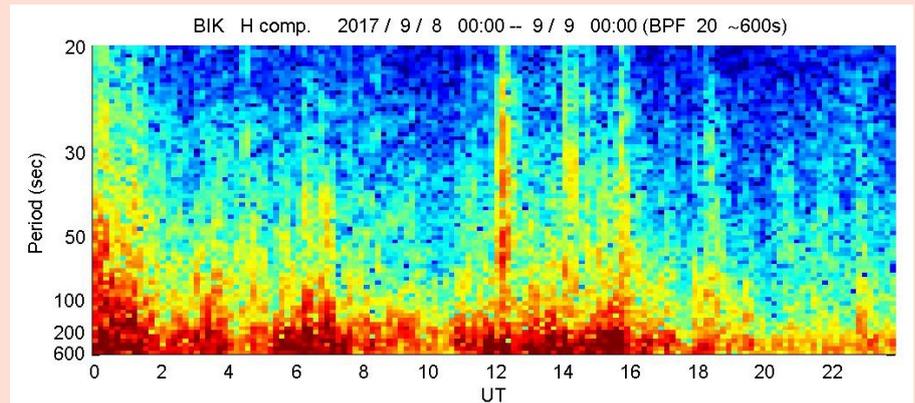


medan. Pada sisi lain, terdapat sejumlah aspek pulsa non-resonansi yang sangat bergantung pada parameter-parameter angin surya yang merupakan argumentasi mendasar bagi gagasan bahwa pulsa magnetik Pc3 berkaitan dengan gelombang siklotron yang dibangkitkan *upstream bow shock* yang menerobos ke dalam 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 ~ 0 LT, ~ 4 LT, ~ 11 LT, ~ 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

gas yang terionisasi pada lapisan ionosfer dan mengganggu plasma ionosfer, kerapatan elektron, TEC, dan lainnya. Ketika gelombang infrasonik tiba di ionosfer pada ketinggian 300 km, ia akan mentransfer energi melalui tumbukan antara ion dan elektron, sehingga terjadi anomali nilai TEC. Anomali ini kemudian dapat dideteksi menggunakan GNSS. Proses ini memerlukan waktu sekitar 8–10 menit.

Beberapa penelitian tentang anomali TEC terhadap gelombang seismik antara lain Muslim (2014), yang mengembangkan sistem pemantauan gelombang ionosfer menggunakan data GPS.

Penelitian ini didasari karena pemantauan gelombang laut dari posisi yang diukur GPS yang dikenal dengan *buoy* mengalami banyak kendala, seperti sistem keamanan yang lemah pada peralatan di laut lepas maupun gangguan dari alam. Oleh karena itu, diperlukan alat ukur yang lebih efektif. Muslim dkk (2014), menggunakan data TEC GPS yang bersifat *ground-based*. Stasiun GPS ini dapat menjangkau area hingga ratusan

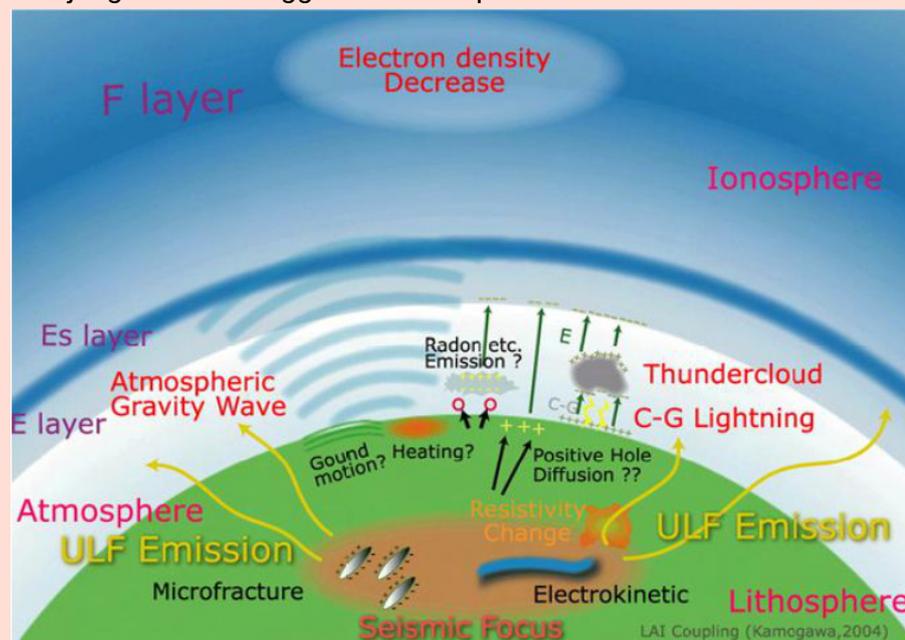
km, sehingga dapat melakukan pengamatan ionosfer di atas permukaan laut. Penelitian ini dilakukan dengan menguji data TEC GPS dari peristiwa gempa bumi dan Tsunami di Aceh pada tanggal 26 Desember 2014 dan gempa bumi Tohoku yang terjadi pada tanggal 11 Maret 2011. Metode yang digunakan terdiri dari tiga tahap, yaitu kombinasi data GPS otomatis, komputasi TEC otomatis, dan analisis spektrum otomatis. Hasil dari penelitian ini didapat bahwa selisih waktu terjadinya gempa hingga terjadinya gelombang infrasonik di ionosfer adalah 13 menit.

