

Matahari dan sifat-sifat medium antarplanet.

**Mengapa Kajian Fisika Antariksa Penting?**

Di luar perspektif ilmiah di atas, ada alasan tertentu mengapa fisika antariksa harus diakui menjadi cabang ilmu tersendiri yang penting. Pertama, fisika antariksa mencakup wilayah penelitian yang luas dan batasan definisi yang jelas seperti telah disebutkan sebelumnya. Kedua, ada cukup banyak peneliti/ilmuwan yang aktif bekerja dalam bidang ini. Selain itu, para peneliti fisika antariksa juga telah membentuk organisasi profesi mereka sendiri, baik dalam skala nasional maupun internasional, mengadakan

konferensi khusus, menerbitkan jurnal ilmiah yang turut mengembangkan cabang ilmu ini, dan pusat-pusat khusus penelitian fisika antariksa. Ketiga, dari perspektif nilai ekonomi, selama beberapa dekade terakhir sumber daya moneter telah banyak diinvestasikan dalam bidang fisika antariksa, baik untuk peluncuran roket, pembuatan satelit, pembuatan pesawat antariksa, dan sebagainya. Hal ini tentu juga menekankan bahwa fisika antariksa sangat prospektif sehingga investasi besar layak didapatkan bidang ilmu ini.

Lingkungan antariksa merupakan lingkungan yang kompleks, terdiri dari plasma dan berbagai jenis radiasi, medan listrik/magnet,

partikel berenergi yang berinteraksi satu sama lain. Lingkungan antariksa tidak hanya penting karena manusia tertarik mempelajari fenomena dan hukum alam yang mendasarinya saja. Namun, karena lingkungan ini juga makin memengaruhi teknologi yang dibuat oleh manusia, khususnya teknologi terkait sistem satelit, sistem komunikasi, dan sistem navigasi.

**Pustaka**

[1] Prölss, Gerd. (2004). Physics of the Earth's Space Environment. 10.1007978-3-642-97123-5\_3.

**MAGNETOSFER**

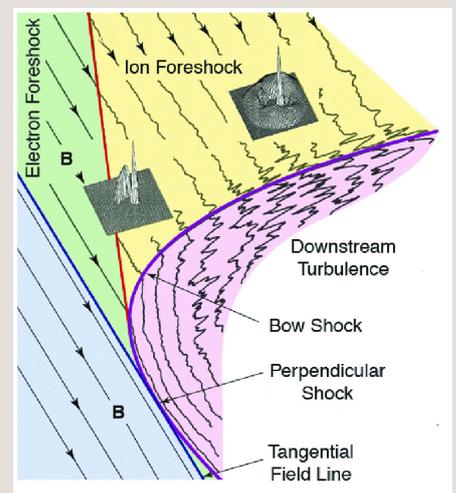
**Gelombang ULF dalam Plasma Antariksa (Pulsa Magnet)**

Oleh **S.C. Pranoto** | Pussainsa OR-PA BRIN

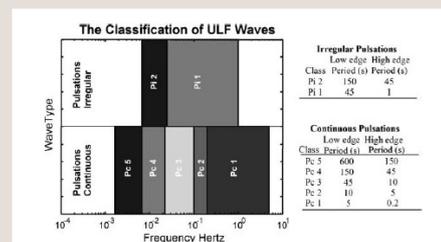
**P**ulsa magnet (*Geomagnetic Pulse*) atau lebih dikenal sebagai gelombang *Ultra Low Frequency* (ULF) geomagnet merupakan osilasi frekuensi rendah yang terjadi pada medan magnet Bumi. Gelombang ULF ini diakibatkan oleh berbagai proses pada plasma termagnetisasi. Berdasarkan klasifikasi IAGA pada 1963, gelombang ULF geomagnet dibagi berdasarkan

bentuk gelombang dan perioda gelombangnya. Osilasi dengan bentuk gelombang quasi-sinusoidal disebut sebagai *pulsations continues* (Pc), sedangkan bentuk gelombang yang tidak beraturan disebut sebagai *pulsation irregular* (Pi). Klasifikasi gelombang ULF berdasarkan rentang periodanya terbagi seperti pada Gambar 1.

