



Analisis Propagasi Gelombang Radio HF Mode Angkasa untuk Kegiatan Patroli Laut Bea Cukai

HF Sky Wave Propagation Analysis for Customs and Excise Marine Patrol

Varuliantor Dear¹, Annis Siradj Mardiani², Harpan Budi Santoso³, Gatot Wikantho⁴

^{1,2,4}Pusat Sains Antariksa. Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN)

^{1,2,4}Jl. Dr. Djundjungan No. 133, Bandung

³Sub Dit Patroli Laut Direktorat Jenderal Bea dan Cukai

³Jl. DI Panjaitan, Jakarta

email: ¹varuliantor.dear@lapan.go.id, ²annis.siradj@lapan.go.id, ³panoet.h@gmail.com, ⁴gatot.wikantho@lapan.go.id

INFORMASI ARTIKEL

Diterima 31 Oktober 2018

Direvisi 23 Juni 2019

Disetujui 24 Juni 2019

Keywords:

Skywave Propagation

HF Radio Communication

Customs and Excise Marine Patrol

ABSTRACT

This paper discusses the results of radio wave propagation analysis in HF spectrum (High Frequency; 3–30 MHz) using skywave propagation mode aimed to obtain recommendations for working frequency (f_c) for operational activities of Customs and Excise (DJBC) Marine Patrol. The result shows that there are 5 working frequency range recommendations, i.e. 2.170–2.194 MHz, 4.000–4.063 MHz, 8.100–8.815 MHz, 12.230–13.200 MHz, and 16.360–17.410 MHz. Frequency range of 2.170–2.194 MHz is intended for night operation, both for communication between Operation Facility Base (PSO) and Patrol Boats and communication between each PSO. Frequency range of 4.000–4.063 MHz is intended for communication between PSO and Patrol Boats during daytime and for communication between PSOs at nighttime. The frequency range of 8.100–8.815 MHz is only intended for communication between PSO and patrol boats in daytime, while the frequency ranges of 12.230–13.200 MHz and 16.360–17.410 MHz are for communication between PSOs within 1,000–2,000 km and daytime communication with distance more than 2,000 km. The frequency obtained then can be used for operational communication activities, whether by manual frequency management methods or automatic methods such as Automatic Link Establishment (ALE) system.

ABSTRAK

Makalah ini membahas tentang hasil analisis propagasi gelombang radio pada spektrum HF (*High Frequency*; 3–30 MHz) menggunakan mode angkasa (*skywave propagation*) yang ditujukan untuk mendapatkan rekomendasi frekuensi kerja (f_c) bagi kegiatan patroli laut Bea Cukai. Hasil analisis menunjukkan bahwa terdapat 5 rekomendasi rentang frekuensi kerja, yakni 2,170–2,194 MHz, 4,000–4,063 MHz, 8,100–8,815 MHz, 12,230–13,200 MHz, dan 16,360–17,410 MHz. Rentang frekuensi 2,170–2,194 MHz diperuntukkan bagi penggunaan malam hari, baik untuk komunikasi antara Pangkalan Sarana Operasi (PSO) dengan kapal patroli maupun komunikasi antar-PSO. Rentang frekuensi 4,000–4,063 MHz diperuntukkan bagi komunikasi antara PSO dengan kapal patroli pada siang hari serta untuk komunikasi antar-PSO di malam hari. Rentang frekuensi 8,100–8,815 MHz hanya diperuntukkan bagi komunikasi antara PSO dengan kapal patroli pada siang hari. Sedangkan frekuensi 12,230–13,200 MHz dan 16,360–17,410 MHz diperuntukkan bagi komunikasi antar-PSO dengan jarak antara 1.000 km hingga 2.000 km dan jarak lebih dari 2.000 km pada siang hari. Frekuensi yang telah diperoleh dapat diterapkan untuk kegiatan operasional dengan menggunakan manajemen frekuensi yang bersifat manual atau dengan menggunakan sistem *Automatic Link Establishment* (ALE).

Kata kunci :

Propagasi Angkasa

Komunikasi Radio HF

Patroli Laut Bea Cukai

1. Pendahuluan

Keberhasilan komunikasi radio ditentukan oleh keberhasilan perambatan gelombang radio dari pemancar menuju penerima. Dalam komunikasi radio pada spektrum *High Frequency* (HF; 3–30 MHz)

atau yang dikenal secara umum sebagai radio SSB (*Single Side Band*), salah satu faktor yang menentukan keberhasilan komunikasi adalah kondisi lapisan ionosfer yang memiliki sifat dinamis (McNamara, 1991). Kondisi lapisan ionosfer yang selalu berubah tersebut sangat menentukan besaran nilai frekuensi kerja (f_c) yang berhasil merambat dari antenna pemancar menuju antenna penerima untuk setiap waktunya. Oleh karena itu, penentuan nilai frekuensi kerja dalam suatu jaringan komunikasi radio HF perlu dilakukan berdasarkan analisis propagasi gelombang radio yang mengacu pada kondisi ionosfer. Analisis perambatan gelombang radio yang terjadi pada lapisan ionosfer tersebut dikenal sebagai analisis prediksi frekuensi propagasi angkasa atau *skywave propagation* (Arthur, Taylor, Eddie, 2006).

Salah satu tugas Direktorat Jenderal Bea dan Cukai (DJBC) adalah melaksanakan kebijakan di bidang pengawasan dan penegakan hukum di bidang kepabeanan dan cukai. Salah satu wujud kegiatan tersebut adalah melaksanakan operasi patroli laut di seluruh wilayah perairan Indonesia sebagai wujud pengawasan laut. Tugas ini dilaksanakan oleh Direktorat Penindakan dan Penyidikan dan perlu didukung dengan jaminan keberhasilan komunikasi untuk setiap waktunya. Oleh karena itu, semua sarana dan prasarana telekomunikasi perlu disiapkan untuk menjamin keberhasilan komunikasi yang dibutuhkan, terutama pada situasi dan kondisi yang tidak terduga. Komunikasi radio SSB menjadi prasarana komunikasi yang juga perlu disiapkan oleh DJBC karena memiliki keunggulan antara lain yakni biaya operasional relatif murah, jarak jangkauan yang jauh (Wang, Ding, Wang, 2018), dan sebagai teknologi komunikasi cadangan (*backup*) di saat kondisi darurat (Susetyo, Hendranto, Affandi, 2008).

Saat ini, sistem komunikasi radio SSB DJBC masih dalam proses pengembangan. Dalam proses pengembangan yang dilakukan, salah satu parameter dasar yang perlu disiapkan adalah nilai frekuensi kerja yang dapat digunakan secara operasional. Parameter ini sangat vital karena terdapat aspek teknis berupa jaminan keberhasilan komunikasi dan aspek hukum, yakni legalitas penggunaan frekuensi. Kondisi ini menunjukkan bahwa penentuan frekuensi kerja sistem komunikasi radio SSB untuk operasional patroli laut Bea Cukai tidak bisa sembarang dan perlu dilakukan terlebih dahulu sebagai kebutuhan dasar dari kegiatan operasional komunikasi radio. Pada makalah ini, analisis propagasi gelombang radio mode angkasa dilakukan dengan merujuk pada lokasi Pangkalan Sarana Operasi (PSO) yang dimiliki oleh DJBC dan wilayah operasionalnya. Tujuan dari makalah ini adalah untuk mendapatkan rekomendasi frekuensi kerja yang dapat digunakan dalam kegiatan patroli laut Bea Cukai. Metode yang digunakan merupakan metode manajemen frekuensi (Giesbrecht, 2006) berdasarkan data hasil perhitungan prediksi frekuensi untuk 3 kondisi aktivitas Matahari berbeda yang mewakili seluruh siklus aktivitas Matahari dengan periodisasi 11 tahunan. Analisis yang mencakup seluruh siklus aktivitas Matahari tersebut bertujuan untuk meningkatkan jaminan keberhasilan komunikasi radio SSB dalam jangka panjang.

