatan dan keamanan para personel yang mengawaki radar terhadap paparan RFR berdasarkan standar yang dikeluarkan oleh ICNIRP.

Penelitian ini difokuskan untuk menganalisis perhitungan terhadap tingkat bahaya dari paparan radiasi bagi personel pengawak radar di Satrad TNI AU, menentukan pola kekuatan radiasi radar, serta posisi paling rawan sampai dengan posisi aman dari paparan radiasi bagi personel pengawak radar, membuat pembaharuan tentang SOP dan tindakan lain yang diperlukan untuk menjamin keselamatan dan keamanan bagi personel pengawak radar agar terhindar dari bahaya paparan radiasi radar.

Metode Penelitian

Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah kuantitatif. Subyek penelitian ini adalah bangunan yang ada

di Satrad 211/Tanjung Kait. Menurut (Sugiyono, 2018) sampel merupakan bagian dari populasi yang karakteristiknya akan diselidiki, serta bisa mewakili keseluruhan dari populasi. Sampel penelitian ditentukan dengan menggunakan teknik *Purposive Sampling* (Arikunto, 2006) dengan mengambil data terhadap lokasi yang berpotensi terjadi paparan RFR dari Radar Pertahanan TNI AU Terhadap Personel Pengawak Radar.

Metode pengumpulan data untuk mendukung penelitian ini antara lain:

Metode Wawancara dan Diskusi

Metode wawancara dilakukan dengan melaksanakan wawancara kepada narasumber yang berkaitan dengan topik penelitian.

Studi Literatur

Studi literatur pada penelitian ini digunakan sebagai landasan dan menerapkan teori serta konsep yang berkaitan langsung maupun tidak langsung.

Metode Observasi

Teknik pengumpulan data observasi Paparan RFR dari Radar Pertahanan TNI AU Terhadap Personel Pengawak Radar Berdasarkan ICNIRP yaitu menggunakan *spectrum analyzer* dan *S-band proberesolusi* untuk mengukur

Specific Absorption Rate (SAR) dengan langkah sebagai berikut:

- a. Menentukan titik di sekitar radar dimana pengukuran SAR akan dilakukan.
- b. Melakukan pengukuran intensitas medan listrik (*electric field intensity/strength*) pada titik tersebut, dengan satuan V/m.
- c. Melakukan konversi dari intensitas medan listrik kepada densitas daya (*power density*) dengan menggunakan relasi:

$$S = E^2/Z$$

dimana

S = Densitas daya (W/m²)

E = Intensitas medan listrik

Z = Impedansi karakteristik dari jaringan tubuh manusia yang dievaluasi.

- d. Melakukan konversi dari satuan densitas daya (W/m²) kepada satuan SAR (W/kg) dengan memperhitungkan massa total yang terpapar radiasi RF.

Hasil dan Pembahasan

Analisis Perhitungan SAR

Dalam mencari nilai SAR dapat diperoleh dengan mengetahui:

- a. *Bandwidth*.

Besar *Bandwidth* Radar PSR Thomson TRS 2230D dari pengukuran dapat diketahui dari kenaikan *peak* yang terjadi, yaitu dari frekuensi 2,990 GHz

sampai 3,040 GHz sama dengan 50 MHz, sedangkan Radar SSR 12 MHz.

b. Daya.

Berdasarkan pengukuran, besar Daya Radar PSR dan SSR di beberapa titik lokasi dapat dilihat pada tabel 1. berikut:

Tabel 1. Hasil Pengukuran Daya Radar PSR dan SSR

Ruang	Jarak (m)	Daya PSR (dBm/Hz)	Daya SSR (dBm/Hz)
Mako	36	-108	-100
Lap Upacara	39	-75	-88
G. Tower	20	-113	-110
G. Ops (R. Olahraga)	30	-107	-95
Halaman Tower	19	-79	-80

Sumber: Diolah Peneliti, 2020

c. Gain.

