



Perhitungan Jarak Paparan Radiasi *Base Transceiver Station* pada Frekuensi 900 MHz, 1800 MHz, dan 2100 MHz Berdasarkan Standar *World Health Organization*

Calculation of Base Transceiver Station Radiation Exposure Distance at Frequencies 900 MHz, 1800 MHz, and 2100 MHz Based on World Health Organization Standard

Desi Nurqamarina Ramadhani¹, Ahmad Tri Hanuranto², Agus Dwi Prasetyo³, Nachwan Mufti Adriansyah⁴

^{1, 2, 3, 4}Telkom University

^{1, 2, 3, 4}Jl. Telekomunikasi, Terusan Buah Batu, Bandung 40257, Jawa Barat, Indonesia

Email: ¹desinurqamarina15@gmail.com, ²athanuranto@telkomuniversity.ac.id, ³adprasetyo@telkomuniversity.ac.id,

⁴nachwanma@telkomuniversity.ac.id

INFORMASI ARTIKEL

Naskah diterima 01 November 2019

Direvisi 18 Desember 2019

Disetujui 18 Desember 2019

Keywords:

Radiation

Electromagnetic Wave

Power Density

WHO

Kata kunci :

Radiasi

Gelombang Elektromagnetik

Rapat Daya

WHO

ABSTRACT

Exposure to electromagnetic wave radiation from Base Transceiver Station can cause a negative impact on human health, can cause headache, brain tumors, cancer, and fetal disorders in pregnant women. In addition, to minimize the adverse effects of electromagnetic radiation exposure on the human body, the construction of Base Transceiver Station must comply with regulations regarding the safe distance of Base Transceiver Station from residential areas, such as electromagnetic field regulations that have been implemented in South Korea. From the results of mathematical calculations in accordance with World Health Organization standards and electromagnetic field regulations in South Korea, it can be seen that the minimum safe distance of Base Transceiver Station to residential areas is influenced by the frequency, gain, and power of the Base Transceiver Station. This can be seen in the results of the classification of the radiation zone based on electric fields, with the use of 30 dBm power and 20 dBi gain with a frequency of 900 MHz for the Class 2 zone distance, which is 14.317 m from BTS, for 1800 MHz frequency is 7.668 m from BTS, and for 2100 MHz frequency is 2.702 m from BTS. As for the use of 43 dBm power and 20 dBi gain with a frequency of 900 MHz for the Class 2 zone distance, which is 39.86 m from BTS, for the 1800 MHz frequency is 19.939 m from BTS, and for 2100 MHz frequency is 13.638 m from the BTS.

ABSTRAK

Paparan radiasi gelombang elektromagnetik dari BTS dapat berdampak buruk bagi kesehatan manusia, yaitu dapat menimbulkan sakit kepala, tumor otak, kanker, dan gangguan janin pada ibu hamil. Oleh karena itu, untuk meminimalisir dampak buruk paparan radiasi gelombang elektromagnetik terhadap tubuh manusia, pembangunan BTS harus memenuhi regulasi mengenai minimal jarak aman BTS dengan pemukiman warga, seperti regulasi EMF yang sudah diterapkan di Korea Selatan. Dari hasil perhitungan matematis sesuai dengan standar WHO dan regulasi EMF di Korea Selatan, dapat diketahui bahwa minimal jarak aman BTS terhadap pemukiman warga dipengaruhi oleh frekuensi, *gain*, dan *power* pada BTS tersebut. Hal tersebut dapat dilihat pada hasil klasifikasi zona radiasi berdasarkan *electric field*, dengan penggunaan *power* 30 dBm dan *gain* 20 dBi dengan frekuensi 900 MHz untuk jarak zona *Class 2*, yaitu 14.317 m dari BTS, untuk frekuensi 1800 MHz adalah 7.668 m dari BTS, dan untuk frekuensi 2100 MHz adalah 2.702 m dari BTS. Sedangkan untuk penggunaan *power* 43 dBm dan *gain* 20 dBi dengan frekuensi 900 MHz untuk jarak zona *Class 2*, yaitu 39.86 m dari BTS, untuk frekuensi 1800 MHz adalah 19.939 m dari BTS, dan untuk frekuensi 2100 MHz adalah 13.628 m dari BTS.

1. Pendahuluan

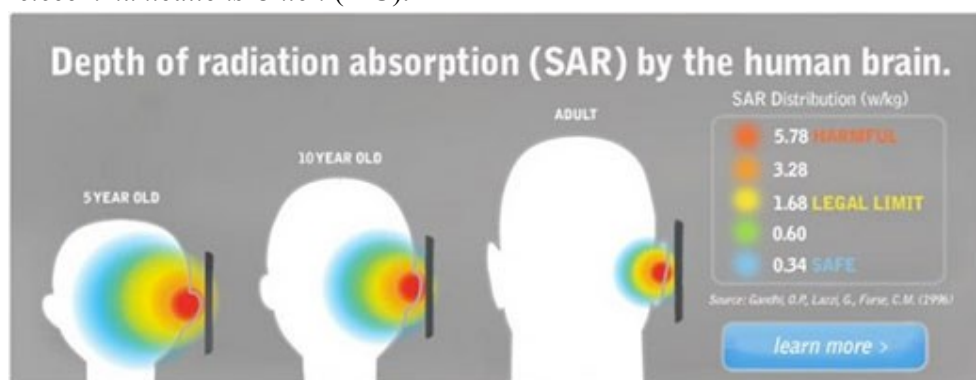
Teknologi telekomunikasi merupakan salah satu teknologi yang memiliki perkembangan yang sangat pesat. Seiring dengan berkembangnya teknologi telekomunikasi yang semakin canggih, maka jumlah penggunaan telepon seluler akan semakin meningkat. Indonesia merupakan salah satu negara dengan tingkat penggunaan perangkat telekomunikasi terbesar. Hal ini menyebabkan pula semakin meningkatnya pembangunan *Base Transceiver Station* (BTS) (Ardiatna et al., 2013) (Hananto, 2013).

Perangkat telekomunikasi di Indonesia rata-rata menggunakan frekuensi sebesar 450 MHz, 900 MHz, 1800 MHz, 2100 MHz, dan tambahan alokasi frekuensi pada 2300 MHz. Selain dapat memudahkan manusia untuk berkomunikasi satu sama lain, perangkat telekomunikasi juga dapat memberikan dampak yang dapat mempengaruhi kesehatan tubuh manusia (Kesari, Siddiqui, Meena, Verma, & Kumar, 2013). Hal ini dikarenakan perangkat telekomunikasi mengeluarkan gelombang elektromagnetik yang dapat menyebabkan paparan radiasi elektromagnetik atau *Electromagnetic Field* (EMF) (India & Telecommunications, n.d.). Fakta di lapangan membuktikan apabila manusia terpapar radiasi gelombang elektromagnetik dalam kurun waktu yang lama dan intensitas yang besar, dapat menyebabkan peningkatan suhu tubuh sehingga mempengaruhi sel-sel tubuh khususnya di bagian kepala sekitar telinga (India & Telecommunications, n.d.) (Hananto, 2013).

Masyarakat di beberapa wilayah Indonesia sering kali menyatakan keluhannya, bahwa pemukiman mereka yang berjarak dekat dengan BTS terkena paparan radiasi gelombang elektromagnetik yang berdampak bagi kesehatan, salah satunya ialah sakit kepala (India & Telecommunications, n.d.). Namun, hal ini masih menjadi perdebatan apakah gangguan kesehatan tersebut benar karena dampak dari paparan radiasi gelombang elektromagnetik atau karena faktor-faktor lain.

International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) telah menetapkan standar durasi penggunaan telepon seluler yaitu, maksimal enam menit dalam sekali melakukan panggilan telepon (Workgroup, 2015). Sebuah studi mengatakan bahwa anak-anak lebih banyak menyerap paparan radiasi gelombang elektromagnetik, seperti pada Gambar 1. Hal ini disebabkan karena diameter kepala dan otak anak-anak yang masih kecil serta kondisi tulang tengkorak yang lebih tipis dibandingkan dengan tengkorak orang dewasa (Kesari et al., 2013). Tidak hanya berdampak pada manusia saja, tetapi hewan-hewan yang berukuran kecil seperti udang, ikan-ikan kecil, dan serangga-serangga juga terkena paparan radiasi gelombang elektromagnetik (India & Telecommunications, n.d.).