2. Propagasi Gelombang Radio Mode Angkasa

Perambatan gelombang radio dari antenna pemancar menuju antenna penerima dapat terjadi melalui tiga mode perambatan. Ketiga mode tersebut adalah mode *Line of Sight* (LOS), *Groundwave*, dan *Skywave*. Tiap mode memerlukan persyaratan tertentu agar perambatan gelombang radio antara antenna pemancar dan penerima dapat terwujud secara optimal. Pada perambatan gelombang radio pada spektrum HF, ketiga mode tersebut dapat terjadi, baik secara bersamaan maupun terpisah. Perambatan gelombang radio HF yang terjadi secara bersamaan dapat menyebabkan gangguan pada sistem penerima. Kendatipun terjadi secara bersamaan, akan terdapat satu mode propagasi yang lebih dominan.

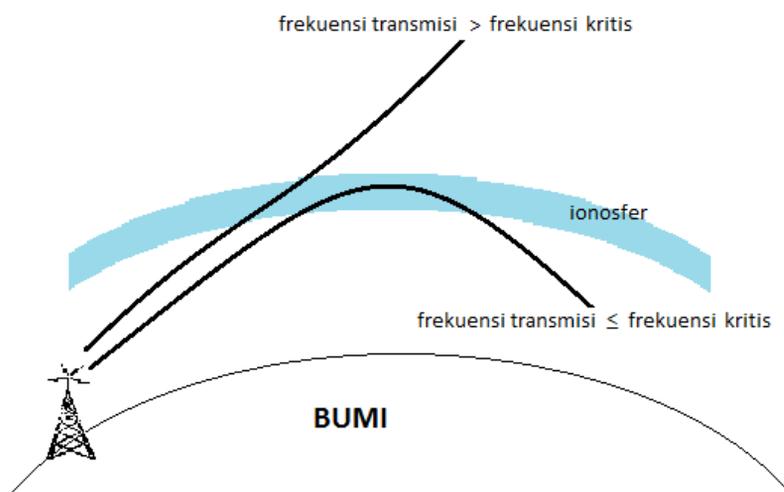
Perambatan gelombang radio dengan mode LOS terjadi apabila lokasi antara antenna pemancar dan penerima bebas dari hambatan secara visual. Antena pemancar dan antenna penerima seolah-olah saling melihat satu sama lain tanpa terhalang benda atau objek yang berada di antaranya. Secara matematis, wilayah yang bebas dari hambatan tersebut dihitung dengan menggunakan persamaan *Fresnel Zone* (Guo, Barton, 2002).

Perambatan gelombang radio dengan mode *Groundwave* merupakan perambatan gelombang radio yang melalui permukaan bumi. Propagasi ini ditentukan oleh nilai frekuensi atau panjang gelombang (λ) serta ditentukan oleh topografi dan jenis permukaan bumi yang dilalui. Parameter konduktivitas permukaan

bumi (\mathcal{E}) menentukan besarnya rugi-rugi (*losses*) energi gelombang radio yang memengaruhi jarak jangkauan penjalaran gelombang radio. Untuk permukaan bumi dengan konduktivitas yang tinggi seperti air laut, perambatan gelombang radio dapat memiliki jangkauan yang lebih jauh apabila dibandingkan dengan permukaan bumi dengan konduktivitas yang rendah seperti bebatuan kapur.

Perambatan gelombang radio mode *Skywave* merupakan perambatan gelombang radio yang memanfaatkan kemampuan lapisan ionosfer dalam memantulkan gelombang radio. Gelombang radio yang mengarah menuju ruang angkasa dapat kembali menuju bumi akibat adanya lapisan ionosfer yang berada pada ketinggian 60 hingga 600 km di atas permukaan bumi. Dengan kemampuan tersebut, propagasi gelombang radio dengan mode LOS yang mengalami kegagalan akibat lengkung bumi dapat teratasi. Hal ini menyebabkan jarak jangkauan perambatan gelombang radio dengan mode *skywave* dapat menjadi lebih jauh. Propagasi dengan mode *skywave* dikenal juga sebagai propagasi mode *beyond line of sight* (Saakian, 2011).

Perambatan gelombang radio mode *skywave* sangat ditentukan oleh kondisi lapisan ionosfer yang dinyatakan dalam kondisi parameter lapisan ionosfer yang berubah, baik secara spasial maupun temporal. Salah satu parameter lapisan ionosfer yang memengaruhi keberhasilan pemantulan gelombang radio adalah besaran kerapatan elektron (N_e). Secara aplikatif, nilai kerapatan elektron tersebut dinyatakan sebagai besaran frekuensi kritis lapisan ionosfer (f_o). Apabila nilai frekuensi kerja gelombang radio (f_c) yang ditransmisikan lebih tinggi dari frekuensi kritis (f_o) lapisan ionosfer pada sudut tertentu, maka gelombang radio akan melewati atau menembus lapisan ionosfer. Namun, apabila $f_c \leq f_o$, maka gelombang radio akan mengalami pembiasan dan kembali menuju permukaan bumi. Ilustrasi hubungan antara f_o dan f_c disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Ilustrasi Perambatan Gelombang Radio Mode *Skywave* Berdasarkan Nilai Frekuensi Kerja Radio (Dear, 2018)

Parameter yang membatasi besaran frekuensi kerja yang dapat dipantulkan oleh lapisan ionosfer dalam sebuah sirkuit komunikasi radio adalah nilai *Lowest Usable Frequency* (LUF) dan *Maximum Usable Frequency* (MUF). LUF merupakan batas bawah frekuensi yang mampu dipantulkan lapisan ionosfer. Sedangkan MUF merupakan representasi nilai f_o yang menjadi batas atas frekuensi yang dapat dipantulkan oleh lapisan ionosfer. Perubahan nilai LUF dan MUF akan memengaruhi keberhasilan komunikasi radio berdasarkan nilai f_c yang digunakan.

Kondisi lapisan ionosfer yang dinamis menunjukkan bahwa ionosfer adalah kanal yang berubah terhadap waktu (*Time Variant Channel*). Oleh karena itu, salah satu kendala yang muncul dalam komunikasi menggunakan kanal ionosfer adalah menentukan nilai frekuensi kerja (f_c) yang tepat. Namun demikian, hasil penelitian menunjukkan bahwa lapisan ionosfer memiliki pola tertentu, sehingga dapat digunakan sebagai solusi dalam memilih frekuensi kerja (f_c) (Hudson, Horseman, Sugier, 2016).