Gain antenna monopole menurut (Orfanidis, 2010) yaitu 3,28 dBm, dan antenna SGH sesuai karakteristiknya adalah 20 dBm (L3Harris, 2015).

d. Antenna aperture atau luas efektif antenna (Ae).

Berdasarkan (Orfanidis, 2010) rumus antenna aperture untuk monopole $\frac{1}{4}$ lambda adalah:

$$Ae \text{ monopole} = 0,2610 \times \lambda^2$$

Sedangkan Antenna aperture SGH jenis WR284 adalah:

$$Ae \text{ SGH} = 0,4 \text{ m} \times 0,33 \text{ m} \text{ (L3Harris,2015)}$$

e. Material Properties.

Berdasarkan (Hirata, et al, 2010) konduktivitas jaringan tubuh manusia

bila dirata-rata adalah 0,3 S/m, dengan data Material Properties dalam tubuh 1 gram/cm³ yang akan dikonversikan terhadap kg/m³.

f. Electric Field atau Medan Listrik.

Electric Field merupakan efek yang ditimbulkan oleh keberadaan muatan listrik, dirumus dengan:

$$P_{antena} = \frac{P}{m^2} \times Ae \times G$$

$$\frac{P}{m^2} = \frac{P_{antena}}{Ae \times G}$$

$$E = \sqrt{\frac{P}{G \times Ae}} \times Zo$$

dimana:

E = Electric field (V/m)

P = Daya radar (Watt)

G = Gain (dimensionless)

Ae = Antenna aperture (m)

Zo = Karakteristik impedansi ruang terbuka $120 \pi = 377 \Omega$

g. Specific Absorption Rate (SAR).

SAR atau efek termal dari medan elektromagnetik didefinisikan sebagai daya yang diserap persatuan massa dan diukur dalam W/kg, dirumuskan dengan:

$$SAR = \frac{\sigma \times E^2}{m_d}$$

dimana:

σ = Kanduktifitas bahan (Siemens)

E = Electric field (V/m)

md = Mass density (kg/m³)

Berdasarkan hasil penelitian, untuk besar SAR adalah:

Tabel 2. Hasil Perhitungan SAR Radar PSR

Ruang	Jarak (m)	SAR (W/kg)
Mako	36	$6,789 \times 10^{-6}$
Lap Upacara	39	0,0135
G. Tower	20	$2,147 \times 10^{-6}$
G. Ops (R. Olahraga)	30	$8,5458 \times 10^{-6}$
Halaman Tower	19	0,0054

Sumber: Diolah Peneliti, 2020

Berdasarkan tabel nilai SAR diatas, kelima titik lokasi Satrad-211 menunjukkan aman dengan besaran dibawah 0,4 W/kg untuk SAR rata-rata seluruh tubuh (*whole-body average*), sesuai standar ICNIRP. Sedangkan perhitungan besar SAR pada radar SSR menggunakan antena *monopole* adalah:

Tabel 3. Hasil Perhitungan SAR Radar SSR

Ruang	Jarak (m)	SAR (W/kg)
Mako	36	$7,2007 \times 10^{-4}$
Lap Upacara	39	0,0114
G. Tower	20	$7,2007 \times 10^{-5}$
G. Ops (R. Olahraga)	30	0,0023
Halaman Tower	19	0,0720

Sumber: Diolah Peneliti, 2020

Melihat tabel nilai SAR untuk radar SSR diatas, dapatlah diketahui bahwa kelima titik di Satrad-211 aman dari paparan radiasi radar, sesuai yang telah ditetapkan oleh ICNIRP sebesar 0,4

W/kg untuk SAR rata-rata seluruh tubuh (*whole-body average*).

