

Perubahan Lapisan F Ionosfer di Atas Pontianak pada Saat Gerhana Matahari Cincin 26 Desember 2019 (Ionospheric F Layer Changes Over Pontianak During 26 December 2019 Annular Solar Eclipse)

Agri Faturahman, Jiyo, Faruk Afero, Adi Purwono

Pusat Sains Antariksa LAPAN, Bandung

Riwayat naskah

Diterima: 01-12-2021

Direvisi: 18-02-2022

Disetujui: 10-03-2022

Korespondensi:

Agri Faturahman
agri.faturahman@lapan.go.id

Jiyo

jiyo@lapan.go.id

ABSTRAK

Gerhana Matahari cincin (GMC) yang terjadi pada tanggal 26 Desember 2019 melewati sebagian wilayah Indonesia, termasuk Pontianak. Berkaitan dengan peristiwa tersebut kami meneliti perubahan yang terjadi pada lapisan F ionosfer, khususnya frekuensi kritis lapisan F_1 (f_oF_1), frekuensi kritis lapisan F_2 (f_oF_2), dan ketinggian puncak kerapatan lapisan F_2 (h_mF_2) ionosfer di atas Pontianak ($0,03^\circ\text{LS}$, $109,33^\circ\text{BT}$, inklinasi magnetik - $15,97^\circ\text{LS}$). Pengamatan dilakukan setiap 5 menit dengan menggunakan ionosonda CADI sejak beberapa hari sebelum hingga sesudah gerhana. Ionogram yang dihasilkan kemudian diinterpretasikan (dilakukan *scaling*) secara manual. Hasil riset menunjukkan bahwa: (1) lapisan F_2 memberikan respons terhadap gerhana tersebut lebih lambat dibandingkan lapisan F_1 ; (2) dalam rentang waktu gerhana nilai f_oF_1 turun hingga 1,55 MHz dengan laju penurunan N_mF_1 rata-rata sekitar 29 elektron/ cm^3/s , kemudian naik pada fase pemulihan dengan laju rata-rata kenaikan sekitar 30 elektron/ cm^3/s ; (3) terjadi penurunan f_oF_2 hingga 19% selama fase penurunan, dengan laju penurunan N_mF_2 rata-rata ~ 21 elektron/ cm^3/s , kemudian kenaikan N_mF_2 pada fase pemulihan dengan laju rata-rata ~ 20 elektron/ cm^3/s ; dan (4) terjadi kenaikan puncak kerapatan elektron F_2 beberapa menit setelah puncak gerhana, dengan laju rata-rata pergerakan ke atas sekitar 27,8 m/s yang diduga disebabkan oleh pengurangan kerapatan elektron dan *drift* $E \times B$ ke atas sebagai akibat polarisasi medan listrik di daerah gerhana. Hasil ini mengonfirmasi hasil riset tentang pengaruh gerhana Matahari terhadap lapisan ionosfer lintang rendah yang telah dilakukan para peneliti sebelumnya.

Kata kunci: Gerhana Matahari cincin, Frekuensi kritis, Ketinggian puncak kerapatan elektron, Fase penurunan, Fase pemulihan, *Drift* vertikal

ABSTRACT

The annular solar eclipse (ASE) occurred across Indonesia on 26 December 2019, including Pontianak. In connection with this event, we investigated the changes of ionospheric F layer, especially in the critical frequency of the F_1 layer (f_oF_1), critical frequency of the F_2 layer (f_oF_2), and in the height of peak density of the F_2 layer (h_mF_2) above Pontianak (0.03°S , 109.33°E , a magnetic inclination of -15.97°LS). Observations are made every 5 minutes using CADI ionosonde between a few days before and after the ASE. The result of the ionogram is then manually interpreted (scaled). The research results show: (1) the F_2 layer responded to the eclipse slower than the F_1 layer; (2) in the ASE period, the f_oF_1 value drops to 1.55 MHz with an average N_mF_1 decrease rate of about 29 electrons/ cm^3/s , then increases in the recovery phase with an average increase rate of about 30 electrons/ cm^3/s ; (3) during the decreasing phase, f_oF_2 decreases by 19% with an average N_mF_2 decrease rate of ~ 21 electrons/ cm^3/s , then N_mF_2 increases in the recovery phase at an average rate of ~ 20 electrons/ cm^3/s ; and (4) there was an increase in the peak F_2 electron density a few minutes after the peak of the eclipse with an average upward movement rate of about