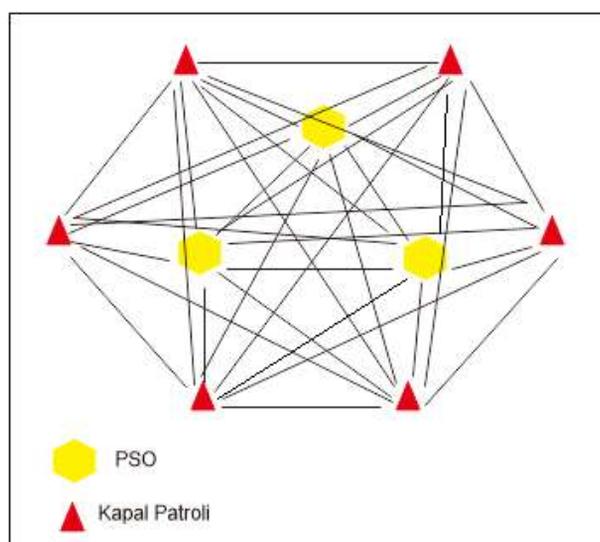
3. Data dan Metodologi

Data utama yang digunakan merupakan hasil perhitungan prediksi frekuensi berdasarkan parameter operasional patroli laut Bea Cukai yang diperoleh pada tahun 2018. Data yang digunakan meliputi lokasi stasiun radio tetap yang berada di PSO dan cakupan wilayah kapal patroli berdasarkan lokasi tiap PSO. Perhitungan prediksi frekuensi dilakukan dengan menggunakan model empiris variasi kondisi lapisan ionosfer hasil pengembangan lembaga riset ionosfer Australia yang dikemas dalam *software* ASAPS (*Advanced Stand Alone Prediction System*) (IPS Radio and Space Services, 2003). Parameter kegiatan operasional patroli laut dan spesifikasi perangkat radio komunikasi SSB pada Tabel 1 digunakan sebagai parameter masukan dalam perhitungan prediksi frekuensi ASAPS untuk 3 kondisi aktivitas Matahari, yakni rendah, sedang, dan tinggi.

Tabel 1. Spesifikasi Radio Komunikasi dalam Perhitungan Prediksi Frekuensi

Parameter	Nilai
EIRP	16dBW
Bandwidth	3000 Hz
Min SNR@BW	10dB@3kHz
Atmospheric Noise	CCIR 332
Man Made Noise	-140 dBW/Hz
Antena Type	Monopole

Sumber: (Dear, 2018)



Gambar 2. Topologi Jaringan Radio Komunikasi HF Patroli Laut DJBC (Dear, 2018)

Lokasi seluruh PSO tersebar di 5 (lima) tempat. Dalam penelitian ini, dikarenakan jarak PSO Batam dengan Tanjung Pinang berada dalam kategori yang berdekatan dari aspek propagasi gelombang radio pada spektrum HF, maka jumlah PSO yang digunakan dalam analisis dan perhitungan prediksi frekuensi menjadi 4 lokasi, yakni Batam (BTM), Tanjung Priok (TJP), Pantoloan (PTL), dan Sorong (SRG). Dalam penelitian ini, jaringan radio komunikasi HF dibuat dalam konfigurasi *Mesh* seperti yang disajikan pada Gambar 2. Topologi *mesh* memungkinkan adanya fungsi *forwarding* secara manual, yakni tiap stasiun yang menerima informasi untuk stasiun lain, dapat meneruskan informasi tersebut kepada stasiun lain yang dituju. Hal ini umum dilakukan sebagai sebuah adopsi prosedur standar saat kondisi *distress* dalam sistem komunikasi HF yang rekomendasikan oleh ITU-R Rec M.541.

Untuk memperoleh jaminan keberhasilan komunikasi yang berkesinambungan, yakni frekuensi yang dapat digunakan dalam jangka panjang, perhitungan prediksi frekuensi dilakukan untuk setiap bulannya

pada tiap tahun yang mewakili kondisi aktivitas Matahari siklus yang ke-24. Pada Tabel 2, disajikan tahun-tahun yang mewakili kondisi aktivitas Matahari yang digunakan dalam perhitungan prediksi frekuensi.

Hasil perhitungan prediksi frekuensi yang telah diperoleh, dianalisis dengan menggunakan metode manajemen frekuensi (Bradley, 1996) yang dapat dinyatakan dengan persamaan

$$f_s = \max(P(f_1), \dots, P(f_n)) \dots\dots\dots 1)$$

$$P(f_s) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N n f_s; LUF_n \leq f_s \leq MUF_n \dots\dots\dots 2)$$

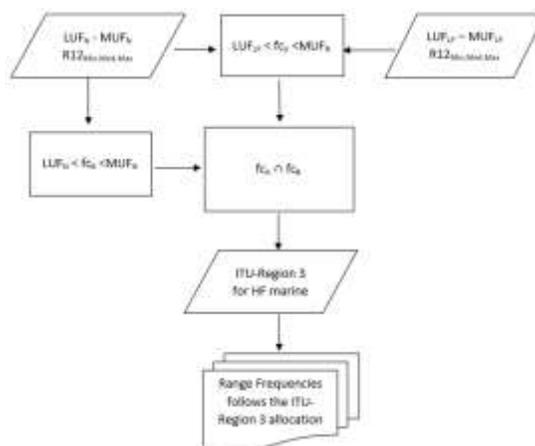
dengan f_s merupakan frekuensi kerja yang dipilih dengan peluang tertinggi dalam satu hari. N adalah jumlah jam dalam satu hari, yakni 24. Parameter nf bernilai 1 jika nilai frekuensi (f) berada di antara LUF dan MUF untuk setiap jam-nya (n).

Tabel 2. Tahun yang Digunakan sebagai Representasi Kondisi Aktivitas Matahari Siklus ke-24

Tahun	Aktivitas Matahari
2008	Rendah
2005	Sedang
2001	Tinggi

Sumber: (NOAA, 2018)

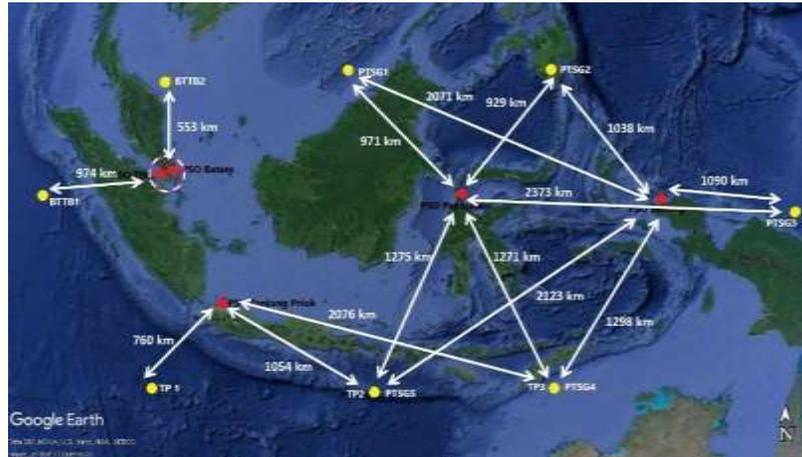
Dikarenakan perancangan jaringan radio komunikasi HF harus mengacu pada jumlah PSO yang telah ditetapkan, yakni sebanyak 4 lokasi, maka metode manajemen frekuensi perlu dimodifikasi berdasarkan penjelasan pada langkah-langkah diagram alur Gambar 3 dan Gambar 5. Gambar 3 merupakan diagram alur penentuan rentang frekuensi rekomendasi untuk sirkuit komunikasi PSO dengan stasiun bergerak yakni kapal yang berpatroli di cakupan wilayah operasional PSO tersebut. Sedangkan Gambar 5 merupakan diagram alur penentuan rentang frekuensi rekomendasi untuk sirkuit komunikasi antarstasiun PSO.