Analisis Jarak Aman dari Paparan Radiasi Radar Terhadap Personel Satrad-211/Tanjung Kait

Berdasarkan penelitian, perhitungan, serta pembahasan di atas, maka dapat diberikan analisa serta masukan tentang jarak aman dari paparan radiasi radar terhadap personel pengawak radar yang masuk dalam batas aman, berbahaya sehingga akan menjamin keselamatan dan keamanan para pekerja yang setiap harinya bekerja serta memberikan jawaban terhadap anggapan yang selama ini menghantui tentang anggapan terkait paparan RFR dari radar pertahanan TNI AU tipe Thomson TRS 2230D terhadap personel Satrad.

Dalam mencari batas jarak aman SAR, dilakukan di *outdoor* yang ada di Satrad-211 yaitu Halaman Tower serta Lapangan Upacara. Pencarian batas aman dilakukan melalui tahapan sebagai berikut:

- Mengetahui batas minimal SAR (SAR min) yang ditetapkan ICNIRP yaitu 0,4 W/kg rata-rata seluruh tubuh (ICNIRP, 1998).

b. Menghitung daya yang diterima dari ambang batas SAR (P_{rmin}) dengan perhitungan:

$$P_{rmin} = \frac{SAR_{min} \times M_d \times G \times A_e}{G \times Z_0}$$

Berdasarkan rumus di atas, dapat diperoleh nilai daya minimal untuk Radar PSR yaitu 0,0467 dBm, dan SSR 3,2093 dBm.

c. Mengetahui daya pancar radar (P_t), dimana untuk Radar SSR adalah 6. Watt dan Radar PSR 60.000 Watt.

d. Mengetahui daya yang diterima (P_r). Berdasarkan pengujian yang dilakukan di Lapangan Upacara jarak 39 meter besar daya yang diterima -75 dBm Radar PSR dan -88 dBm Radar SSR. Selanjutnya Halaman Tower jarak 19 meter, radar PSR -79 dBm dan SSR -80 dBm.

e. Menghitung Panjang Gelombang (λ), yang dirumuskan dengan:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

dimana frekuensi Radar PSR adalah 3×10^9 Hz, sedangkan frekuensi Radar SSR adalah 1030×10^6 Hz, serta kecepatan cahaya sebesar 3×10^8 . Sehingga besar panjang gelombang (λ) adalah:

$$\lambda_{Radar PSR} = \frac{3 \times 10^8}{3 \times 10^9} = 0,1 \text{ meter}$$

$$\lambda_{Radar SSR} = \frac{3 \times 10^8}{1030 \times 10^6} = 0,291 \text{ meter}$$

f. Mengetahui nilai direktivitas dari antenna (D_r) yang digunakan. Pada penelitian ini, direktivitas antenna SGH 20 dBm dan antenna monopole 3,28 dBm.

g. Mencari sudut elevasi (α) dan jarak miring (dd_{Slant}) dari antenna horn ke radar, dengan mengetahui besar :

- Jarak horizontal antara radar dengan antenna horn (dd). Pada pengujian di Lapangan Upacara adalah 39 meter dan Halaman Tower 19 meter.
- Tinggi antara antenna horn dengan permukaan tanah (h_{Antena}) yaitu 1,5 meter.
- Tinggi tower (h_{Tower}) adalah jarak dari permukaan tanah sampai dengan antenna radar. Tinggi tower di Satrad 211 yaitu 24,85 meter.
- Menghitung tinggi antara antenna horn dengan antenna radar (h_R).

$$h_R = h_{Tower} - h_{Antena} \\ = 23,35 \text{ meter}$$

- Menentukan besar sudut elevasi (α) dirumuskan dengan:

$$\text{Sudut elevasi } (\alpha) = \tan\left(\frac{h_R}{dd}\right)$$

Melalui rumus diatas, besar sudut elevasi yang ada di Lapangan Upacara yaitu $30,91^\circ$ dan Halaman Tower $50,86^\circ$.

- Mencari jarak miring antara antena horn dengan radar ($ddSlant$) yang dapat dirumuskan dengan :

$$dd\ Slant = \frac{hR}{\sin\alpha}$$

Sesuai rumus diatas, jarak miring antara antena horn saat di Lapangan Upacara adalah 45,45 meter dan Halaman Tower 30,10 meter.