27.8 m/s. It is due to a reduction in electron density and an upward drift caused by the electric field's polarization in the eclipsed region. These results confirm the previous study on the effect of solar eclipses at low latitude ionospheric layers

Keywords: Annular solar eclipse, Critical frequency, Electron density peak height, Decreasing phase, Recovery phase, Vertical drift

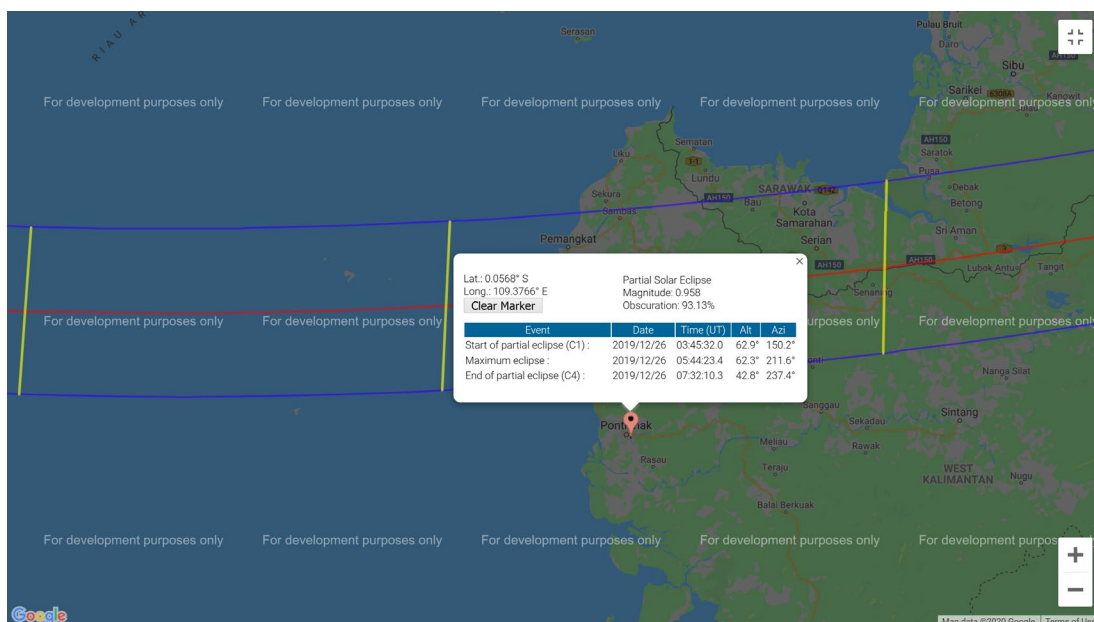
1. Pendahuluan

Gerhana Matahari cincin (GMC) terjadi pada tanggal 26 Desember 2019 melalui sebagian wilayah Indonesia (Gambar 1). Ketika terjadi gerhana Matahari, sebagian lingkungan permukaan Bumi tertutup oleh bayangan Bulan, termasuk lapisan ionosfer di atas Pontianak (0,03°LS, 109,33°BT, inklinasi magnetik -15,97°S). Di stasiun pengamatan Pontianak, kontak pertama GMC terjadi pada pukul 10.45 WIB (03.45 UT), gerhana mencapai maksimum pada pukul 12.44 WIB (05.44 UT) dengan tingkat keredupan (obscuration) oleh GMC sekitar 93%, dan gerhana berakhir pada pukul 14.32 WIB (07.32 UT).

Lapisan ionosfer adalah bagian dari atmosfer Bumi yang menempati ruang dari ketinggian sekitar 60 km hingga 1000 km. Lapisan ionosfer terbentuk dari ion dan elektron (*plasma*) hasil ionisasi molekul dengan energi ionisasi utamanya dari radiasi Matahari. Oleh karena itu, perubahan

intensitas radiasi Matahari akibat gerhana Matahari akan memberikan dampak terhadap kerapatan plasma di lapisan ionosfer. Selain ionisasi, rekombinasi antara molekul netral dengan molekul bermuatan, dan proses transportasi elektron juga ikut menentukan perubahan kerapatan plasma lapisan ionosfer di suatu tempat.