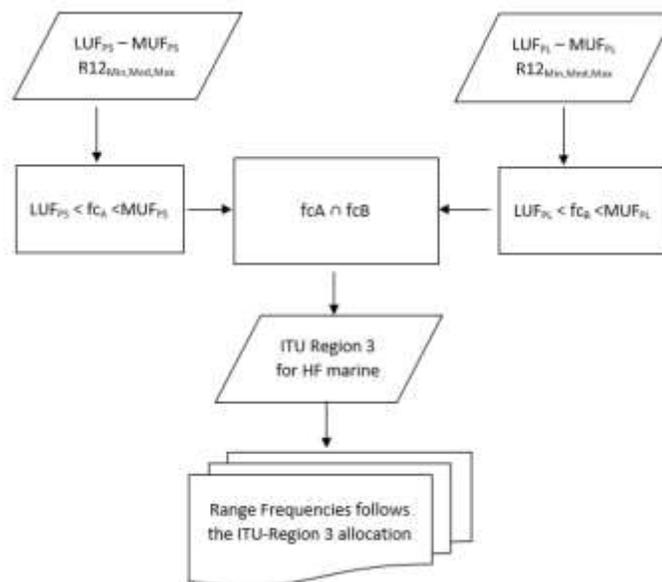
Gambar 3. Diagram Alur Penentuan Rentang Frekuensi untuk Sirkuit Komunikasi PSO dengan Kapal Patroli (Dear, 2018)

Pada Gambar 3, perhitungan prediksi frekuensi dikelompokkan ke dalam dua moda, yakni menggunakan perhitungan dengan moda *Near Vertical Incident Skywave* (NVIS) dan moda pemantulan tunggal (*single hop*) pada lapisan *F* ionosfer antara PSO dengan dua lokasi terjauh dari area patroli kapal yang telah ditentukan berdasarkan Gambar 4. Perhitungan moda NVIS diperlukan dalam proses analisis

propagasi gelombang radio dengan radius area komunikasi < 200 km. Analisis ini diperlukan untuk mendapatkan rentang frekuensi kerja yang dapat digunakan pada saat mode propagasi *groundwave* tidak dapat terjadi. Sedangkan perhitungan moda *single hop* untuk PSO dengan 2 lokasi patroli terjauh dimaksudkan untuk mendapatkan rentang frekuensi yang dapat digunakan berdasarkan peluang terjadinya pemantulan gelombang radio oleh lapisan *F* ionosfer yang selalu ada dalam 24 jam.



Gambar 4. Peta Wilayah Operasional DJBC yang Digunakan dalam Perhitungan Prediksi Frekuensi (Dear, 2018)



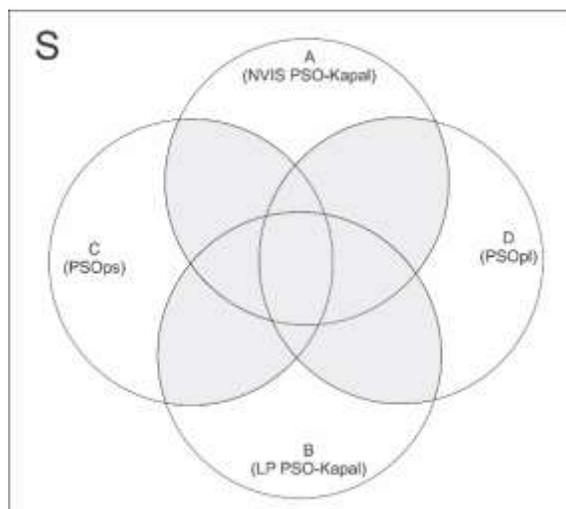
Gambar 5. Diagram Alur Penentuan Rentang Frekuensi untuk Sirkuit Komunikasi Antar-PSO (Dear, 2018)

Perhitungan prediksi frekuensi pada diagram alur Gambar 5 merupakan perhitungan antara dua lokasi PSO dengan jarak terdekat, yakni < 1.000 km dan dua lokasi PSO dengan jarak terjauh, yakni > 2.000 km. Perhitungan prediksi frekuensi antara dua PSO yang terdekat dinyatakan dalam nilai MUF_{PS} dan LUF_{PS} . Sedangkan untuk dua PSO terjauh dinyatakan dalam nilai MUF_{PL} dan LUF_{PL} . Hasil perhitungan MUF dan LUF tersebut kemudian digabungkan dan dianalisis kembali untuk mendapatkan nilai rentang frekuensi rekomendasi.

Untuk menjamin keberhasilan komunikasi selama 24 jam, analisis hasil perhitungan nilai MUF dan LUF pada Gambar 3 dan Gambar 5 dikelompokkan ke dalam dua rentang waktu yang berbeda, yakni malam dan siang hari. Pengelompokan ini dimaksudkan agar frekuensi yang dipilih bukanlah hanya sebuah frekuensi tunggal dalam satu hari. Frekuensi kerja yang lebih dari satu akan memiliki peluang keberhasilan yang lebih tinggi. Dalam penelitian ini, rentang waktu siang hari dinyatakan antara pukul 00 UT hingga 12 UT. Sedangkan malam hari dinyatakan antara pukul 12 UT hingga 23 UT.

Dari aspek hukum, proses pemilihan frekuensi rekomendasi yang diterapkan dalam diagram alur Gambar 3 dan 5 perlu mempertimbangkan alokasi penggunaan frekuensi yang berlaku. Pemilihan frekuensi berdasarkan metode manajemen frekuensi tidak hanya dibatasi oleh nilai LUF dan MUF , namun juga dibatasi oleh aturan alokasi frekuensi yang dikeluarkan oleh Direktorat Jenderal Sumber Daya dan Perangkat Pos dan Informatika (SDPPI) Kementerian Komunikasi dan Informatika. Proses ini akan mempermudah proses pengajuan perizinan frekuensi serta implementasi di lapangan, karena telah sesuai dengan regulasi yang ditetapkan.

Keluaran dari proses analisis perhitungan prediksi frekuensi yang dilakukan untuk 36 bulan dari setiap sirkuit yang dikelompokkan ke dalam rentang waktu siang dan malam akan menghasilkan beberapa rentang frekuensi rekomendasi. Proses penentuan rentang frekuensi rekomendasi dilakukan berdasarkan irisan dari kelompok nilai-nilai rentang frekuensi yang dihasilkan dengan ilustrasi diagram Venn pada Gambar 6.



Gambar 6. Diagram Venn Metode Pemilihan Frekuensi Rekomendasi (Dear, 2018)

Himpunan A adalah hasil perhitungan rentang frekuensi untuk sirkuit PSO - kapal patroli dengan moda NVIS. Himpunan B adalah rentang frekuensi untuk sirkuit PSO - kapal patroli dengan moda *single hop*. Himpunan C merupakan rentang frekuensi sirkuit antar-PSO untuk jarak dekat, dan himpunan D merupakan sirkuit antar-PSO untuk jarak jauh. Secara matematis, frekuensi rekomendasi yang ideal untuk dipilih dapat dinyatakan dengan persamaan (McNamara, 1991)