- h. Pengerahan antena radar (Dt). Berdasarkan rumus yang dipresentasikan (Friis, 1946) tentang penggunaan area efektif antena untuk mengkarakterisasi kinerja antena, pengarahan dapat dicari dengan rumus:

$$\left(\frac{Pr}{Pt}\right) = Dt \times Dr \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2$$

$$Dt = \frac{Pr}{Dr \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 Pt}$$

dimana:

Dt = Directivity Transceiver (dB)

Dr = Directivity Receiver (dB)

Berdasarkan rumus diatas, maka perhitungan pengerahan antena radar (Dt) saat di Lapangan Upacara Radar PSR 8,598 dBm, SSR 5,729 dBm. Sedangkan Halaman Tower Radar PSR 1,501 dBm, SSR 15,853 dBm.

- i. Menentukan minimal jarak kemiringan aman SAR ($ddslant\ minSAR$).

$ddSlant\ SARmin$

$$= \sqrt{(Dt \times Dr) \times \frac{\lambda}{4\pi / \sqrt{Prth/Pt}}}$$

Melalui rumus diatas, minimal jarak kemiringan aman SAR Radar PSR dan SSR saat di Lapangan Upacara serta Halaman Tower dapat dilihat pada tabel berikut ini:

Tabel 4. Hasil Perhitungan Minimal Jarak Kemiringan Aman SAR

Area	Jarak (m)	Radar	$ddSlant\ SARmin$ (m)
Lap. Upacara	39	PSR	8,365
		SSR	7,678
Halaman Tower	19	PSR	3,495
		SSR	12,772

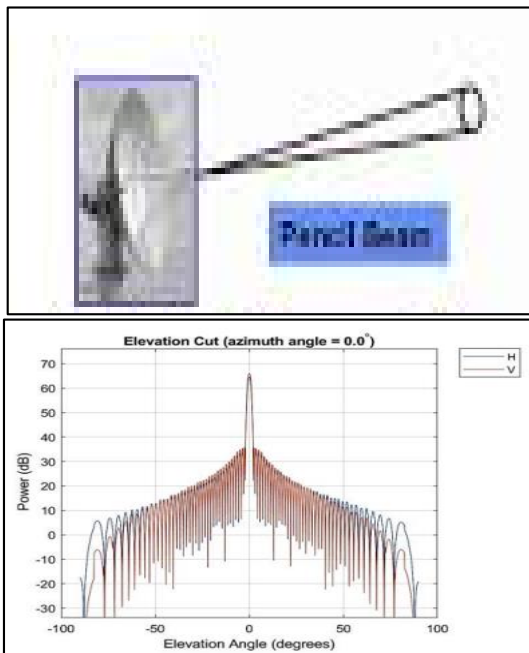
Sumber: Diolah Peneliti, 2020

- i. Menentukan batas minimal jarak horizontal aman SAR ($dd\ Horizontal\ SARmin$). Batas minimal jarak horizontal aman SAR dapat dihitung melalui rumus $ddHorizontalSARmin = ddSARmin \times \cos\theta$