Pulsa magnet dapat teramati melalui pengukuran langsung medan listrik dan medan magnet menggunakan satelit maupun menggunakan magnetometer landas Bumi. Pembangkitan pulsa magnet ini terkait erat dengan interaksi antara medan magnet Bumi dengan angin surya, medan magnet antarplanet maupun aktivitas geomagnet seperti badai magnet dan *substorm* magnetosferik. Proses yang terjadi di magnetosfer

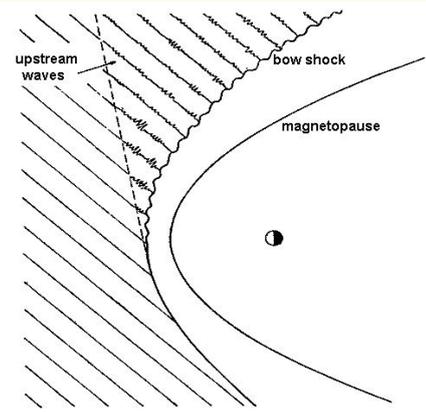


**Gambar 2.** Skema foreshock, bowshock, dan magnetosheat Bumi. Pulsa atau riak di medan magnet merepresentasi gelombang ULF (Balogh & Treumann, 2013)



**Gambar 1.** Klasifikasi gelombang ULF geomagnet berdasarkan rentang perioda (Jacobs et al., 1964)

akibat dari fenomena-fenomena tersebut menyebabkan ketidakstabilan distribusi tekanan, energi, dan *pitch angle* pada partikel bermuatan (Mcpheeron, 2005).



**Gambar 3.** Pada kondisi normal, gelombang *upstream* dibangkitkan pada bagian pagi oleh proton-proton yang dipantulkan oleh di sepanjang garis medan IMF. Untuk orientasi IMF radial terdapat sebuah daerah *foreshock* simetri yang lebar di sekitar titik subsolar

Gelombang ULF geomagnet yang terukur di permukaan Bumi berasal dari berbagai daerah di magnetosfer dengan mekanisme fisis yang bermacam-macam. Magnetosfer sendiri sangat dinamis, aktivitasnya cukup banyak dipengaruhi terutama oleh dua parameter angin surya yaitu tekanan dinamik dan fluks magnet arah selatan. Gelombang ULF yang ditimbulkan secara internal oleh magnetosfer kebanyakan berkaitan dengan fenomena badai magnet dan *substorm*. Hal itu karena kedua fenomena tersebut dalam proses terjadinya menghasilkan ketidakstabilan pada distribusi tekanan, energi, dan *pitch angle* dari partikel bermuatan, sehingga menimbulkan gelombang ULF geomagnet.

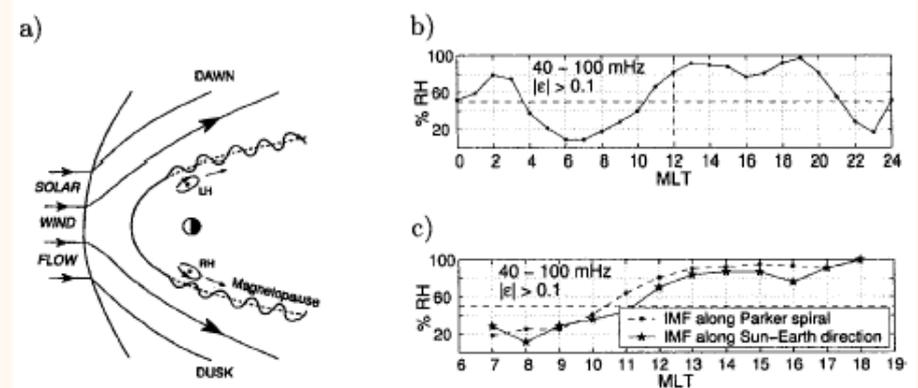
Ketika terjadi *substorm*, aliran plasma dari angin surya memasuki sistem magnetosfer melalui bagian *cusp*. Aliran ini kemudian mempengaruhi sistem arus dalam magnetosfer sehingga terjadi banyak perubahan medan magnet dan plasma magnetosfer yang memunculkan gelombang ULF geomagnet. Pulsa geomagnet