$$f_{c_{rek}} = \{f \in S | f \in A \cap B \cap C \cap D\} \dots\dots\dots 3)$$

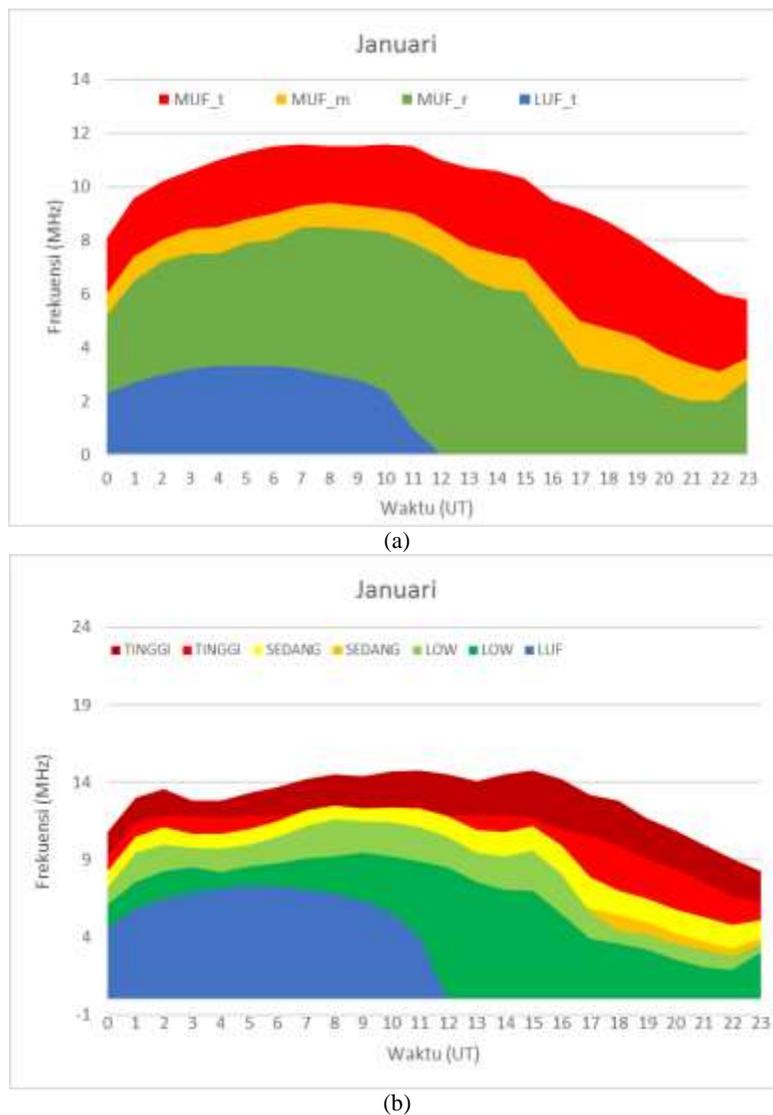
dengan $f_{c_{rek}}$ adalah frekuensi rekomendasi akhir yang merupakan irisan dari semua himpunan rentang frekuensi. Namun, pada penelitian ini, nilai f_c yang dipilih merupakan hasil salah satu irisan dari 2 himpunan, seperti daerah arsir yang dijelaskan pada Gambar 6.

Hasil dari proses pemilihan frekuensi akan menghasilkan nilai akhir rentang frekuensi kerja yang direkomendasikan untuk pihak DJBC. Hasil ini kemudian dapat diajukan kepada pihak SDPPI selaku regulator sebelum digunakan dalam kegiatan operasional. Nilai akhir dari frekuensi kerja f_c yang dapat digunakan dalam kegiatan operasional patroli laut Bea Cukai secara mutlak ditentukan dari hasil kajian yang dilakukan oleh pihak SDPPI.

4. Hasil Penelitian dan Pembahasan

Contoh hasil perhitungan prediksi frekuensi untuk sirkuit komunikasi antara PSO Batam dengan kapal patroli disajikan pada Gambar 7.

Pada Gambar 7, terdapat dua buah grafik yang menunjukkan hasil perhitungan untuk sirkuit NVIS (a) dan sirkuit PSO dengan lokasi kapal patroli terjauh pada bulan Januari 2001 (b). Dengan menggunakan metode manajemen frekuensi yang telah dijelaskan pada diagram alur Gambar 3, frekuensi kerja yang dapat digunakan berdasarkan kondisi tersebut adalah frekuensi yang berada di area grafik berwarna hijau. Area berwarna hijau merupakan rentang frekuensi yang berada di atas nilai LUF saat kondisi aktivitas Matahari tinggi dan berada di bawah nilai MUF saat kondisi aktivitas Matahari rendah. Nilai frekuensi tersebut memiliki peluang yang lebih tinggi untuk dapat digunakan pada setiap siklus aktivitas Matahari saat ionosfer berada dalam kondisi normal, yakni kondisi pada saat tidak terjadi fenomena badai ionosfer.



Gambar 7. Contoh Hasil Perhitungan Prediksi Frekuensi untuk (a) Sirkuit PSO dengan Kapal Patroli pada Mode NVIS, dan (b) PSO dengan 2 Wilayah Terjauh Jangkauan Kapal Patroli Laut

Penentuan rentang frekuensi kerja berdasarkan contoh hasil yang disajikan pada Gambar 7(a) juga diterapkan untuk 11 bulan lainnya dari tiga tahun yang mewakili tiap kondisi aktivitas Matahari. Hasil penentuan frekuensi tersebut disajikan pada Tabel 3, yang merupakan gabungan dari hasil analisis untuk perhitungan prediksi antara PSO dengan lokasi kapal patroli terjauh, seperti contoh yang disajikan pada grafik Gambar 7(b).

Tabel 3. Rentang Frekuensi Kerja Sirkuit PSO untuk Setiap Bulan

BULAN	2001 (TINGGI)		2005 (SEDANG)		2008 (RENDAH)	
	00-12 UT (MHz)	12-23 UT (MHz)	00-12 UT (MHz)	12-23 UT (MHz)	00-12 UT (MHz)	12-23 UT (MHz)
Januari	3,3 – 8,1	< 5,8	2,8 – 6	< 3,1	2,6 – 5,2	< 2
Februari	3,3 – 8,5	< 5,7	2,8 – 6,6	< 2,4	2,6 – 5,7	< 2,4
Maret	3,4 – 9,7	< 6,5	2,9 – 7,2	< 3,9	2,7 – 6,3	< 2,8
April	3,3 – 10,4	< 6,1	2,8 – 7,7	< 3,3	2,6 – 6,8	< 2,7
Mei	3,2 – 10,1	< 5	2,8 – 7,5	< 2,9	2,6 – 6,1	< 1,8
Juni	3,3 – 10,3	< 4,9	2,8 – 6,9	< 2,6	2,5 – 5,5	< 1,6
Juli	3,1 – 8,9	< 4,2	2,8 – 6,7	< 2,9	2,6 – 5,4	< 2,2
Agustus	3,3 – 9,4	< 4,7	2,8 – 7	< 2,9	2,6 – 5,8	< 2
September	3,4 – 10,4	< 7	2,8 – 7,6	< 2,9	2,6 – 6,8	< 2,1
Oktober	3,4 – 11	< 7,7	2,7 – 7,7	< 3,3	2,6 – 7	< 2,2
November	3,4 – 10,4	< 7,6	2,7 – 7,1	< 3,1	2,6 – 6,5	< 2,2
Desember	3,4 – 8,9	< 7	2,7 – 6,6	< 3,1	2,5 – 5,9	< 1,9

Hasil yang diperoleh pada Tabel 3 menunjukkan rentang frekuensi yang dapat digunakan setiap bulannya dalam tahun yang berbeda. Terlihat jelas bahwa pada saat aktivitas Matahari tinggi, yakni tahun 2001, batas atas dan batas bawah nilai rentang frekuensi yang direkomendasikan memiliki nilai lebih tinggi dibanding 2 tahun lainnya. Perbedaan nilai tersebut disebabkan oleh perbedaan tingkat ionisasi lapisan ionosfer (Tamer, Ozguc, Pektas, 2009). Nilai rentang frekuensi yang disajikan pada Tabel 3 kemudian diolah kembali berdasarkan irisan yang dinyatakan dalam persamaan 3. Hasil irisan tersebut disajikan pada Tabel 4 yang merupakan rentang frekuensi yang direkomendasikan untuk digunakan dalam operasional komunikasi radio antar-PSO dengan kapal patroli.