Pada awalnya riset tentang gerhana Matahari adalah tentang pengaruhnya terhadap atmosfer Bumi yang sudah dilakukan sebelum tahun 1834, sedangkan riset tentang pengaruh gerhana terhadap kelistrikan atmosfer atas sudah dimulai sejak awal abad ke-20 (Aplin *et al.*, 2016). Pengamatan pengaruh gerhana Matahari terhadap lapisan ionosfer dilakukan dengan berbagai peralatan pengamatan dan metode, baik pengamatan landas-bumi (misalnya Jose *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2019; Atulkar *et al.*, 2015; Choudhary *et al.*, 2011) maupun pengamatan menggunakan satelit (misalnya Wang *et al.*, 2010).



Gambar 1. Lintasan gerhana Matahari cincin tanggal 26 Desember 2019 (<https://eclipse.gsfc.nasa.gov/SEpath>).

Di Indonesia, penelitian tentang dampak gerhana Matahari terhadap lapisan ionosfer juga telah dilakukan dengan menggunakan data hasil pengamatan menggunakan ionosonda (misalnya Perwitasari & Muslim, 2009), menggunakan penerima GNSS (Muslim *et al.*, 2016; Vita *et al.*, 2017), menggunakan kombinasi beberapa perangkat pengamatan (Dear *et al.*, 2020), dan menggunakan data propagasi gelombang radio pada sirkuit komunikasi radio (Dear & Yulianto, 2016). Tujuan utamanya adalah mempelajari perubahan yang terjadi di lapisan tersebut ketika terjadi penurunan intensitas energi Matahari dan kondisi lainnya pada saat terjadi gerhana Matahari. Subjek yang diteliti meliputi perubahan kerapatan lapisan, ketinggian lapisan, temperatur ion, tingkat absorpsi gelombang radio, kejadian TID (*Travelling Ionospheric Disturbances*), bahkan perubahan *equatorial electro jet* (EEJ).

Meskipun demikian, riset tentang hal ini perlu terus dilakukan untuk melengkapi hasil riset lainnya. Alasan pertama, pengamatan ionosfer terdampak gerhana Matahari belum mencakup seluruh permukaan Bumi. Setiap kejadian gerhana Matahari memiliki zona gerhana tertentu yang tidak mencakup seluruh bagian Bumi sehingga tidak bisa mewakili ionosfer secara keseluruhan (global). Alasan kedua, waktu kejadian gerhana Matahari juga bervariasi dari pagi hingga sore hari. Alasan ketiga, secara global, lapisan ionosfer di daerah lintang rendah, lintang menengah, dan lintang tinggi memiliki perilaku berbeda-beda sehingga pengaruh setiap gerhana Matahari tidak akan betul-betul sama di masing-masing daerah. Oleh karena itu, riset tentang pengaruh gerhana Matahari terhadap lapisan ionosfer akan tetap diperlukan untuk melengkapi pengetahuan yang telah diperoleh sebelumnya.

Perubahan kondisi lapisan ionosfer akibat peristiwa gerhana Matahari akan memberikan pengaruh terhadap perambatan gelombang radio yang melewatinya. Saat ini gelombang radio sudah menjadi bagian penting dari sistem teknologi telekomunikasi dan navigasi modern yang bertumpu pada infrastruktur di antariksa (*space based*) sehingga perubahan yang terjadi di lapisan ionosfer, banyak atau sedikit, akan memengaruhi kinerja sistem teknologi tersebut. Oleh karenanya, riset tentang dampak gerhana Matahari terhadap perubahan di lapisan ionosfer akan sangat

berguna untuk langkah adaptasi teknologi komunikasi dan navigasi terhadap perubahan di lingkungan antariksa.

Tujuan dari riset ini adalah mengetahui respons lapisan F di atas Pontianak terhadap GMC tanggal 26 Desember 2019. Respons lapisan F ionosfer akan ditinjau berdasarkan parameter lapisan-lapisan tersebut, meliputi frekuensi kritis lapisan F_1 (f_oF_1), frekuensi kritis lapisan F_2 (f_oF_2), dan parameter h_pF_2 , yang digunakan sebagai estimasi untuk ketinggian lapisan F_2 dengan kerapatan elektron maksimum (h_mF_2).