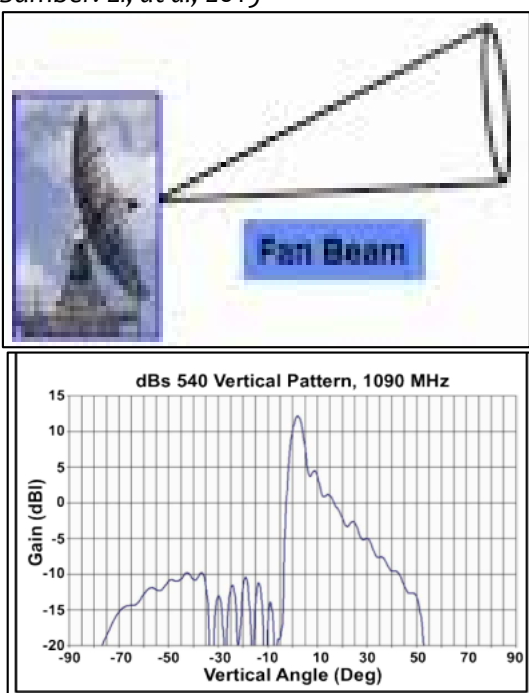
Melalui rumus diatas, minimal jarak horizontal aman SAR saat di Lapangan Upacara untuk radar PSR adalah 7,177 meter, radar SSR 6,5875 meter. Selanjutnya di Halaman Tower 2,206 meter untuk PSR dan 8,0614 meter SSR.

Sesuai gambar diatas, ketika di Lapangan Upacara minimal jarak horizontal aman SAR untuk radar PSR lebih besar dibandingkan untuk radar SSR sedangkan saat di Halaman Tower

minimal jarak horizontal aman SAR untuk radar PSR lebih kecil dibandingkan dengan radar SSR. Hal ini dikarenakan pola radiasi PSR dan SSR yang berbeda. Berikut ini adalah gambar pola radiasi keduanya:



Gambar 1. Pola Radiasi Radar PSR
 Sumber: Li, et al, 2019



Gambar 2. Pola Radiasi Radar SSR
 Sumber: Weber, et al, 2014

Dari gambar pola radiasi PSR dan SSR diatas, dapat diketahui bahwa PSR mempunyai pola radiasinya *pencil beam* yang *sidelobe* ke arah tanah jauh lebih kecil, sehingga ketika didekat tower PSR lebih lemah daripada SSR. Sedangkan pola radiasi SSR adalah *fan beam* (*Cosecant squared pattern*) yang mempunyai *sidelobe* lebih besar ke arah tanah, sehingga ketika didekat tower SSR lebih kuat dibandingkan PSR.

Validasi telah dilakukan dengan perhitungan jarak paparan radiasi Base Transceiver Station (BTS) berdasarkan standar World Health Organization (WHO) oleh (Ramadhani, et al, 2019) yang ditunjukkan pada tabel berikut:

Tabel 5. Validasi Perhitungan Jarak Aman Paparan Radiasi

Frek (MHz)	Power (dBm)	Gain (dBi)	Jarak (m)	Keterangan
900	30	10	1,864	Ramadhani
900	30	10	1,849	Peneliti

Sumber: Diolah Peneliti, 2020

Berdasarkan tabel diatas, menunjukkan bahwa jarak aman paparan radiasi yang telah dikembangkan peneliti sudah sesuai dengan hasil penelitian sebelumnya, dengan selisih 0,015 meter atau 0,8%. Hal ini disebabkan karena perbedaan karakteristik media yang digunakan. Meskipun demikian, masih menghasilkan nilai yang relatif sama.

Oleh karena itu, perhitungan jarak paparan yang digunakan peneliti sudah dinyatakan valid untuk digunakan.

Kesimpulan, Rekomendasi, dan Pembatasan

Adapun kesimpulan penelitian ini adalah Berdasarkan analisis perhitungan nilai SAR di Satrad 211/Tanjung Kait, besar SAR untuk Radar PSR dan Radar SSR yang dilakukan di lima titik menunjukkan nilai aman dengan besaran dibawah 0,4 W/kg untuk SAR rata-rata seluruh tubuh (*whole-body average*), hal ini sesuai standar yang telah dikeluarkan oleh ICNIRP. Terkait proteksi, bangunan merupakan sarana pelindung terhadap paparan radiasi serta tinggi tower sangat berpengaruh terhadap besar kecilnya nilai SAR.