Pi2 terkait dengan aliran *burst*, sedangkan Pi1 dapat ditimbulkan oleh beberapa proses yang terjadi pada bagian puncak *Alfvén resonator* (Pilipenko *et al.*, 2002). Beberapa penelitian menunjukkan bahwa badai magnet klasik yang biasanya ditandai dengan adanya *sudden commencement* (gelombang kejut), tidak membangkitkan gelombang ULF. Gelombang ULF yang terdeteksi saat badai magnet umumnya terjadi akibat dari adanya *multiple substorm*.

Sumber pembangkit gelombang ULF geomagnet eksternal, yaitu angin surya, *ion foreshock*, *bowshock*, dan magnetopause. Angin surya adalah sumber gelombang ULF terutama pada frekuensi 1 mHz (Belcher & Davis, 1971), gelombang ini menjaral dan ditransmisikan melalui angin surya ke magnetosfer Bumi. *Ion foreshock* terjadi ketika ion-ion bergerak di depan daerah *bowshock* sepanjang garis gaya medan magnet dan berinteraksi dengan angin surya sehingga menghasilkan gelombang-gelombang dengan frekuensi yang bergantung pada kuat medan magnet angin surya (Russel & Flemming, 1976; Russel & Hoppe, 1983). Gelombang-gelombang ini berpropagasi sangat lambat relatif terhadap kecepatan angin

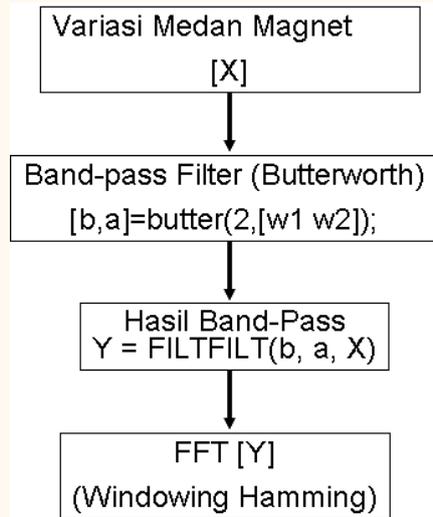
surya sehingga gelombang-gelombang ini tersapu ke arah bagian belakang menuju *bowshock*. Didekat daerah *foreshock* ion-ion sejajar medan sehingga membangkitkan gelombang frekuensi 1 mHz dengan amplitudo kecil. Sedangkan pada sudut yang lebih besar distribusi ion menyebar membentuk cincin di sekeliling medan magnet Bumi dan membentuk gelombang yang semakin lama semakin kecil, sehingga menyerupai gelombang kejut seperti pada Gambar 2. *Bowshock* merupakan gelombang kejut yang terbentuk ketika angin surya yang memiliki kecepatan supersonik berinteraksi dengan magnetosfer Bumi. Gelombang kejut yang terbentuk memiliki 2 tipe, yang pertama gelombang kejut yang tegak lurus *bowshock* dan gelombang kejut yang sejajar (paralel) *bowshock*. Gelombang kejut yang sejajar inilah yang menjadi sumber gelombang ULF geomagnet yang berpropagasi ke bagian belakang *bowshock* dan dapat memasuki magnetosfer Bumi.