Mayoritas masyarakat Indonesia belum mengetahui dampak buruk paparan radiasi gelombang elektromagnetik terhadap kesehatan tubuh. Meskipun dampak buruk tersebut tidak akan dirasakan dalam jangka waktu yang dekat, namun akan menjadi berbahaya jika dibiarkan secara terus menerus. Maka dari itu, penting bagi masyarakat Indonesia untuk mengetahui dampak buruk paparan radiasi gelombang elektromagnetik terhadap kesehatan tubuh manusia dan menjaga jarak aman antara pemukiman warga dengan BTS sesuai dengan standar yang telah ditetapkan oleh *World Health Organization* (WHO) dan *International Telecommunications Union* (ITU).



Gambar 1. Radiasi gelombang elektromagnetik pada otak manusia (Freeland, 2016).

2. Tinjauan Pustaka

2.1 Standar Paparan Gelombang Elektromagnetik Menurut WHO

ICNIRP merupakan lembaga yang telah disahkan oleh WHO dan ITU yang menyatakan bahwa, terdapat perbedaan antara standar besarnya paparan radiasi gelombang elektromagnetik antara masyarakat umum yang bermukim di lingkungan publik atau *General Public* dengan pekerja lapangan yang kehidupan sehari-harinya lebih sering berada di lingkungan dengan intensitas gelombang elektromagnetik yang tinggi atau *Occupational*. Perbedaan standar besarnya paparan radiasi gelombang elektromagnetik tersebut ditinjau berdasarkan *electric field* yang dinyatakan dalam satuan Volt per meter (V/m) dan *power density* yang dinyatakan dalam satuan Watt per meter kubik (W/m²).

Tabel 1 merupakan standar paparan radiasi gelombang elektromagnetik yang telah ditetapkan oleh WHO. Pada tabel tersebut, terdapat perbedaan standar paparan radiasi gelombang elektromagnetik antara *general public* dan *occupational*. Hal tersebut dikarenakan, pekerja lapangan yang kehidupan sehari-harinya berada di lingkungan dengan intensitas paparan radiasi gelombang elektromagnetik lebih tinggi, memiliki tingkat kekebalan tubuh terhadap paparan radiasi gelombang elektromagnetik yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan masyarakat umum yang bermukim di lingkungan publik.

Tabel 1. Standar paparan radiasi untuk *general public* dan *occupational*.

Frequency Range	Electric Field Strength (V/m)		Equivalent Plane Wave Power Density S_{eq} (W/m ²)	
	General Public	Occupational	General Public	Occupational
1 - 25 Hz	10,000	20,000	-	-
0.025 - 0.82 kHz	$250/f_{(kHz)}$	$500/f_{(kHz)}$	-	-
0.82 - 3 kHz	$250/f_{(kHz)}$	610	-	-
3 - 1000 kHz	87	610	-	-
1 - 10 MHz	$87/f^{1/2}_{(MHz)}$	$610/f_{(MHz)}$	-	-
10 - 400 MHz	28	61	2	10
400 - 2000 MHz	$1.357f^{1/2}_{(MHz)}$	$3f^{1/2}_{(MHz)}$	$f/200$	$f/40$
2 - 300 GHz	61	137	10	50

Sumber : (ITU, 2014).

Terdapat beberapa negara yang telah menerapkan regulasi mengenai paparan radiasi gelombang elektromagnetik yang dipancarkan oleh BTS berdasarkan standar yang sudah ditetapkan oleh WHO. Negara-negara tersebut adalah Brazil, Benin, Korea Selatan, Israel, dan India (ITU-R, 2005). Namun, Indonesia belum menerapkan regulasi mengenai paparan radiasi gelombang elektromagnetik yang dipancarkan oleh BTS.

Berdasarkan standar paparan radiasi gelombang elektromagnetik untuk *general public* seperti pada Tabel 1, dapat diketahui bahwa BTS dengan frekuensi 900 MHz memiliki standar paparan medan listrik sebesar 40.71 V/m dan *power density* sebesar 4.5 W/m², BTS dengan frekuensi 1800 MHz memiliki standar paparan medan listrik sebesar 57.57 V/m dan *power density* sebesar 9 W/m², dan BTS dengan frekuensi 2100 MHz memiliki standar paparan medan listrik sebesar 61 V/m dan *power density* sebesar 10 W/m².

2.2 Klasifikasi Zona Radiasi BTS

Akibat dari gelombang elektromagnetik pada BTS yang dapat menimbulkan dampak buruk bagi kesehatan manusia, maka diperlukan minimal jarak aman antara BTS dengan pemukiman warga untuk

menghindari paparan radiasi gelombang elektromagnetik. Salah satu negara yang telah menerapkan regulasi EMF mengenai batas jarak aman BTS dengan pemukiman warga adalah Korea Selatan.

Tabel 2 merupakan rincian klasifikasi zona radiasi yang telah diterapkan di Korea Selatan. Klasifikasi zona radiasi terbagi menjadi empat zona yaitu, *Class 1*, *Class 2*, *Caution*, dan *Warning*. Rincian klasifikasi zona radiasi tersebut dibagi berdasarkan standar paparan radiasi yang telah ditetapkan oleh WHO untuk *general public* dan *occupational*.

Tabel 2. Rincian klasifikasi zona radiasi di Korea Selatan.

Zona Radiasi	Rincian Klasifikasi Zona Radiasi
<i>Class 1</i>	EMF \leq 50% dari standar untuk <i>general public</i>
<i>Class 2</i>	50% dari standar untuk <i>general public</i> \leq EMF < standar untuk <i>general public</i>
<i>Caution</i>	standar untuk <i>general public</i> \leq EMF < standar untuk <i>occupational</i>
<i>Warning</i>	standar untuk <i>occupational</i> < EMF

Sumber: (World Health Organization, 2014)

2.3 Pengaruh Radiasi BTS di Bawah Standar WHO

Pemukiman penduduk yang berjarak dekat dengan BTS terancam dengan paparan radiasi gelombang elektromagnetik dari BTS yang dapat mengganggu kesehatan tubuh manusia. Namun, WHO telah menetapkan standar paparan radiasi gelombang elektromagnetik dari BTS untuk meminimalisir gangguan kesehatan akibat dari paparan radiasi tersebut. Selain itu, Korea Selatan memiliki klasifikasi zona radiasi gelombang elektromagnetik yang dipancarkan oleh BTS, agar pemukiman penduduk berada di zona yang aman sesuai dengan standar yang sudah ditetapkan oleh WHO.

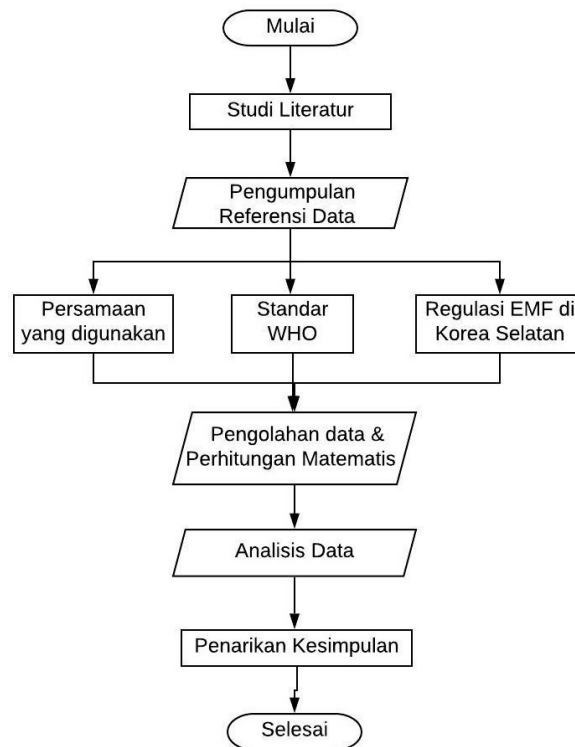
Gangguan kesehatan akibat dari paparan radiasi gelombang elektromagnetik tidak dapat dirasakan secara langsung. Namun, semakin lama terpapar radiasi gelombang elektromagnetik, maka akan semakin membahayakan kesehatan tubuh. Apabila pemukiman penduduk berada pada lokasi yang terlalu dekat dengan BTS atau tidak sesuai dengan standar WHO, maka gangguan kesehatan yang dapat ditimbulkan adalah sakit kepala (India & Telecommunications, n.d.), tumor otak (Kesari et al., 2013), kanker (Kesari et al., 2013), dan bahkan gangguan janin pada ibu hamil karena pembentukan *deoxyribonucleic acid* (DNA) yang tidak sempurna (Valberg, van Deventer, & Repacholi, 2007) (Habash, 2002).