2. Landasan Teori dan Tinjauan Pustaka

Morfologi lapisan ionosfer telah diketahui dengan baik terdiri dari tiga lapisan, yakni lapisan D, E, dan F. Lapisan D menempati ruang antariksa pada ketinggian sekitar 70–90 km, lapisan E menempati ketinggian sekitar 90–160 km, dan lapisan F menempati ruang di atasnya hingga ketinggian sekitar 1000 km. Lapisan E mempunyai lapisan tambahan, yaitu lapisan E-Sporadis yang kemunculannya tidak tetap. Lapisan F juga memiliki lapisan tambahan yang disebut lapisan F_1 dan $F_{1.5}$ (jarang muncul) yang hanya muncul pada siang hari. Dengan demikian, lapisan F dapat terbagi menjadi F_1 , $F_{1.5}$, dan F_2 , dengan F_2 sebagai lapisan yang paling tinggi. Energi utama untuk fotoionisasi dalam pembentukan semua lapisan tersebut bersumber dari Matahari sehingga variasinya bergantung kepada perubahan aktivitas Matahari.

Parameter utama lapisan ionosfer adalah kerapatan elektron (N) yang bersumber dari proses utama, yaitu laju ionisasi ($q(t)$), laju rekombinasi, dan laju kehilangan elektron pada saat tidak terjadi gerhana. Pada saat terjadi gerhana, perubahan kerapatan elektronnya ($\frac{\partial N}{\partial t}$) didekati dengan persamaan untuk lapisan Chapman seperti dirumuskan pada persamaan (1) dan (2) (Rishbeth, 1968).

$$\frac{\partial N}{\partial t} = E(t)q(t) - \alpha N^2 \dots\dots\dots(1)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} = E(t)q(t) - \beta N \dots\dots\dots(2)$$

$E(t)$ adalah fungsi gerhana Matahari, α adalah koefisien rekombinasi antara elektron dengan partikel netral, β merupakan koefisien kehilangan elektron. Persamaan (1) berlaku

untuk lapisan E dan F_1 , sedangkan persamaan (2) berlaku untuk lapisan F_2 , tidak hanya mengikuti persamaan (1) saja. Khusus untuk lapisan F_2 , masih ada faktor lain yang memengaruhi, yaitu proses transportasi.

Laju ionisasi $q(t)$ sebanding dengan intensitas radiasi Matahari yang sampai ke lapisan ionosfer. Jika intensitas radiasi Matahari berkurang maka laju produksi ion berkurang sehingga kerapatan elektron juga berkurang. Proses rekombinasi akan mengurangi kerapatan elektron di lapisan E dan F_1 , dipengaruhi oleh ketersediaan partikel netral yang melimpah di ketinggian lapisan tersebut. Persamaan kuadrat (1) menunjukkan bahwa proses pengurangan elektron di lapisan E dan F_1 akan berlangsung lebih cepat. Sementara itu, persamaan linear (2) mengindikasikan bahwa pengurangan kerapatan elektron pada lapisan F_2 berlangsung lebih lambat. Proses transportasi di ketinggian lapisan F_2 dapat menambah atau mengurangi kerapatan elektron sehingga proses perubahan kerapatan elektron di lapisan ini lebih kompleks.

Pada saat terjadi gerhana Matahari total maupun sebagian, lapisan ionosfer di daerah gerhana tertutup oleh bayangan Bulan sehingga memengaruhi proses fotoionisasi. Berkurangnya intensitas energi Matahari yang sampai ke lapisan ionosfer mengakibatkan terjadinya penurunan laju ionisasi sehingga kerapatan elektron di lapisan ionosfer ditandai dengan menurunnya kerapatan elektron maksimum lapisan F_1 (N_mF_1) dan kerapatan elektron maksimum lapisan F_2 (N_mF_2). Nilai N_mF_1 dan N_mF_2 masing-masing sebanding dengan f_oF_1 dan f_oF_2 .