Magnetopause merupakan daerah di antara *bowshock* dengan magnetosfer. Pada magnetopause ini beberapa tipe gelombang ULF geomagnet terbentuk salah satunya karena ada fluktuasi tekanan dinamik



**Gambar 4.** a) Polarisasi pembangkitan pola simetri (LH, di belahan pagi-hari, RH, di belahan petang-hari, Hughes, 1994). b) Pola polarisasi diurnal yang teramat pada stasiun AQU. c) Di bawah kondisi IMF radial dan spiral (Vellante *et al.*, 2002b)

dari angin surya yang kecepatannya sudah menurun karena pengaruh *bowshock* sebelumnya. Sumber gelombang ULF lainnya yang terjadi di magnetopause adalah perubahan tekanan dinamik yang bertahap (Southwood & Kivelson, 1990). Contohnya adalah efek magnetik dari arus Hall yang aliran arusnya berbentuk vorteks di ionosfer. Gelombang ULF yang terbentuk di luar magnetosfer ditransmisikan melalui magnetopause sehingga dapat terekam di permukaan Bumi. Sebagai contoh adalah gelombang ULF Pc3 yang pembangkitannya sangat terkait dengan kecepatan angin surya, memiliki amplitudo yang terkait dengan tinggi rendahnya parameter angin surya tersebut. Terdapat beberapa mekanisme transmisi gelombang ULF yang dibentuk di luar magnetosfer, sehingga dapat terdeteksi di permukaan Bumi, salah satunya adalah amplifikasi gelombang ULF. Amplifikasi gelombang ULF terjadi karena adanya dua proses, yaitu resonansi garis-garis medan magnet dan *cavity resonance*. Kedua proses tersebut berinteraksi dan saling



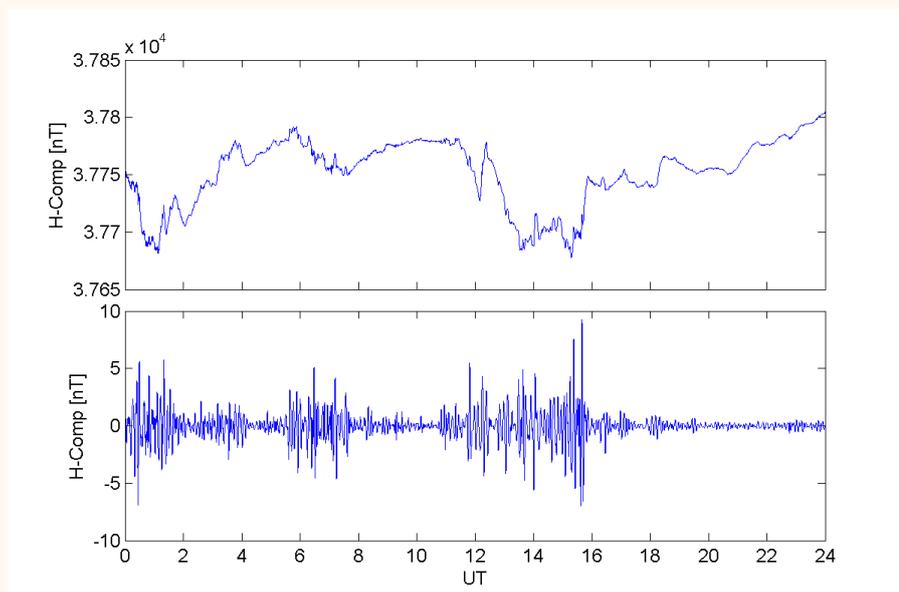
Gambar 5. Alur ekstraksi pulsa magnet dari variasi harian geomagnet

mempengaruhi, gelombang tegak pada *cavity* memberikan energi pada garis-garis gaya medan magnet sehingga dapat beresonansi.