Namun, apabila lokasi pemukiman penduduk sudah sesuai dengan standar yang ditetapkan oleh WHO, maka akan meminimalisir gangguan kesehatan akibat dari paparan radiasi gelombang elektromagnetik. Sebuah studi mengenai penyakit kanker menyatakan bahwa, tidak ditemukannya sel-sel penyebab kanker dan kerusakan pada DNA akibat dari paparan radiasi gelombang elektromagnetik dalam tingkat yang rendah (IEEE, 2006).

3. Metode Penelitian

3.1 Diagram Alir Penelitian

Dalam penelitian ini, terdapat beberapa tahapan yang harus diselesaikan. Tahapan-tahapan tersebut diilustrasikan dalam diagram alir seperti pada Gambar 2, dengan tahap awal adalah studi literatur yang dilanjutkan dengan pengumpulan referensi data mengenai persamaan-persamaan yang akan digunakan, standar paparan radiasi gelombang elektromagnetik yang sudah ditetapkan oleh WHO, dan regulasi EMF di Korea Selatan. Setelah data yang dibutuhkan sudah terkumpul, maka akan dilakukan pengolahan data dan perhitungan matematis yang akan dilanjutkan dengan analisis hasil serta penarikan kesimpulan.



Gambar 2. Diagram alir pengerjaan penelitian.

3.2 Skenario Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk meninjau mengenai minimal jarak aman dari paparan radiasi gelombang elektromagnetik yang dipancarkan oleh BTS terhadap tubuh manusia, agar terhindar dari dampak paparan radiasi gelombang elektromagnetik berdasarkan standar WHO. Dari hasil tersebut, akan dibandingkan dengan klasifikasi zona radiasi gelombang elektromagnetik berdasarkan regulasi EMF yang sudah diterapkan di Korea Selatan. Analisis yang dilakukan pada penelitian ini menggunakan enam skenario penelitian, yaitu:

1. Skenario I, BTS dengan frekuensi 900 MHz, *power* 30 dBm, dan *gain* 10 - 20 dBi
2. Skenario II, BTS dengan frekuensi 900 MHz, *power* 43 dBm, dan *gain* 10 - 20 dBi
3. Skenario III, BTS dengan frekuensi 1800 MHz, *power* 30 dBm, dan *gain* 10 - 20 dBi
4. Skenario IV, BTS dengan frekuensi 1800 MHz, *power* 43 dBm, dan *gain* 10 - 20 dBi
5. Skenario V, BTS dengan frekuensi 2100 MHz, *power* 30 dBm, dan *gain* 10 - 20 dBi
6. Skenario VI, BTS dengan frekuensi 2100 MHz, *power* 43 dBm, dan *gain* 10 - 20 dBi

3.3 *Near Field* dan *Far field*.

Seperti pada Gambar 3, wilayah paparan radiasi gelombang elektromagnetik terbagi menjadi tiga, yaitu *reactive near field* atau *near field*, *radiating near field* atau *transition zone*, dan *radiating far field* atau *far field*. *Reactive near field* atau *near field* adalah wilayah yang paling dekat dengan antenna pemancar dan bidang reaktifnya mendominasi bidang radiasi gelombang elektromagnetik. Jarak *near field* hingga *transition zone* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 1), untuk menghitung λ dapat menggunakan persamaan 2), dan untuk menghitung diameter antenna dapat menggunakan persamaan 3) (Harvey Lehpamer, 2010).

$$R = 0.62 \left(\frac{D^3}{\lambda} \right)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots 1)$$

$$\lambda = \frac{c}{f} \dots\dots\dots 2)$$

$$G = 20\log(f) + 20\log(D) - 52.5 \dots\dots\dots 3)$$

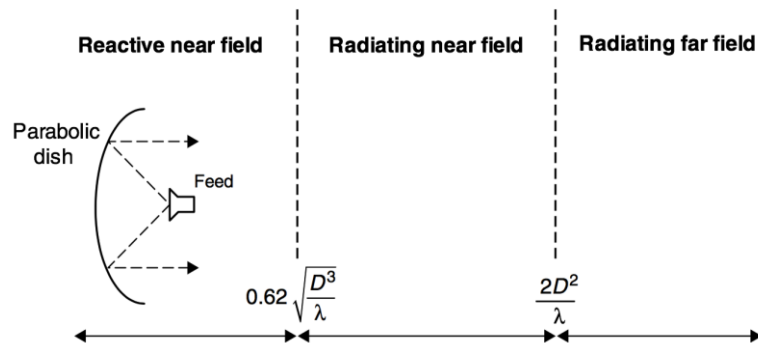
Radiating near field atau *transition zone* merupakan wilayah di antara *reactive near field* dan *radiating far field*. Pada *transition zone*, bidang radiasi mendominasi dan distribusi bidang sudut tergantung pada jarak dari antenna pemancar. Jarak *transition zone* hingga *far field* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 4) yang dinyatakan dalam satuan *feet* (ft) (Harvey Lehpamer, 2010).

$$R_o \square \frac{2 \square D^2}{\lambda} \dots\dots\dots 4)$$

Dimana:

- R : Jarak *near field* hingga *transition zone* (ft)
- R_o : Jarak *transition zone* hingga *far field* (ft)
- D : Diameter antenna (ft)
- λ : Panjang gelombang (m)
- c : Kecepatan cahaya ($3 \cdot 10^8$ m/s)
- f : Frekuensi (MHz)
- G : *Gain* (dBi)

Sedangkan *radiating far field* adalah wilayah yang memiliki pola radiasi gelombang elektromagnetik yang tidak bergantung pada jarak (Harvey Lehpamer, 2010). Wilayah paparan radiasi gelombang elektromagnetik yang terdiri dari *reactive near field*, *transition zone*, dan *radiating far field* dapat diilustrasikan dalam Gambar 3.



Gambar 3. Wilayah *reactive near field*, *transition zone*, dan *radiating far field* (Harvey Lehpamer, 2010).

3.4 Perhitungan Kuat Medan

Perhitungan kuat medan dalam penelitian ini menggunakan kriteria *far field*, karena memiliki pola radiasi gelombang elektromagnetik yang tidak bergantung pada jarak. Dalam perhitungan kuat medan terdapat dua komponen yaitu, *power density* dan *electric field*.

Power density yang digunakan dalam keadaan *far field* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 5) yang dinyatakan dalam satuan Watt per meter kubik (W/m^2) (Harvey Lehpamer, 2010) (ITU-R, 2005):

$$S = \frac{P_r \square G_r}{4\pi \square r^2} \dots\dots\dots 5)$$

Electric field yang digunakan dalam keadaan *far field* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 6) yang dinyatakan dalam satuan Volt per meter (V/m). (ITU-R, 2005):

$$E = \sqrt{\frac{Z_o}{4\pi}} \square \sqrt{\frac{P_r \square G_r}{r}} \square C \dots\dots\dots 6)$$

Dimana:

P_T : Daya pada antenna pemancar (W)

G_T : Gain pada antenna pemancar (dBi)

r : Jarak dari antenna pemancar (m)

Z_0 : Karakteristik impedansi di ruang bebas (337 Ω)

C : Faktor perhitungan karakteristik dari arah antenna pemancar ($0 \leq C \leq 1$). $C = 1$, untuk arah utama radiasi.

4. Hasil Penelitian dan Pembahasan

4.1 Hasil Perencanaan Klasifikasi Zona Radiasi

Berdasarkan standar *electric field* dan *power density* yang sudah ditetapkan oleh WHO seperti pada Tabel 1, maka dapat diketahui standar *electric field* dan *power density* untuk BTS dengan penggunaan frekuensi 900 MHz, 1800 MHz, dan 2100 MHz. Perencanaan klasifikasi zona radiasi BTS tersebut mengacu pada regulasi EMF yang telah diterapkan di Korea Selatan seperti pada Tabel 2. Tabel 3 merupakan contoh perhitungan perencanaan klasifikasi zona radiasi untuk frekuensi 900 MHz berdasarkan dari standar WHO pada Tabel 1 dan regulasi EMF di Korea Selatan pada Tabel 2. Contoh perhitungan pada Tabel 3, akan digunakan juga untuk menentukan perencanaan status klasifikasi zona radiasi untuk frekuensi 1800 MHz dan 2100 MHz seperti pada Tabel 4.

Tabel 3. Contoh perhitungan klasifikasi zona radiasi untuk frekuensi 900 MHz.