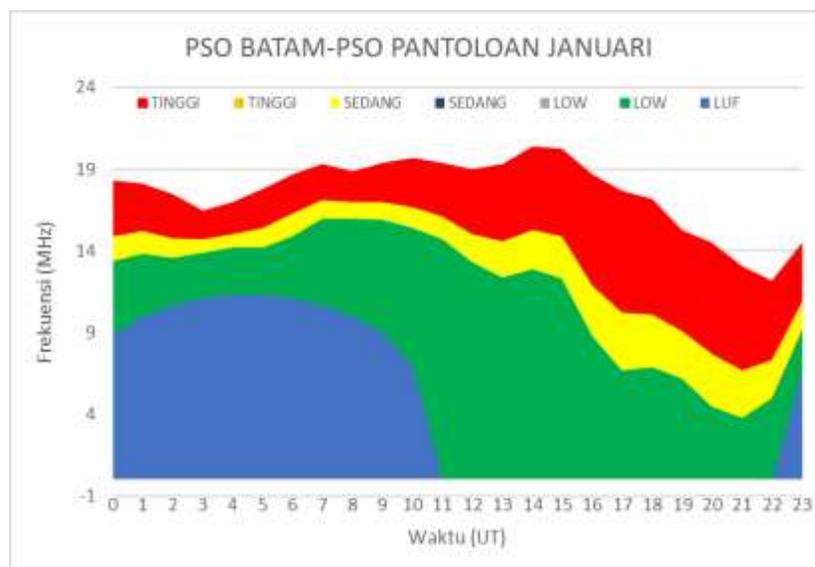
Tabel 4. Hasil Penentuan Rentang Frekuensi Kerja untuk Sirkuit PSO-Kapal Patroli

No	Frekuensi (MHz)	Peluang P(f)	Keterangan Penggunaan
F1	2,170–2,194	33,3%–50%	12–00 UT
F2	4,000–4,438	45,8%–62,5%	00–12 UT
F3	8,100–8,815	41,7%–62,5%	00–12 UT

Tabel 4 menyajikan 3 buah rentang frekuensi kerja yang direkomendasikan untuk kegiatan komunikasi antar-PSO dengan kapal patroli di wilayahnya. Setiap frekuensi juga disertakan dengan informasi nilai peluang keberhasilan perambatan gelombang radio dalam satu hari ($P(f)$) dan informasi keterangan waktu komunikasi. Nilai $P(f)$ yang tidak mencapai 100% dalam satu hari merupakan hal yang wajar akibat dari variasi harian lapisan ionosfer (Sa’at, Nagarajo, 2012). Oleh karena itu, rentang waktu komunikasi yang disajikan dalam kolom keterangan menjadi pertimbangan utama dalam teknis operasional komunikasi radio yang dilakukan.

Berdasarkan Tabel 4, terlihat bahwa frekuensi 2,170–2,194 MHz direkomendasikan untuk digunakan pada pukul 12 hingga 00 UT atau malam hari waktu setempat. Frekuensi 4,000–4,438 MHz direkomendasikan untuk digunakan pada siang hari untuk jarak dekat dan jarak jauh. Sedangkan frekuensi 8,100–8,815 MHz juga direkomendasikan digunakan pada siang hari, namun hanya untuk jarak yang jauh. Jarak dekat dimaksudkan untuk jarak antara kapal patroli dengan PSO yang menggunakan mode propagasi NVIS, yakni kurang dari 200 km (Witvliet *et al.*, 2015). Sedangkan jarak jauh dimaksudkan untuk jarak antara kapal patroli dengan PSO yang lebih besar dari 200 km dan masih berada di area operasional PSO. Perbedaan jarak ini didasari oleh perubahan sudut datang gelombang radio pada kanal ionosfer seiring dengan perhitungan geometri lokasi kapal patroli dengan PSO (Suhartini, 2010).

Contoh hasil perhitungan prediksi frekuensi untuk sirkuit komunikasi radio antar PSO disajikan pada Gambar 8.



Gambar 8. Contoh Hasil Perhitungan Prediksi Frekuensi untuk Sirkuit Komunikasi Radio Antar-PSO

Gambar 8 merupakan hasil perhitungan prediksi frekuensi untuk sirkuit komunikasi antara PSO Batam dengan PSO Pantoloan pada bulan Januari. Berdasarkan grafik tersebut, penentuan rentang frekuensi yang dapat digunakan berdasarkan waktu operasional komunikasi radio dapat dilakukan sebagai acuan frekuensi kerja rekomendasi pada bulan tersebut. Wilayah grafik berwarna hijau menunjukkan bahwa antara pukul 00 UT hingga 11 UT, frekuensi yang dapat digunakan berada pada rentang 9,7 MHz hingga 14,7 MHz. Perhitungan prediksi frekuensi beserta penentuan rentang frekuensi kerja juga dilakukan untuk 11 bulan lainnya sebagai bahan analisis penentuan frekuensi kerja yang mencakup semua kondisi aktivitas Matahari selama satu siklus.

Pada Tabel 5, disajikan hasil irisan rentang frekuensi rekomendasi antara seluruh stasiun PSO dengan menggunakan perhitungan dalam penjelasan Gambar 8. Rentang frekuensi tersebut merupakan rujukan yang diperuntukkan bagi operasional komunikasi radio antar-PSO. Pengolahan data yang disajikan pada Gambar 8 menghasilkan tabel frekuensi rekomendasi yang dapat digunakan setiap bulannya, seperti yang disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Rentang Nilai Frekuensi Kerja (f_c) untuk Sirkuit Komunikasi Antar-PSO

BULAN	2001 (TINGGI)		2005 (SEDANG)		2008 (RENDAH)	
	00-12 UT (MHz)	12-23 UT (MHz)	00-12 UT (MHz)	12-23 UT (MHz)	00-12 UT (MHz)	12-23 UT (MHz)
Januari	11,3 – 16,5	< 12,2	9,7 – 14,7	< 6,7	9 – 13,4	< 3,8
Februari	11,5 – 19,1	< 13,2	9,8 - 16	< 8,1	9,1 – 14,3	< 5,1
Maret	11,6 – 21,3	< 13,8	9,8 – 17,9	< 8,7	9,2 - 16	< 6,3
April	11,4 - 23	< 13,3	9,7 – 19,9	< 8,4	9,1 – 18,4	< 5,1
Mei	11 – 21,9	< 11,5	9,6 – 19,4	< 6,5	8,9 – 16,4	< 3,4
Juni	11,4 – 21,5	< 11,3	9,5 – 18,2	< 5,7	8,7 – 14,4	< 2,7
Juli	10,9 – 19	< 9,5	9,6 – 16,8	< 6,5	8,8 – 14,5	< 4,3
Agustus	11,2 – 18,2	< 10,2	9,6 – 16,6	< 6,7	8,9 – 15,2	< 4,4
September	11,7 – 18,9	< 13,2	9,6 – 16,4	< 6,8	9 – 15	< 4,4
Oktober	11,8 – 19,7	< 7,5	9,4 – 16,4	< 7,5	8,9 – 15,4	< 4,6
November	7,2 – 19,1	< 16,6	9,3 – 15,5	< 7	8,8 – 14,5	< 4,9
Desember	11,7 – 17,5	< 14	9,4 – 14,6	< 7	8,7 – 13,5	< 4

Irisan frekuensi dari hasil metode manajemen frekuensi berdasarkan perhitungan rentang frekuensi kerja yang disajikan pada Tabel 5 menghasilkan rentang frekuensi rekomendasi yang disajikan pada

Tabel 6. Perhitungan irisan dilakukan dengan memilih frekuensi yang bernilai serupa dan berada di antara batas bawah (*LUF*) dan batas atas (*MUF*) nilai frekuensi kerja dari 3 aktivitas Matahari. Sebagai contoh: Pada bulan Januari antara pukul 00–12UT, frekuensi yang dapat digunakan untuk 3 aktivitas Matahari yang berbeda berada antara frekuensi 11,3–16,5 MHz; 9,7–14,7 MHz, dan 9–13,4 MHz. Nilai tersebut menunjukkan terdapat irisan nilai frekuensi yang dapat digunakan, yakni antara 11,3 MHz hingga 13,4 MHz. Namun, dikarenakan perlu disesuaikan dengan alokasi frekuensi yang telah ditetapkan oleh Kemenkominfo (Kemkominfo, 2018), maka irisan frekuensi yang dapat digunakan adalah 12,230–13,200 MHz. Hasil irisan tersebut merupakan rentang frekuensi kerja yang direkomendasikan bagi kegiatan operasional komunikasi radio antar-PSO yang mencakup semua kondisi aktivitas Matahari selama satu siklus.