Penelitian lain dilakukan oleh Sunardi (2016), yang mendeteksi anomali TEC akibat gempa Bumi menggunakan metode korelasi GPS. Anomali TEC disebabkan oleh gelombang gravitasi atmosfer dan gelombang infrasonik yang menyebar ke ionosfer. Pengaruh gempa Bumi terhadap ionosfer terjadi melalui kopling litosfer-atmosfer-ionosfer (LAI). Lognonne *et al.*, (2006) menjelaskan bahwa amplitudo gelombang seismik terbesar di permukaan Bumi adalah

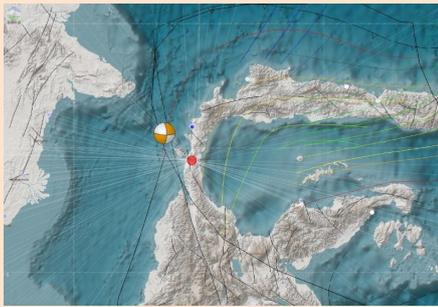
gelombang permukaan, salah satunya adalah gelombang Rayleigh.

Penelitian ini dilakukan dengan cara studi kasus pada peristiwa gempa Kebumen yang terjadi pada tanggal 25 Januari 2014, gempa Sumba yang terjadi pada tanggal 12 Februari 2016, dan gempa Halmahera yang terjadi pada tanggal 17 Februari 2016. Sunardi *et al.* menggunakan nilai TEC yang didapat dari *Center for Orbit Determination in Europe* (CODE) dalam bentuk *Global Ionosphere Map* (GIM). TEC dimodelkan dalam kerangka acuan geomagnetik Matahari menggunakan ekspansi harmonik bola derajat dan orde 15. Data TEC dipilih mundur 31 hari untuk mewakili kondisi normal. Pada setiap pengamatan, dihitung rata-rata TEC pada waktu tertentu selama 31 hari untuk mendapatkan variasi diurnal rata-rata bulanan TEC. Analisis korelasi dilakukan antara variasi diurnal TEC pada hari tertentu 31 hari dan TEC bulanan variasi diurnal rata-rata. Untuk mengetahui anomali TEC yang terjadi secara lokal atau global, data TEC yang paling dekat dengan gempa persilangan episenter berkorelasi dengan data TEC di sekitarnya. Gangguan geomagnetik seperti magnet badai akan menyebabkan anomali global, sebaliknya anomali efek gempa lebih regional.

Namun, kekurangan dari penelitian ini adalah metode yang digunakan tidak dapat mendeteksi efek gempa Bumi di ionosfer secara keseluruhan. Berdasarkan penelitian yang dilakukan, pada kasus gempa bumi Halmahera tidak terdeteksi adanya anomali TEC di ionosfer. Anomali TEC sebelum gempa



Gambar 1. Kopling Litosfer-Atmosfer-Ionosfer (Kamogawa, 2004)



Gambar 2. Lokasi terjadinya gempa Bumi Donggala pada tanggal 28 September 2018.