Perhitungan Klasifikasi Zona Radiasi untuk Frekuensi 900 MHz	
General Public	$E = 1.357 \square f^{\frac{1}{2}}$
	$E = 1.357 \square 900^{\frac{1}{2}}$
	$E = 40.71V/m$
Occupational	$E = 3 \square f^{\frac{1}{2}}$
	$E = 3 \square 900^{\frac{1}{2}}$
	$E = 90V/m$
Class 1	EMF $\leq 50\% \square 40.71 V/m$
	EMF $\leq 20.35 V/m$
Class 2	$50\% \square 40.71 V/m \leq EMF \leq 40.71 V/m$
	$20.35 V/m \leq EMF \leq 40.71 V/m$
Caution	$40.71 V/m \leq EMF \leq 90 V/m$
Warning	$90 V/m \leq EMF$

Tabel 4. Rancangan status klasifikasi zona radiasi BTS.

Status Zona Radiasi	Frekuensi		
	900 MHz	1800 MHz	2100 MHz
Class 1	EMF $\leq 20.35 V/m$	EMF $\leq 28.78 V/m$	EMF $\leq 30.5 V/m$
Class 2	$20.35 V/m \leq EMF < 40.71 V/m$	$28.78 V/m \leq EMF < 57.57 V/m$	$30.5 V/m \leq EMF < 61 V/m$
Caution	$40.71 V/m \leq EMF < 90 V/m$	$57.57 V/m \leq EMF < 127.27 V/m$	$61 V/m \leq EMF < 137 V/m$
Warning	$90 V/m < EMF$	$127.27 V/m < EMF$	$137 V/m < EMF$

4.2 Hasil Perhitungan *Electric Field* dan *Power Density*

Tabel 5 merupakan contoh perhitungan standar jarak radius klasifikasi zona radiasi gelombang elektromagnetik berdasarkan *elektric field* dan *power density* untuk frekuensi 900 MHz dengan penggunaan *power* 43 dBm dan *gain* 20 dBi.

Tabel 5. Contoh perhitungan standar jarak radius klasifikasi zona radiasi gelombang elektromagnetik.

Perhitungan	Standar Jarak Berdasarkan <i>Electric Field</i> (m)	Standar Jarak Berdasarkan <i>Power Density</i> (m)	
Diameter Antena		$G = 20 \log f(\text{MHz}) + 20 \log D(\text{feet}) - 52.5$ $\log D = \frac{G(\text{dB}) + 52.5 - 20 \log f(\text{MHz})}{20}$ $\log D = \frac{20 + 52.5 - 20 \log 900}{20} = 0.67$ $D = 4.677 \text{ ft} = 1.425 \text{ m}$	
Jarak <i>Near Field</i>		$R = 0.62 \cdot \left(\frac{D^3}{\lambda} \right)^{\frac{1}{2}}; \lambda = 0.333 \text{ m}$ $R = 0.62 \cdot \left(\frac{1.425^3}{0.333} \right)^{\frac{1}{2}} = 1.827 \text{ m}$	
Jarak <i>Transition Zone</i>		$R_o \approx \frac{2 \cdot D^2}{\lambda}$ $R_o \approx \frac{2 \cdot 1.425^2}{0.333} = 12.195 \text{ m}$	
Jarak Zona <i>Class 2</i>	$E = \sqrt{\frac{Z_o}{4\pi}} \cdot \sqrt{\frac{P_T \cdot G_T}{r}} \text{ [C]}$ $r = \frac{337 \cdot P_T \cdot G_T}{4\pi \cdot E^2}$ $r = \frac{337 \cdot 19.95 \cdot 20}{4\pi \cdot 20.35^2} = 25.838 \text{ m}$ $r_{total} = R + R_o + r$ $r_{total} = 1.827 + 12.195 + 25.838 = 39.86 \text{ m}$	-	
Jarak Zona <i>Caution</i>		$r = \frac{337 \cdot 19.95 \cdot 20}{4\pi \cdot 40.71^2} = 6.456 \text{ m}$ $r_{total} = 1.827 + 12.195 + 6.456 = 20.478 \text{ m}$	-
Jarak Zona <i>Warning</i>		$r = \frac{337 \cdot 19.95 \cdot 20}{4\pi \cdot 90^2} = 1.321 \text{ m}$ $r_{total} = 1.827 + 12.195 + 1.321 = 15.343 \text{ m}$	-
Jarak Zona <i>General Public</i>		$S = \frac{P_T \cdot G_T}{4\pi \cdot r^2}$ $r = \sqrt{\frac{P_T \cdot G_T}{4\pi \cdot S}}$ $r = \sqrt{\frac{19.95 \cdot 100}{4\pi \cdot 4.5}} = 5.939 \text{ m}$ $r_{total} = 1.827 + 12.195 + 5.939 = 19.961 \text{ m}$	
Jarak Zona <i>Occupational</i>		$r = \sqrt{\frac{19.95 \cdot 100}{4\pi \cdot 22.5}} = 2.656 \text{ m}$ $r_{total} = 1.827 + 12.195 + 2.656 = 16.678 \text{ m}$	

Hasil perhitungan matematis mengenai *electric field* dan *power density* yang sudah disesuaikan dengan standar WHO dan regulasi zona radiasi BTS yang sudah ditetapkan di Korea Selatan, dapat dilihat pada Tabel 6 untuk BTS dengan frekuensi 900 MHz, Tabel 7 untuk BTS dengan frekuensi 1800 MHz, dan Tabel 8 untuk BTS dengan frekuensi 2100 MHz.

Tabel 6. Standar EMF dan *power density* BTS untuk dengan frekuensi 900 MHz.

Frekuensi (MHz)	Power (dBm)	Gain (dBi)	Standar Jarak Berdasarkan <i>Electric Field</i> (m)			Standar Jarak Berdasarkan <i>Power Density</i> (m)	
			Warning	Caution	Class 2	Occupational	General Public
900	30	11	1.952	2.093	2.628	2.127	2.387
900	30	12	2.427	2.582	3.165	2.624	2.917
900	30	13	2.832	2.999	3.63	3.054	3.382
900	30	14	3.755	3.935	4.615	4.007	4.375
900	30	15	4.672	4.865	5.594	4.964	5.365
900	30	16	5.245	5.451	6.229	5.568	6.032
900	30	17	7.258	7.477	8.302	7.623	8.143
900	30	18	9.049	9.281	10.155	9.462	10.046
900	30	19	11.289	11.531	12.454	11.754	12.409
900	30	20	14.088	14.345	14.317	14.616	15.531
900	43	10	3.048	5.616	15.307	2.283	3.322
900	43	11	2.642	5.466	16.172	2.858	4.023
900	43	12	3.18	6.258	17.89	3.445	4.752
900	43	13	3.647	6.985	19.683	3.975	5.442
900	43	14	4.633	8.288	21.795	5.04	6.685
900	43	15	5.613	9.465	24.001	6.105	7.983
900	43	16	6.249	10.538	26.679	6.868	8.84
900	43	17	8.324	12.689	29.164	9.082	11.406
900	43	18	10.181	14.8	32.244	11.099	13.707
900	43	19	12.483	17.357	35.77	13.591	16.517
900	43	20	15.343	20.478	39.86	16.678	19.961

Tabel 7. Standar EMF dan *power density* BTS untuk dengan frekuensi 1800 MHz.