Tabel 6. Rentang Frekuensi Kerja Rekomendasi untuk Sirkuit Komunikasi Antar-PSO

No	Value (MHz)	Peluang P(f)	Keterangan Penggunaan
F1	2,170–2,194	50%–54,2%	12–00 UT, jarak Menengah
F2	4,000–4,063	33,3%–50%	12–00 UT, jarak Jauh
F3	12,230–13,200	25%–62,5%	00–12 UT, jarak Menengah
F4	16,360–17,410	41,67%–66,67%	00–12 UT, jarak Jauh

Serupa dengan hasil yang disajikan pada Tabel 4, rentang frekuensi yang direkomendasikan pada Tabel 6 memiliki informasi peluang keberhasilan (*P(f)*) dan keterangan waktu beserta jarak yang disarankan sebagai panduan kegiatan operasional komunikasi radio yang dilakukan. Berdasarkan lokasi PSO yang digunakan dalam perhitungan prediksi frekuensi, jarak antar-PSO umumnya mencapai lebih dari 1.000 km. Oleh karena itu, keterangan jarak yang digunakan pada Tabel 6 dikelompokkan ke dalam 2 kategori, yakni menengah dan jauh. Jarak menengah merupakan jarak antar-PSO yang mencapai 1.000 km hingga 2.000 km. Sedangkan jarak jauh merupakan jarak antar-PSO yang mencapai lebih dari 2.000 km.

Pada Tabel 6 terdapat 4 buah rentang frekuensi yang direkomendasikan. Rentang frekuensi kerja tersebut bernilai antara 2,170 MHz hingga 17,410 MHz. Kelompok rentang frekuensi yang rendah, yakni antara 2,170 hingga 4,063 MHz, dapat digunakan pada malam hari. Hal ini dikarenakan telah menurunnya nilai frekuensi gelombang radio yang dapat dipantulkan oleh lapisan ionosfer serta telah menghilangnya lapisan D ionosfer yang dapat menyerap energi gelombang radio pada frekuensi rendah. Sedangkan, untuk kelompok rentang frekuensi yang lebih tinggi, yakni antara 8,100 MHz hingga 17,410 MHz, direkomendasikan untuk digunakan di siang hari seiring dengan kehadiran lapisan D ionosfer yang dapat menyerap energi gelombang radio pada frekuensi yang lebih rendah (Zawdie, Drob, Siskind, Coker, 2017), serta masih cukup tingginya kerapatan elektron pada lapisan F ionosfer yang menyebabkan frekuensi gelombang radio yang dapat dipantulkan masih bernilai tinggi. Untuk mendapatkan seluruh nilai frekuensi kerja optimal yang dapat digunakan dalam kegiatan operasional, baik untuk komunikasi antara PSO dengan Kapal Patroli maupun komunikasi antar-PSO, maka rentang frekuensi yang direkomendasikan kepada pihak DJBC merupakan gabungan dari Tabel 4 dan Tabel 6, yang disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Rentang Frekuensi Rekomendasi yang Dapat Digunakan untuk Kegiatan Operasional Patroli Laut DJBC

No	Value (MHz)	Peluang P(f)	Keterangan Penggunaan
F1	2,170–2,194	33,3%–54,2%	12–00 UT, PSO-Kapal dan Antar-PSO
F2	4,000–4,063	33,3%–62,5%	00–12UT (PSO-Kapal), 12–00 UT (Antar-PSO)
F3	8,100–8,815	41,7%–62,5%	00–12UT (PSO-Kapal)
F4	12,230–13,200	25%–62,5%	00–12 UT, (Antar-PSO)
F5	16,360–17,410	41,67%–66,67%	00–12 UT, (Antar-PSO)

Tabel 7 merupakan rentang frekuensi yang dapat digunakan, baik untuk operasional antara PSO dengan Kapal Patroli maupun untuk komunikasi antar-PSO. Hasil gabungan menunjukkan bahwa rentang frekuensi 2,170–2,194 MHz dapat digunakan pada pukul 18 UT–00 UT atau di malam hari untuk waktu setempat, baik dalam kegiatan operasional antara PSO dengan kapal patroli maupun antar-PSO. Frekuensi yang bernilai rendah tersebut memungkinkan untuk digunakan di malam hari seiring dengan telah menurunnya densitas elektron pada lapisan *D* ionosfer yang mampu menyebabkan penyerapan energi gelombang radio.

Rentang frekuensi yang lebih tinggi, yakni 4,000–4,063 MHz dapat digunakan di malam hari, namun untuk komunikasi antar-PSO. Hal ini mengacu kepada sudut elevasi antena yang lebih rendah untuk jarak komunikasi yang jauh, seperti antar-PSO. Rentang frekuensi tersebut juga dapat digunakan untuk komunikasi antara PSO dengan kapal patroli, namun untuk penggunaan di siang hari. Frekuensi tersebut mampu mengatasi kendala yang muncul akibat meningkatnya penyerapan energi gelombang radio yang terjadi pada lapisan *D* ionosfer. Fleksibilitas waktu penggunaan rentang frekuensi 4,000–4,063 MHz menunjukkan bahwa rentang frekuensi tersebut memiliki peluang untuk digunakan setiap saat, namun untuk sirkuit komunikasi yang berbeda.

Selain menggunakan rentang frekuensi 4,000–4,063 MHz, frekuensi 8,100–8,815 MHz juga dapat digunakan di siang hari untuk komunikasi antara PSO dengan kapal patroli. Rentang frekuensi tersebut juga efektif untuk mengantisipasi peningkatan nilai *f_{min}* yang umumnya terjadi pada siang hari (Tripathi, Khan, Ahmad, Bhawre, Purohit, Gwal, 2011) seperti pada rentang frekuensi di bawahnya. Perbedaan antara rentang frekuensi 4,000–4,063 MHz dengan frekuensi 8,100–8,815 MHz untuk komunikasi antara PSO dan Kapal Patroli terletak pada fase siklus aktivitas Matahari. Keberhasilan menggunakan frekuensi 4,000–4,063 MHz lebih tinggi saat siklus aktivitas Matahari berada di fase rendah. Sedangkan keberhasilan penggunaan frekuensi 8,100–8,815 MHz lebih tinggi saat siklus aktivitas Matahari berada di fase tinggi.

Frekuensi 12,230–13,200 MHz dan 16,360–17,410 MHz merupakan rentang frekuensi yang dapat digunakan untuk komunikasi antara PSO untuk siang hari. Frekuensi 12,230–13,200 MHz digunakan untuk komunikasi antar-PSO pada jarak menengah, yakni antara 1.000 km hingga 2.000 km. Sedangkan frekuensi 16,360–17,410 MHz digunakan untuk komunikasi antar-PSO dengan jarak yang jauh, yakni > 2.000 km, seperti jarak antara PSO Batam dengan PSO Sorong. Perbedaan nilai frekuensi terhadap jarak tersebut mengacu kepada penjelasan perhitungan geometri sudut datang gelombang radio pada lapisan ionosfer yang mempengaruhi besaran nilai frekuensi yang dapat dipantulkan (Suhartini, 2010).