Sumber pembangkit gelombang ULF geomagnet internal di dalam magnetosfer terkait dengan ketidakstabilan plasma. Terdapat beberapa proses yang menyebabkan ketidakstabilan tersebut yaitu, *gyro resonance* atau dapat juga disebut resonansi siklotron, mekanisme *drift-bounce resonance*, aliran plasma yang mengarah ke Bumi biasanya terjadi pada saat *substorm*, dan modulasi aurora elektrojet.

Resonansi siklotron yang terjadi di dalam magnetosfer dapat membangkitkan gelombang ULF geomagnet (Pc). Resonansi ion siklotron terjadi ketika gelombang Alfvén yang terpolarisasi mengakibatkan ion tersebut memiliki frekuensi pergeseran Dopler sebanding dengan *gyrofrequency*. Pada kondisi seperti itu partikel dan gelombang saling bertukar energi, saling menguatkan atau melemahkan, tergantung pada sudut antara kecepatan dan medan listrik yang menyebabkan terjadinya ketidakstabilan plasma yang membangkitkan pulsa magnet (Pc). Mekanisme *drift-bounce resonance* membangkitkan gelombang ULF. Ketika ion-ion bergerak bolak-balik antara dua *mirror point* yang terletak di kutub-kutub magnet, pada kondisi tertentu akan kehilangan energi yang diubah menjadi gelombang ULF. Sumber gelombang ULF lainnya yang berasal dari dalam magnetosfer adalah akibat semburan plasma pada saat *substorm* dari arah *magnetotail* yang terlontar ke arah Bumi. Gelombang ULF yang dibangkitkan oleh kejadian tersebut biasanya adalah pulsa magnet (Pi). Modulasi aurora elektrojet juga merupakan sumber pembangkit gelombang ULF di lintang tinggi pada sisi malam yang penyebab utamanya adalah presipitasi partikel bermuatan.

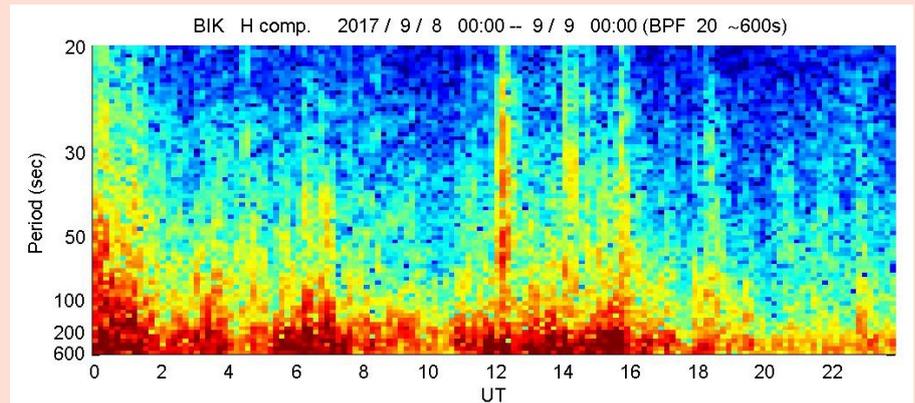
Dari hasil analisis jangka panjang diidentifikasi bahwa variasi siklus Matahari menunjukkan pengaruh yang jelas terhadap dua frekuensi dominan (*upstream waves* dan *resonant waves*) yaitu berupa pengurangan frekuensi mode resonansi terhadap peningkatan siklus Matahari. Ini konsisten dengan peningkatan kerapatan plasma di sepanjang garis



Gambar 6. Plot variasi harian geomagnet (atas) dan ekstraksi pulsa magnet Pc5 (bawah), komponen H stasiun Biak 8 September 2017

medan. Pada sisi lain, terdapat sejumlah aspek pulsa non-resonansi yang sangat bergantung pada parameter-parameter angin surya yang merupakan argumentasi mendasar bagi gagasan bahwa pulsa magnetik Pc3 berkaitan dengan gelombang siklotron yang dibangkitkan *upstream bow shock* yang menerobos ke dalam magnetosfer (Gambar 3). Ada dua mekanisme masuknya energi yang berperan dalam pembangkitan gelombang ULF ke dalam magnetosfer. Salah satunya adalah mekanisme masuknya energi terjadi melalui transmisi langsung dari *bow shock subsolar* (Russell *et al.*, 1983), dan mekanisme lainnya berupa mekanisme tidak langsung yang melibatkan modulasi partikel dan arus pada ionosfer dekat *cusp* (Engebretson *et al.*, 1991).