Frekuensi (MHz)	Power (dBm)	Gain (dBi)	Standar Jarak Berdasarkan <i>Electric Field</i> (m)			Standar Jarak Berdasarkan <i>Power Density</i> (m)	
			Warning	Caution	Class 2	Occupational	General Public
1800	30	11	0.982	1.053	1.32	1.383	1.297
1800	30	12	1.22	1.298	1.589	1.368	1.575

Frekuensi (MHz)	Power (dBm)	Gain (dBi)	Standar Jarak Berdasarkan Electric Field (m)			Standar Jarak Berdasarkan Power Density (m)	
			Warning	Caution	Class 2	Occupational	General Public
1800	30	14	1.882	1.972	2.312	2.069	2.33
1800	30	15	2.335	2.523	2.792	2.545	2.835
1800	30	16	2.911	3.014	3.404	3.15	3.478
1800	30	17	3.632	3.741	4.164	3.901	4.269
1800	30	18	4.535	4.921	5.088	4.84	5.252
1800	30	19	5.586	5.508	5.97	5.726	6.139
1800	30	20	7.054	7.182	7.668	7.411	7.961
1800	43	10	1.101	2.385	7.23	1.364	2.099
1800	43	11	1.327	2.739	8.069	1.63	2.454
1800	43	12	1.597	3.138	8.952	1.948	2.853
1800	43	13	1.919	3.588	9.887	2.328	3.366
1800	43	14	2.321	4.118	10.901	2.8	3.963
1800	43	15	2.806	4.732	11.999	3.359	4.655
1800	43	16	3.413	5.467	13.219	4.07	5.543
1800	43	17	4.165	6.384	14.583	4.933	6.577
1800	43	18	5.1	7.411	16.132	5.997	7.842
1800	43	19	5.982	8.422	17.627	7.029	9.098
1800	43	20	7.681	10.249	19.939	8.899	11.22

Berdasarkan hasil perhitungan matematis pada Tabel 6, Tabel 7, dan Tabel 8, dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi penggunaan *power* dan *gain* pada BTS, maka semakin besar pula radius standar jarak aman paparan radiasi gelombang elektromagnetik dan *power density* yang dipancarkan oleh BTS. Maka dari itu, untuk menghindari dampak buruk akibat paparan radiasi gelombang elektromagnetik yang dipancarkan oleh BTS, alangkah baiknya pada zona *Warning* atau *Occupational* dan zona *Caution* atau *General Public* tidak terdapat pemukiman penduduk. Zona *Class 2* dan zona *Class 1* sudah merupakan wilayah yang aman untuk pemukiman penduduk. Hal tersebut disimpulkan berdasarkan standar yang sudah ditetapkan oleh WHO.

Tabel 8. Standar EMF dan *power density* BTS untuk dengan frekuensi 2100 MHz.

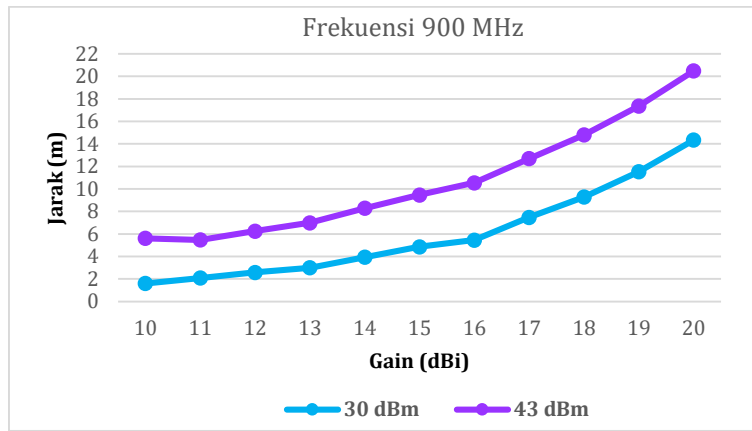
Frekuensi (MHz)	Power (dBm)	Gain (dBi)	Standar Jarak Berdasarkan Electric Field (m)			Standar Jarak Berdasarkan Power Density (m)	
			Warning	Caution	Class 2	Occupational	General Public
2100	30	11	0.34	0.404	0.642	0.466	0.641
2100	30	12	0.418	0.487	0.746	0.559	0.756
2100	30	13	0.516	0.591	0.872	0.856	1.076

Frekuensi (MHz)	Power (dBm)	Gain (dBi)	Standar Jarak Berdasarkan <i>Electric Field</i> (m)			Standar Jarak Berdasarkan <i>Power Density</i> (m)	
			<i>Warning</i>	<i>Caution</i>	<i>Class 2</i>	<i>Occupational</i>	<i>General Public</i>
2100	30	14	0.785	0.865	1.168	0.964	1.212
2100	30	15	0.786	0.873	1.197	0.987	1.262
2100	30	16	0.971	1.064	1.365	1.2	1.511
2100	30	17	1.203	1.301	1.669	1.461	1.81
2100	30	18	1.492	1.596	1.985	1.783	2.175
2100	30	19	1.85	2.139	2.37	2.178	2.618
2100	30	20	2.154	2.27	2.702	2.524	3.018
2100	43	10	0.546	1.698	6.012	0.824	1.52
2100	43	11	0.638	1.906	6.326	0.957	1.738
2100	43	12	0.743	2.126	7.302	1.11	1,987
2100	43	13	0.868	2.333	7.974	1.473	2.457
2100	43	14	1.164	2.77	8.816	1.658	2.761
2100	43	15	1.192	2.921	9.391	1.759	2.989
2100	43	16	1.405	3.249	10.151	2.073	3.562
2100	43	17	1.633	3.623	10.965	2.44	3.999
2100	43	18	1.98	4.055	11.189	2.887	4.631
2100	43	19	2.364	4.554	12.75	3.411	5.374
2100	43	20	2.696	5.001	13.628	3.907	6.11

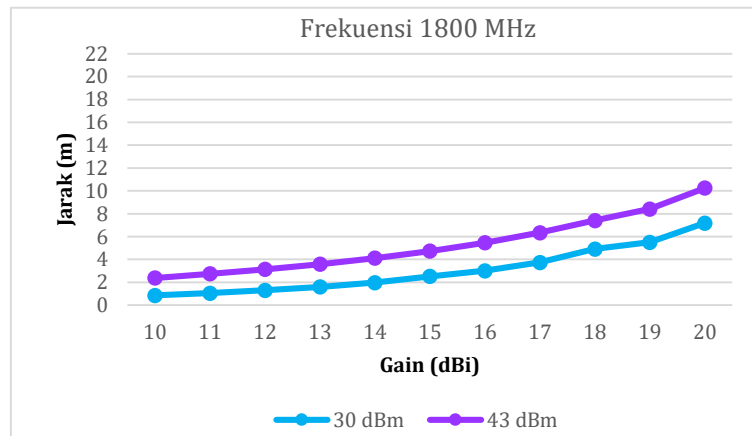
4.3 Analisis Perbandingan *Power* dalam sumbu *Gain* Terhadap Jarak

Berdasarkan hasil perhitungan matematis mengenai *electric field* dan *power density* seperti pada Tabel 6, Tabel 7, dan Tabel 8 dapat disimpulkan bahwa semakin besar penggunaan *power* dan *gain* pada BTS, maka semakin besar pula radius standar jarak aman paparan radiasi gelombang elektromagnetik yang dipancarkan oleh BTS. Namun, semakin besar frekuensi yang digunakan pada BTS, maka semakin kecil radius standar jarak aman paparan radiasi gelombang elektromagnetik. Hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 4 untuk penggunaan frekuensi 900 MHz, Gambar 5 untuk penggunaan frekuensi 1800 MHz, dan Gambar 6 untuk penggunaan frekuensi 2100 MHz.

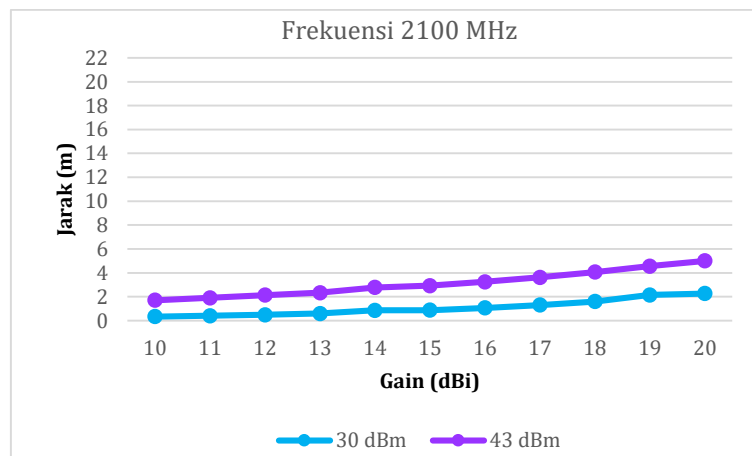
Pada Gambar 4, Gambar 5, dan Gambar 6 merupakan grafik hasil perbandingan penggunaan *power* dan *gain* terhadap standar paparan radiasi gelombang elektromagnetik yang sudah ditetapkan oleh WHO. Dari gambar tersebut dapat diketahui jika *power* dan *gain* memiliki perbandingan yang lurus terhadap jarak aman paparan radiasi. Sedangkan frekuensi memiliki perbandingan yang berbalik arah terhadap jarak aman paparan radiasi.



Gambar 4. Perbandingan *power* dalam sumbu *gain* terhadap jarak pada frekuensi 900 MHz.