Nilai frekuensi yang disajikan pada Tabel 7 merupakan rentang frekuensi yang dapat diajukan perizinannya oleh pihak DJBC untuk kegiatan operasional. Namun, nilai pasti besaran frekuensi kerja yang diperoleh hanya dapat ditentukan oleh pihak SDPPI sebagai regulator. Secara operasional, teknis penggunaan frekuensi tersebut dapat dilakukan secara manual dengan mengadopsi teknik manajemen frekuensi atau secara otomatis dengan menerapkan sistem *Automatic Link Establishment* (ALE). Penerapan secara manual merujuk kepada waktu operasional frekuensi kerja berdasarkan kondisi lapisan ionosfer. Sedangkan penerapan dalam sistem ALE, frekuensi yang diperoleh dapat diimplementasikan ke dalam alokasi memori frekuensi yang tersedia untuk meningkatkan efisiensi waktu penentuan frekuensi kerja (Dear, 2011).

5. Kesimpulan

Hasil analisis perambatan gelombang radio untuk wilayah operasional Sub Dit Patroli Laut DJBC menunjukkan bahwa terdapat 5 rentang frekuensi yang dapat digunakan dalam kegiatan operasional komunikasi radio SSB Sub Dit Patroli Laut. Frekuensi pada rentang 2,170–2,194 MHz dapat digunakan pada malam hari, baik untuk komunikasi radio antara PSO dengan Kapal Patroli maupun antar-PSO. Frekuensi pada rentang 4,000–4,063 MHz dapat juga digunakan di malam hari, namun untuk komunikasi antar-PSO. Pada siang hari, frekuensi ini dapat digunakan untuk komunikasi antara PSO dengan kapal patroli. Rentang frekuensi tersebut memiliki peluang tertinggi untuk dapat digunakan setiap saat, namun untuk sirkuit komunikasi yang berbeda. Frekuensi pada rentang 8,100–8,815 MHz hanya dapat digunakan

pada siang hari untuk komunikasi antara PSO dengan Kapal Patroli. Sedangkan frekuensi pada rentang 12,230–13,200 MHz dan 16,360–17,410 MHz dapat digunakan untuk komunikasi antar-PSO pada siang hari untuk jarak antara PSO yang berada di antara 1.000 km hingga 2.000 km dan lebih dari 2.000 km. Rentang frekuensi tersebut dapat diajukan kepada pihak SDPPI sebagai regulator, yang kemudian dapat secara optimal digunakan, baik dengan memanfaatkan metode manajemen frekuensi yang bersifat manual maupun sistem ALE yang bersifat otomatis.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kepala Pusat Sains Antariksa LAPAN yang mendukung kegiatan penelitian ini dalam program penelitian *in-house* Pussainsa Tahun Anggaran 2018. Selain itu, penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Pimpinan Sub Direktorat Patroli Laut Direktorat Jenderal Bea Cukai yang berinisiasi untuk mengajukan permohonan riset bersama antara DJBC dengan LAPAN.

Daftar Pustaka

- Arthur, N.,P., Taylor, I.D., Eddie, K.,D. (2006). Advanced HF Spectrum Management Techniques. In *10th IET International Conference on Ionospheric Radio Systems and Techniques (IRST 2006)* (pp.152–156). doi:10.1049/cp:20060256. ISSN=0537-9989
- Bradley, P., A. (1996). Is There Still A Role For Propagation Predictions For Frequency Management of Ionospheric HF Communications Links?. In *Proceeding of IEE Colloquium on Frequency Selection and Management Techniques for HF Communications Feb. 1996*. DOI: 10.1049/ic:19960116
- Cilliers, P. J. Coetzee and J. Olckers. (2004). Ionospheric mapping for HF communications and HF direction finding. In *Proceeding of 7th Africon Conference in Africa (IEEE Cat. No.04CH37590), Gaborone* (pp. 145–154) Vol.1. doi: 10.1109/AFRICON.2004.1406650.
- Dear, V. (2011) Kajian Awal Efisiensi Waktu Sistem Automatic Link Establishment (ALE) Berbasis Manajemen Frekuensi. *Berita Dirgantara* Vol.12 No.12 Juni 2011. ISSN: 1411-8920.
- Giesbrecht, J. (2006). A monitoring tool for HF frequency management and license enforcement. In *Proceeding of 2006 10th IET International Conference on Ionospheric Radio Systems and Techniques (IRST 2006)*, 18–21 July 2006, DOI: 10.1049/cp:20060281
- Guo, J. Y., and Barton, S. K. (2002). *Fresnel Zone Antenna*. Boston: Kluwer Academic Publisher. ISBN 1-4020-7124-8
- Hudson, S., Horseman, A. and Sugier, J. (2016). Diurnal, Seasonal, and 11-yr Solar Cycle Variation Effects on the Virtual Ionosphere Reflection Height and Implications for the Met Office's Lightning Detection System, ATDnet, *American Meteorological Society Journals* <http://dx.doi.org/10.1175/JTECH-D-15-0133.1>
- IPS Radio and Space Services (2003). *GWPS 4.1 USER GUIDE*. AUSTRALIAN GOVERNMENT DEPARTMENT OF INDUSTRY SCIENCE AND RESOURCES
- Kemkominfo (2018). Peraturan Menteri Komunikasi dan Informatika Tentang Tabel Alokasi Spektrum Frekuensi Radio Indonesia. Retrieved June 24, 2019 from https://jdih.kominfo.go.id/produk_hukum/.
- McNamara, L., F. (1991). *The Ionosphere: Communications, Surveillance, and Direction Finding, Chapter 4.HF Radio Propagation* (p. 39–50). Krieger Publishing Company.
- NOAA (2018). Space Weather Prediction Center-Sunspot Number Progression. NOAA-SWPC Website. Retrieved September 10, 2018 from <https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>.
- Saakian, A. (2011). *Radio Wave Propagation Fundamentals*. Artech House. ISBN -13:978-1-60807-137-1
- Sa'at, N., B., and Nagarajoo, K., A. (2012). Modelling the diurnal variation of ionosphere in longitude and latitude over the equatorial region. In *Proceedings of 2012 International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE)*(pp. 40–43). Kuala Lumpur, Malaysia: doi: 10.1109/ICCCE.2012.6271148.
- Suhartini, S. (2009). Sudut Elevasi dan Ketinggian Antena Untuk Komunikasi Radio HF. *Berita Dirgantara* Vol. 9 No. 3 September 2008: 75–78. ISSN: 1411-8920
- Susetyo, W., Hendratoro, G., dan Affandi, A. (2008). Prediksi Jangkauan Jaringan Wireless HF untuk Sistem Peringatan Dini Bencana Di Indonesia. *Prosiding Seminar Nasional Informatika (SEMNASIF) Vol 1 No. 4*
- Tamer, A. T., Ozguc A., dan Pektas, R. (2009). The variability of foF2 in different phases of solar cycle 23, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 1364–6826
- Tripathi, S. C., Khan, P. A.,Ahmad A., Bhawre P., Purohit, P. K., and Gwal A. K., (2011). Effect of enhanced X-ray flux on the D and F layer ionospheric ionization during extreme solar events. In *Proceeding of the 2011 IEEE International Conference on Space Science and Communication (IconSpace)* (pp. 134–137). Penang, Malaysia. doi: 10.1109/IconSpace.2011.6015868

Wang, J., Ding, G., Wang, H. (2018). HF communications: Past, present, and future. *China Communications*, vol. 15, no. 9, (pp. 1–9). doi: 10.1109/CC.2018.8456447

Witvliet , B., A. (2015). Near Vertical Incidence Skywave Propagation: Elevation Angles and Optimum Antenna Height for Horizontal Dipole Antennas. *In IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 57, no. 1 (pp. 129–146). doi: 10.1109/MAP.2015.2397071

Zawdie, K., A., Drob, D., P., Siskind, D., E. and Coker, C. (2017). Calculating the absorption of HF radio waves in the ionosphere. *Radio Science*, vol. 52, no. 6, pp. 767–783, 2017. doi: 10.1002/2017RS006256