Karakteristik polarisasi mengindikasikan aspek penjaralan mode gelombang yang menjalar menuju arah-barat atau arah-timur. Arah polarisasi pada bidang horizontal ini masing-masing ditandai oleh LH (*left-handed*) dan RH (*right-handed*) seperti pada Gambar 4a. Ini sesuai dengan



**Gambar 7.** Plot spektrum Gelombang ULF (20–600 detik), komponen H stasiun Biak 8 September 2017

pembalikan pola polarisasi di sekitar tengah-hari (*noon*) di daerah lintang rendah (Lanzerotti *et al.*, 1981), (Saka & Kim., 1985), (Ansari & Fraser., 1986). Gambar 4b memperlihatkan hasil analisis statistik dengan menggunakan data sekitar 15 tahun dan ditemukan empat buah pembalikan polarisasi, yaitu pada pukul  $\sim 0$  LT,  $\sim 4$  LT,  $\sim 11$  LT,  $\sim 21$  LT. Ini menggambarkan adanya dua sumber dominan bagi pulsa magnetik. Salah satu dari sumber tersebut berada pada 1–2 jam sebelum tengah hari dan sumber lainnya berada di sekitar tengah malam. Sumber siang hari berhubungan dengan penetrasi gelombang *up-stream* pada magnetosfer yang mengalami pagi-hari, ditunjukkan pada Gambar 3, sedangkan orientasi

IMF radial menghasilkan pembalikan polarisasi di sekitar tengah hari sebagai akibat penetrasi gelombang simetrik, ditunjukkan Gambar 4c. Pembalikan polarisasi malam hari berkaitan dengan kurangnya kemunculan peristiwa transien yang dibangkitkan di *magnetotail* selama *onset substorm* dan penjaralannya menuju Bumi. Ekstraksi pulsa magnet dari data variasi medan magnet dapat dilakukan dengan *Butterworth filter* dan *Hamming* serta penerapan fungsi diskrit *Fast Fourier Transform (FFT)* satu dimensi untuk menunjukkan frekuensi dari pulsa magnetik seperti ditunjukkan pada Gambar 6 dan Gambar 7. ■

IONOSFER

## Deteksi Tsunami dari Perubahan Jumlah TEC (*Total Electron Content*) Ionosfer

Oleh

V. Volvacea | Pussainsa OR-PA BRIN

Tulisan ini menyajikan ulasan dari beberapa penelitian yang pernah dilakukan terkait bagaimana kejadian tsunami dapat dideteksi dari perubahan kerapatan kandungan elektron di lapisan ionosfer. Penelitian

tentang gempa Bumi dan tsunami sudah banyak dilaporkan, terutama terkait deteksi gelombang tsunami dari perubahan nilai TEC (*total electron content*) ionosfer. Tsunami biasanya diawali dengan terjadinya gempa Bumi. Indonesia terletak di kawasan rawan terjadi gempa Bumi, karena terletak pada daerah lempeng

aktif yang berpotensi terjadinya gempa Bumi tektonik, serta memiliki banyak gunung berapi, yang berpotensi terjadinya gempa vulkanik. Gempa menghasilkan gelombang infrasonik yang menimbulkan gangguan mekanis di atmosfer dekat permukaan laut, kemudian merambat ke atas ke dalam ionosfer. Gangguan tersebut lalu berinteraksi dengan