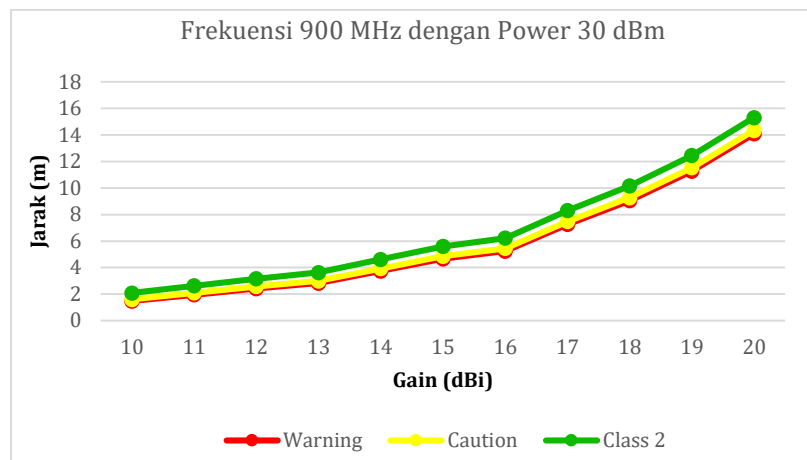
Gambar 5. Perbandingan *power* dalam sumbu *gain* terhadap jarak pada frekuensi 1800 MHz



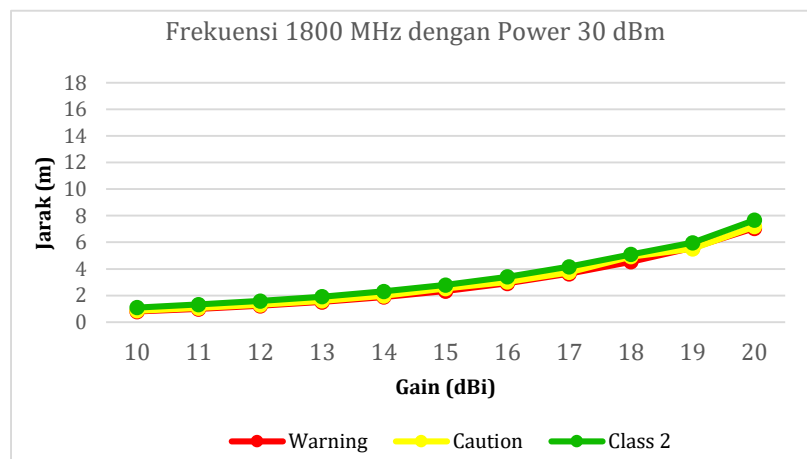
Gambar 6. Perbandingan *power* dalam sumbu *gain* terhadap jarak pada frekuensi 2100 MHz.

4.4 Analisis Hasil Standar EMF Berdasarkan Standar WHO

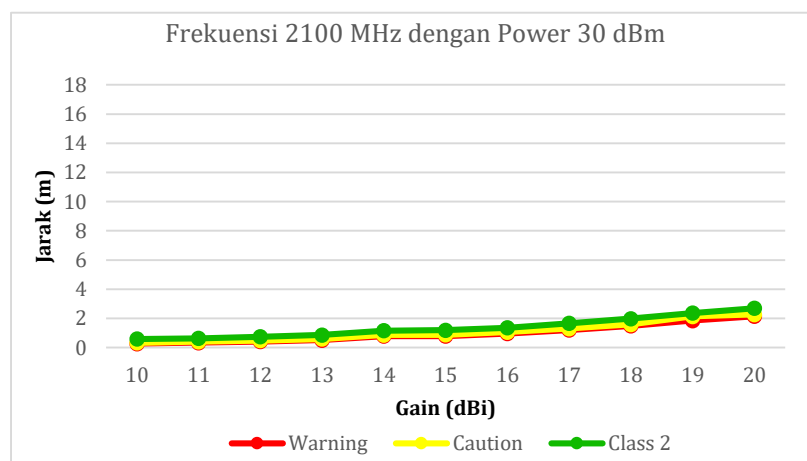
Pada Gambar 7, Gambar 8, dan Gambar 9 merupakan grafik hasil dari klasifikasi zona radiasi gelombang elektromagnetik yang dipancarkan oleh BTS berdasarkan *electric field* yang sudah ditetapkan oleh WHO pada frekuensi 900 MHz, 1800 MHz, dan 2100 MHz dengan penggunaan *power* 30 dBm. Sedangkan untuk penggunaan *power* 43 dBm, dapat dilihat pada Gambar 10, Gambar 11, dan Gambar 12.



Gambar 7. Hasil klasifikasi zona radiasi berdasarkan *electric field* pada frekuensi 900 MHz dan *power* 30 dBm.



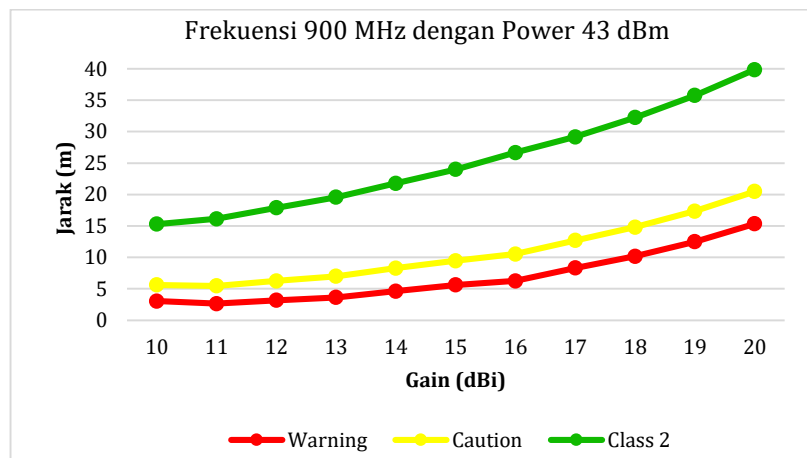
Gambar 8. Hasil klasifikasi zona radiasi berdasarkan *electric field* pada frekuensi 1800 MHz dan *power* 30 dBm



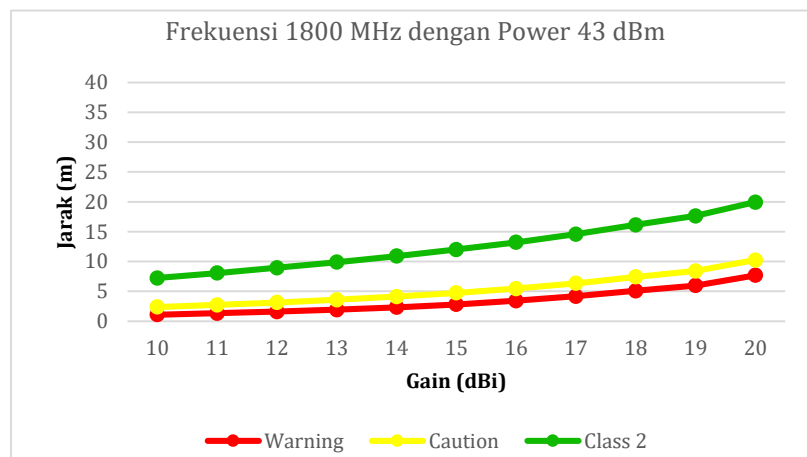
Gambar 9. Hasil klasifikasi zona radiasi berdasarkan *electric field* pada frekuensi 2100 MHz dan *power* 30 dBm.

Pada Gambar 7, Gambar 8, dan Gambar 9 merupakan grafik hasil klasifikasi zona radiasi gelombang elektromagnetik yang dipancarkan oleh BTS pada penggunaan *power* 30 dBm. Dari gambar tersebut dapat diketahui bahwa pada penggunaan *gain* 20 dBi dengan frekuensi 900 MHz jarak zona *Class 2* adalah 14.317 m dari BTS, untuk frekuensi 1800 MHz jarak zona *Class 2* adalah 7.668 m dari BTS, dan untuk frekuensi 2100 MHz jarak zona *Class 2* adalah 2.702 m dari BTS. Maka dari itu, dapat disimpulkan bahwa

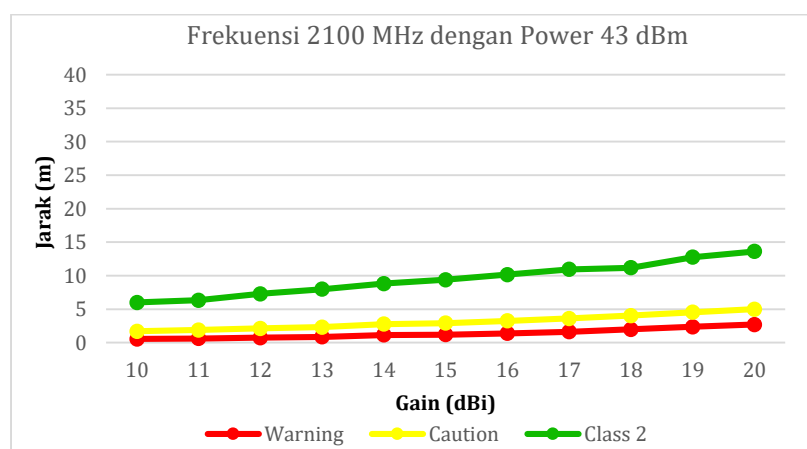
semakin tinggi frekuensi yang digunakan, maka semakin kecil radius standar jarak aman paparan radiasi gelombang elektromagnetik.