Untuk mencegah bahaya paparan radiasi radar dan sejauh mana dampak radiasi radar bagi personel Satrad saat berada di luar ruangan, diberikan analisis serta masukan tentang jarak minimum kemiringan aman SAR, dimana jarak minimum kemiringan aman SAR dengan sudut $30,91^\circ$ adalah 8,36 meter radar PSR, radar SSR 7,67 meter, sedangkan apabila sudut $50,86^\circ$ untuk radar PSR 3,49 meter, dan radar SSR 12,77 meter.

Dalam menentukan keselamatan dan keamanan terhadap paparan RFR dari radar pertahanan TNI AU tipe Thomson TRS 2230D di Satrad 211/Tanjung Kait, diberikan perhitungan tentang minimal jarak horizontal aman SAR, dimana saat di Lapangan Upacara adalah 7,17 meter untuk radar PSR, dan 6,58 meter untuk radar SSR sedangkan saat di Halaman Tower minimal jarak horizontal aman SAR adalah 2,20 meter untuk radar PSR, dan 8,06 meter untuk radar SSR.

Melalui metode perhitungan yang telah dijabarkan peneliti, dapatlah direkomendasikan kepada Komandan Satuan Radar (Dansatrad), Panglima Komandan Sektor (Pangkosek), serta Panglima Komando Pertahanan Udara Nasional (Pangkohanudnas) untuk melaksanakan analisa besar paparan RFR di seluruh Satrad di Indonesia untuk menjamin keamanan dan keselamatan personel pengawak radar.

Dalam menjamin keamanan dan keselamatan personel pengawak radar yang ada di Satrad 211/Tanjung Kait, dapat dilakukan pembaharuan SOP terkait pembatasan zona terhadap tingkat bahaya (*hazard*) dari paparan radiasi radar, terutama saat melakukan aktifitas di luar ruangan yang tidak ada

penghalang terhadap pengarahannya radiasi Radar PSR maupun Radar SSR.

Penelitian berikutnya diharapkan dapat dilakukan perbandingan perhitungan paparan RFR di beberapa Satrad Pertahanan TNI AU.

Daftar Pustaka

- Arikunto. (2006). *Prosedur Penelitian Suatu Pendekatan Praktek*. Rineka Cipta. Jakarta.
- Friis, HT. (1946). Catatan tentang Formula Transmisi Sederhana. *IRE Proc* 34 (5) : 254-256. doi : 10.1109/JRPROC.1946.234568. S2CID 51630329.
- Hirata, Akimasa, et al. (2010). Effect of the averaging volume and algorithm on the in situ electric field for uniform electric- and magnetic-field exposures. *Physics in Medicine and Biology* 55(9): N243-52. DOI: 10.1088/0031-9155/55/9/N03.
- ICNIRP. (1998). Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic field (up to 300 GHz). *Helt Phys*, Vol 7, No.4 , pp.494-523.
- L3Harris. Standard and Hight Gain Horn Antenna For RF Microwave. Retrieved from <https://www.atmmicrowave.com/waveguide/horn-antenna-standard-gain-wide-band/>, diakses pada 9 Desember 2020.
- Li Zhe, at al. (2019). Phased-Array Radar System Simulator (PASIM) : Development and Simulation Result Assessment. *Remote Sens.* 11, 422; doi:10.3390/rs11040422.
- Orfanidis, Sophocles J. (2010). *Signal Processing*. New Brunswick: Rutgers University.
- Ramadhani, Desi Nurqamarina, et al. (2019). Perhitungan jarak Paparan

Radiasi Base Transceiver Station pada Frekuensi 900 MHz, 1800 MHz, dan 2100 MHz Berdasarkan Standar World Health Organization. *Buletin Pos dan Telekomunikasi* Vol. 17 No. 2 : 111-128.

Sugiyono. (2018). *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D*. ISBN: 979-8433-64-0.

Weber, et al. (2014). *Secondary Surveillance Phased Array Radar (SSPAR): Initial Feasibility Study*. Massachusetts Institute of Technology. Washington, D.C. 20591.