(Sumber: <https://www.bmkg.go.id/>)

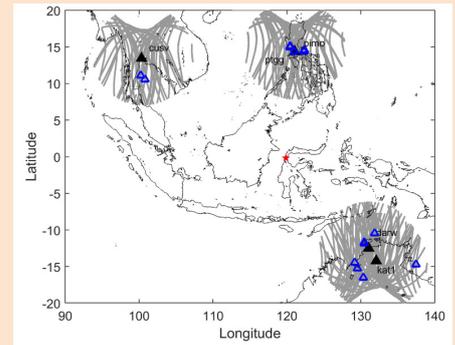
dapat diklasifikasikan sebagai prekursor gempa. Kegagalan teknik korelasi untuk mendeteksi efek gempa bukan disebabkan oleh ketidaksesuaian metode ini untuk mendeteksi efek ionosfer, tetapi karena resolusi temporal dari data TEC yang digunakan yaitu satu jam, sehingga efek gempa dalam gelombang gravitasi bentuk akustik dengan periode kurang dari setengah jam tidak akan muncul dalam data TEC resolusi satu jam.

Penelitian terbaru dilakukan pada peristiwa gempa Bumi dan tsunami di Donggala yang terjadi pada tanggal 28 September 2018 oleh Liu *et al.*, yang juga mengamati selisih waktu antara terjadinya gempa hingga terjadinya tsunami. Liu *et al.* mempelajari anomali nilai TEC sebelum terjadinya gempa hingga

setelah terjadinya tsunami. Gelombang seismik dan tsunami dari gempa besar dapat menginduksi *traveling atmospheric disturbances* (TAD) di dekat permukaan Bumi di pusat gempa dan daerah sumber tsunami (Liu *et al.*, 2011). TAD merambat secara vertikal pada kecepatan suara yang bergerak dari atmosfer ke ionosfer, membentuk *Tsunami Traveling Ionospheric Disturbances* (TTID) dan menginduksi gelombang gravitasi internal di dalamnya.

Mereka menggunakan 15 data TTID dari 5 *receiver* GNSS *ground-based* yang tersebar di Australia, Filipina, dan Asia. Kemudian, mereka menggunakan metode *time delay*, metode *circle*, teknik *ray-tracing*, dan teknik *beamforming*.

Metode *time delay* diterapkan pada jarak dan waktu datangnya TTID untuk memperkirakan kecepatan horizontal dari gelombang tsunami. Metode *circle* ini digunakan untuk menemukan area perpotongan, sehingga dapat menemukan lokasi asal tsunami. Teknik *ray-tracing* digunakan untuk mencari TTID. Dalam model kecepatan tertentu, teknik ini dapat digunakan untuk memperkirakan lokasi sumber,



Gambar 3. Lokasi stasiun pengamatan GNSS yang dilakukan oleh Liu *et al.*

dan menghitung waktu tempuh dari perkiraan lokasi sumber ke setiap TTID. Teknik *beamforming* digunakan untuk mencari lokasi sumber gelombang, menemukan jarak, menghitung waktu tempuh, serta menghitung kecepatan rata-rata dan standar deviasi dari beberapa TTID. Namun, penelitian ini masih perlu diperbaiki karena keterbatasan jumlah data, dan data yang digunakan masih terlalu jauh dari lokasi terjadinya gempa bumi dan tsunami. Jika penelitian ini dapat menggunakan data yang dekat dengan lokasi bencana, maka waktu deteksi gangguan ionosfer dapat diperoleh dalam waktu yang lebih singkat dan dapat segera mengonfirmasi terjadinya tsunami. Selain itu, perkiraan dalam menemukan sumber tsunami dapat diperoleh lebih presisi. ■

INSTRUMENTASI SAINS ANTARIKSA

Pengenalan Dasar Teleskop Radio

Oleh

P. Sitompul | Pussainsa OR-PA BRIN

Astronomi saat ini sangat penting dan sudah berkembang sangat maju untuk mengungkap proses pembentukan, perubahan, dinamika, dan karakteristik objek-objek astronomi di alam semesta. Objek-objek antariksa,

seperti Matahari, planet, komet, bintang, dan galaksi menjadi bagian penting untuk diamati. Dengan demikian, penelitian astronomi dan peralatan-peralatan yang memadai sangat diperlukan untuk mencari jawaban atas beberapa pertanyaan, seperti bagaimana alam semesta terbentuk, berapa umur alam semesta, bagaimana alam semesta ini akan berakhir,

dan masih banyak pertanyaan lainnya. Penemuan terbaru, seperti lubang hitam (*black hole*), makin membuka pemahaman baru kita tentang galaksi kita dan proses-proses yang terjadi di sekelilingnya.

Para astronom melakukan pengamatan astronomi dalam spektrum elektromagnetik yang sangat lebar, termasuk panjang