Gambar 10. Hasil klasifikasi zona radiasi berdasarkan *electric field* pada frekuensi 900 MHz dan *power* 43 dBm.



Gambar 11. Hasil klasifikasi zona radiasi berdasarkan *electric field* pada frekuensi 1800 MHz dan *power* 43 dBm.

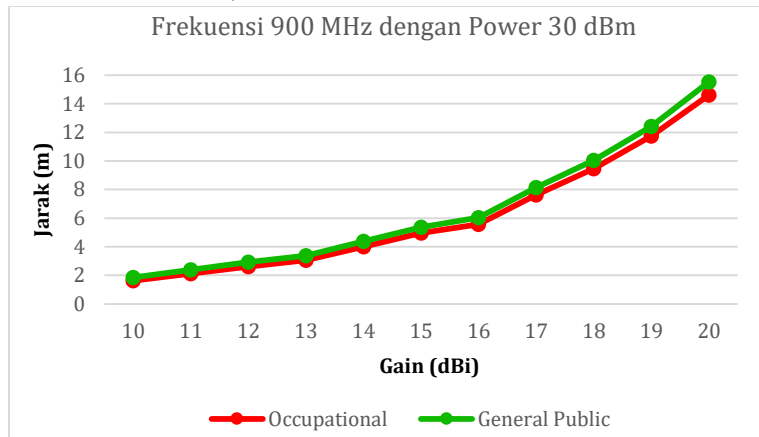


Gambar 12. Hasil klasifikasi zona radiasi berdasarkan *electric field* pada frekuensi 2100 MHz dan *power* 43 dBm

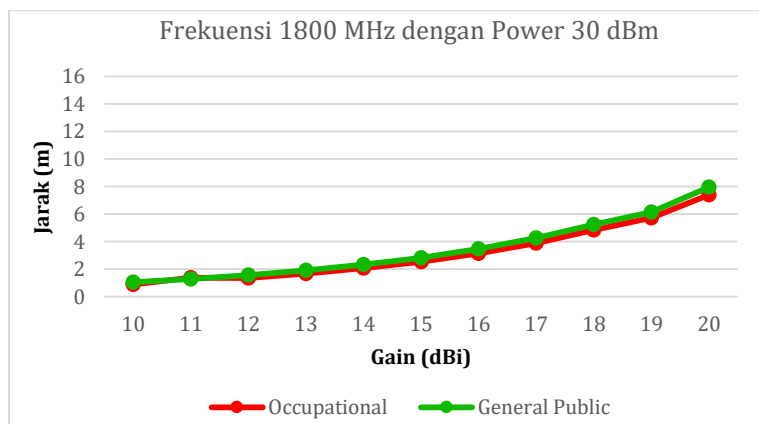
Pada Gambar 10, Gambar 11, dan Gambar 12 merupakan grafik hasil klasifikasi zona radiasi gelombang elektromagnetik yang dipancarkan oleh BTS pada penggunaan *power* 43 dBm. Dari gambar tersebut dapat diketahui bahwa pada penggunaan *gain* 20 dBi dengan frekuensi 900 MHz, jarak zona *Class 2* adalah 39.86 m dari BTS, untuk frekuensi 1800 MHz jarak zona *Class 2* adalah 19.939 m dari BTS, dan untuk frekuensi 2100 MHz jarak zona *Class 2* adalah 13.628 m dari BTS. Hasil tersebut dapat

dibandingkan dengan penggunaan *power* 30 dBm seperti pada Gambar 6, Gambar 7, dan Gambar 8, sehingga dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi penggunaan *power* maka semakin besar radius standar jarak aman paparan radiasi gelombang elektromagnetik.

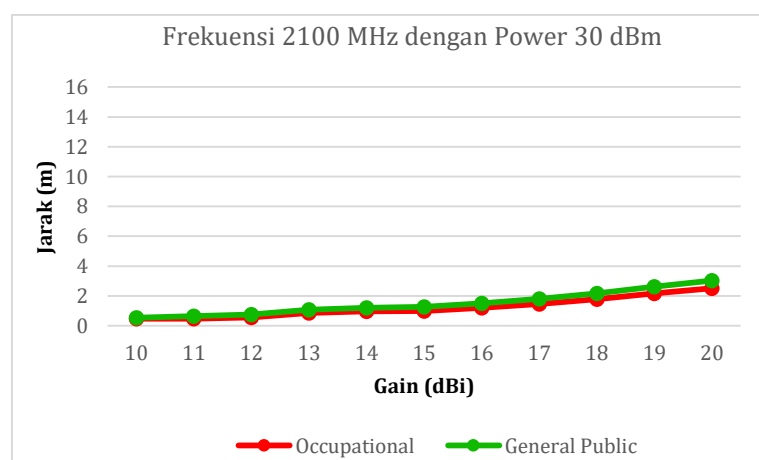
4.5 Analisis Hasil Standar *Power Density* Berdasarkan Standar WHO



Gambar 13. Hasil klasifikasi zona radiasi berdasarkan *power density* pada frekuensi 900 MHz dan *power* 30 dBm.



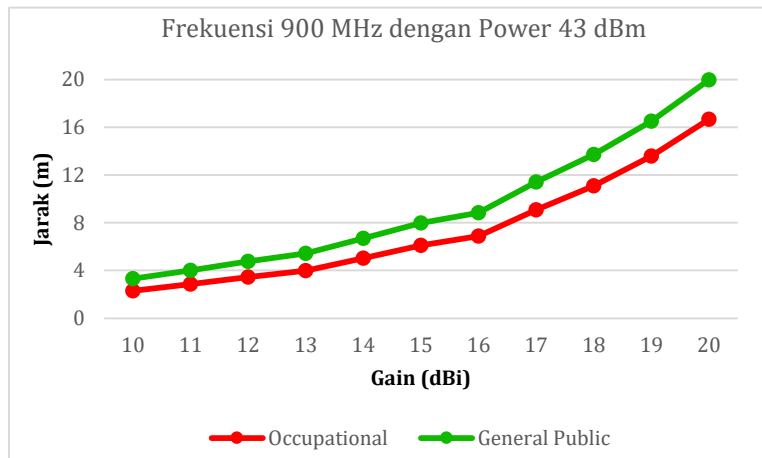
Gambar 14. Hasil klasifikasi zona berdasarkan *power density* pada frekuensi 1800 MHz dan *power* 30 dBm.



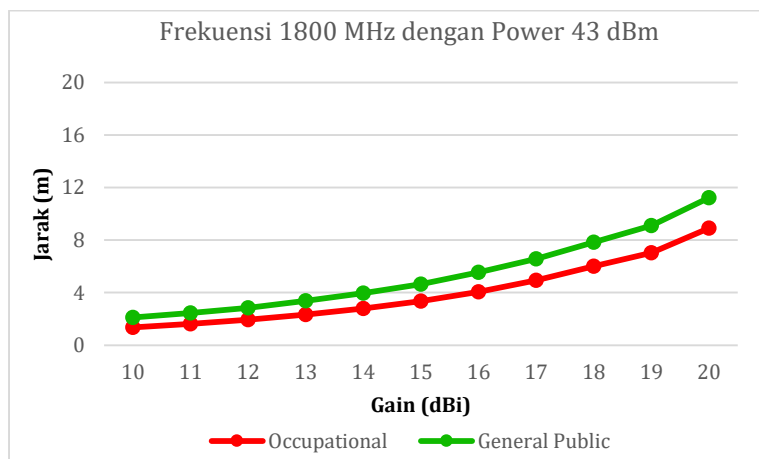
Gambar 15. Hasil klasifikasi zona radiasi berdasarkan *power density* pada frekuensi 2100 MHz dan *power* 30 dBm.

Gambar 13, Gambar 14, dan Gambar 15 merupakan grafik hasil klasifikasi zona radiasi berdasarkan *power density* yang dipancarkan oleh BTS pada penggunaan *power* 30 dBm. Sedangkan untuk penggunaan *power* 43 dBm dapat dilihat pada Gambar 16, Gambar 17, dan Gambar 18. Dari gambar-gambar tersebut

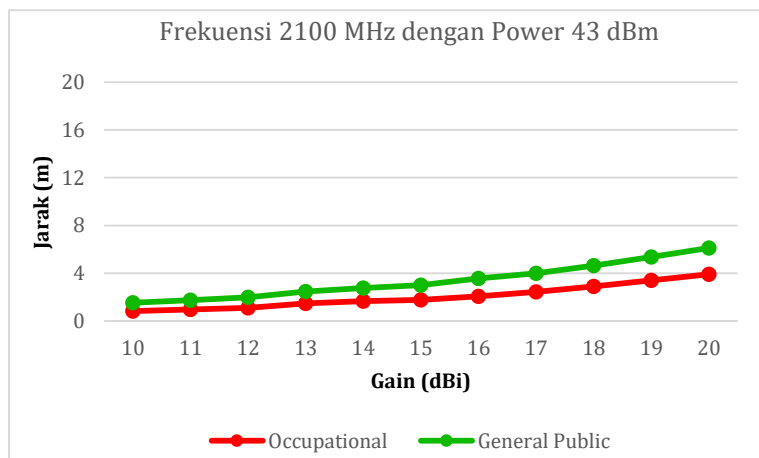
jika dibandingkan dengan radius zona radiasi berdasarkan *electric field*, dapat disimpulkan bahwa radius zona radiasi berdasarkan *power density* memiliki radius jarak yang lebih kecil.



Gambar 16. Hasil klasifikasi zona radiasi berdasarkan *power density* pada frekuensi 900 MHz dan *power* 43 dBm.



Gambar 17. Hasil klasifikasi zona radiasi berdasarkan *power density* pada frekuensi 1800 MHz dan *power* 43 dBm.



Gambar 18. Hasil klasifikasi zona radiasi berdasarkan *power density* pada frekuensi 2100 MHz dan *power* 43 dBm.

Dari Gambar 13, Gambar 14, dan gambar 15, dapat diketahui bahwa pada penggunaan *gain* 20 dBi dan *power* 30 dBm dengan frekuensi 900 MHz jarak zona *General Public* adalah 15.531 m dari BTS, untuk

frekuensi 1800 MHz jarak zona *General Public* adalah 7.961 m dari BTS, dan untuk frekuensi 2100 MHz jarak zona *General Public* adalah 3.081 m dari BTS. Sedangkan untuk penggunaan *gain* 20 dBi dan *power* 43 dBm dengan frekuensi 900 MHz seperti pada Gambar 16, Gambar 17, dapat diketahui bahwa jarak zona *General Public* adalah 19.961 m dari BTS, untuk frekuensi 1800 MHz jarak zona *General Public* adalah 11.22 m dari BTS, dan untuk frekuensi 2100 MHz jarak zona *General Public* adalah 6.11 m dari BTS. Sehingga dapat disimpulkan pula bahwa, semakin tinggi penggunaan *power* maka semakin besar radius standar jarak aman paparan radiasi gelombang elektromagnetik berdasarkan *power density*.

5. Simpulan dan Saran

Dari hasil perhitungan matematis yang sudah dilakukan berdasarkan standar WHO dan regulasi EMF di Korea Selatan, seperti pada Tabel 6, Tabel 7, dan Tabel 8, dapat disimpulkan bahwa radius klasifikasi zona radiasi gelombang elektromagnetik yang dipancarkan oleh BTS bergantung dengan penggunaan frekuensi, *power*, dan *gain* pada BTS. Hal tersebut dapat dilihat pada hasil grafik pada Gambar 7 hingga Gambar 18.

Pada klasifikasi zona radiasi berdasarkan *electric field*, dengan penggunaan *power* 30 dBm dan *gain* 20 dBi dengan frekuensi 900 MHz jarak zona *Class 2* adalah 14.317 m dari BTS, untuk frekuensi 1800 MHz jarak zona *Class 2* adalah 7.668 m dari BTS, dan untuk frekuensi 2100 MHz jarak zona *Class 2* adalah 2.702 m dari BTS. Sedangkan untuk penggunaan *power* 43 dBm dan *gain* 20 dBi dengan frekuensi 900 MHz jarak zona *Class 2* adalah 39.86 m dari BTS, untuk frekuensi 1800 MHz jarak zona *Class 2* adalah 19.939 m dari BTS, dan untuk frekuensi 2100 MHz jarak zona *Class 2* adalah 13.628 m dari BTS.

Pada klasifikasi zona radiasi berdasarkan *power density*, dengan penggunaan *power* 30 dBm dan *gain* 20 dBi dengan frekuensi 900 MHz jarak zona *General Public* adalah 15.531 m dari BTS, untuk frekuensi 1800 MHz jarak zona *General Public* adalah 7.961 m dari BTS, dan untuk frekuensi 2100 MHz jarak zona *General Public* adalah 3.081 m dari BTS. Sedangkan untuk penggunaan *power* 43 dBm dan *gain* 20 dBi dengan frekuensi 900 MHz jarak *General Public* adalah 19.961 m dari BTS, untuk frekuensi 1800 MHz jarak zona *General Public* adalah 11.22 m dari BTS, dan untuk frekuensi 2100 MHz jarak zona *General Public* adalah 6.11 m dari BTS.

6. Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah membantu dalam pengerjaan penelitian ini.

Daftar Pustaka

- Ardiatna, W., Bakti, A. N., Nugroho, H. W., Hidayat, S. W., Sadrach, J., & Kadarwati, S. (2013). Analisis Tingkat Emisi Radiasi Medan Elektromagnetik Dari Bts (Base Transceiver Station) Terhadap Standar Ieee C95.1 Di Kota Tangerang Selatan. *Jurnal Standardisasi*, 15(2), 144. <https://doi.org/10.31153/js.v15i2.118>
- Freeland, C. (2016). MORE SARS (SPECIFIC ABSORPTION RATE). Retrieved October 15, 2019, from <https://radiesthesia.online/more-on-sars/>
- Habash, R. W. Y. (2002). *Electromagnetic Fields and Radiation*. New York: Marcel Dekker.
- Hananto, M. (2013). Radiasi Di Sekitar Menara Base Transceiver Station Di Bandung Dan Jakarta Radiation Around the Base Transceiver Station in Bandung and Jakarta. *Media Litbangkes*, 23(4), 182–193.
- Harvey Lehpamer. (2010). *MICROWAVE TRANSMISSION NETWORKS PLANNING, DESIGN, AND DEPLOYMENT* (2nd ed., Vol. 53). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- IEEE. (2006). IEEE Standard for Safety Levels With Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz. In *IEEE Std C95.1-2005 (Revision of IEEE Std C95.1-1991)* (Vol. 2005). <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2006.99501>
- India, G. of, & Telecommunications, M. of C. & I. T. D. of. (n.d.). *Inter-Ministerial Committee on*.
- ITU-R. (2005). Evaluating fields from terrestrial broadcasting transmitting systems operating in any frequency band for assessing exposure to non-ionizing radiation. *Recommendation ITU-R, BS.1698*.
- ITU. (2014). *Final Report ITU-D Study Group 1*.

- Kesari, K. K., Siddiqui, M. H., Meena, R., Verma, H. N., & Kumar, S. (2013). Cell phone radiation exposure on brain and associated biological systems. *Indian Journal of Experimental Biology*, *51*(3), 187–200.
- Valberg, P. A., van Deventer, E., & Repacholi, M. H. (2007). Workgroup report: Base stations and wireless networks - Radiofrequency (RF) exposures and health consequences. *Environmental Health Perspectives*, *115*(3), 416–424. <https://doi.org/10.1289/ehp.9633>
- Workgroup, T. M. (2015). What is it? A technical overview of. *LoRa Alliance*, (November).
https://doi.org/https://www.tuv.com/media/corporate/products_1/electronic_components_and_lasers/TUeV_Rheinland_Overview_LoRa_and_LoRaWANtmp.pdf
- World Health Organization. (2014). *19 th International Advisory Committee National Report (Republic of Korea)*. (January 2013), 1–5.