Hasil penelitian terdahulu menunjukkan bahwa penurunan nilai f_oF_2 beragam dan bergantung dari lokasi titik pengamatan dan tingkat keredupannya. Riset dengan data pengamatan landas-bumi menunjukkan bahwa selama peristiwa gerhana Matahari 21 Mei 2012 nilai f_oF_2 di atas Taiwan mengalami penurunan sebesar 2 MHz (Chuo, 2013), sedangkan selama gerhana Matahari total 9 Maret 2016 nilai f_oF_2 mengalami penurunan hingga sebesar 4 MHz di atas Biak (Dear *et al.*, 2020). Penurunan nilai sebesar 4 MHz ini sebanding dengan penurunan 40% terhadap nilai f_oF_2 pada kondisi normal. Penurunan nilai f_oF_2 juga terjadi di atas Kototabang, Pontianak, dan Pameungpeuk, berturut-turut sebesar $\sim 0,5$ MHz, ~ 2 MHz, dan $\sim 0,5$ MHz selama gerhana Matahari tanggal 26 Januari 2009 (Perwitasari & Muslim, 2009).

Cukup banyak penelitian yang menggunakan data TEC (*Total Electron Content*) menunjukkan penurunan TEC pada saat gerhana (misalnya, Cherniak & Zakharenkova, 2018; Choudhary *et al.*, 2011; Chuo, 2013; Husin *et al.*, 2016; Muslim *et al.*, 2016; Coster *et al.*, 2017; Vita *et al.*, 2017; Pradipta *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2019). Hal yang sama diperoleh pada riset yang menggunakan data pengamatan satelit. Hasil pengamatan menggunakan satelit pada saat gerhana Matahari 21 Agustus 2017 menunjukkan adanya penipisan densitas plasma di ketinggian 450 km (Cherniak & Zakharenkova, 2018). Penelitian menggunakan *incoherent scatter radar* (ISR) menunjukkan penurunan kerapatan elektron dan temperatur ion lapisan ionosfer pada saat gerhana total 21 Agustus 2017 (Goncharenko *et al.*, 2018).

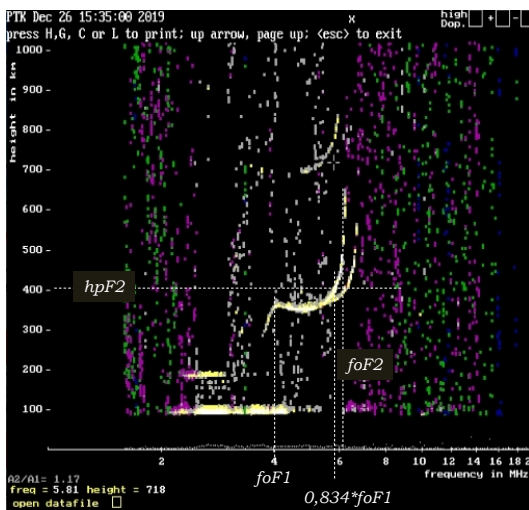
Selain penurunan kerapatan elektron, fenomena lain yang terjadi pada saat gerhana Matahari adalah kenaikan ketinggian lapisan ionosfer. Hal ini telah ditunjukkan pada beberapa penelitian yang sudah dilakukan (misalnya, Chuo, 2013; Atulkar *et al.*, 2015; Verhulst *et al.*, 2016; Stankov *et al.*, 2017; Dear *et al.*, 2020) yang menunjukkan bahwa pada saat gerhana Matahari terjadi kenaikan ketinggian lapisan F ($h'F$) serta ketinggian lapisan dengan kerapatan maksimum (h_mF_2)

3. Metodologi

Pengamatan ionosfer dilakukan di Balai Pengamatan Antariksa dan Atmosfer (BPAA) Pontianak ($0,03^\circ\text{LS}$, $109,33^\circ\text{BT}$) dengan menggunakan ionosonda CADI (*Canadian Advanced Digital Ionosonde*). Prinsip kerja ionosonda CADI adalah memancarkan sinyal/pulsa gelombang radio pada rentang frekuensi 1,6–24 MHz dan menerima/merekam sinyal gelombang tersebut yang dipantulkan oleh lapisan ionosfer. Proses pemancaran (*sounding*) sinyal dilakukan secara berurutan dengan beda antarfrekuensi secara logaritmik dari 20 KHz hingga 200 KHz. Daya pancar rata-rata 60 watt dan daya pancar maksimum mencapai 600 watt. Satu kali pengamatan memerlukan waktu sekitar 2,5 menit dan untuk riset ini dilakukan *sounding* setiap 5 menit sekali.

Tidak semua sinyal yang dipancarkan ionosonda akan dipantulkan oleh lapisan ionosfer, melainkan hanya sinyal yang frekuensinya sama dengan frekuensi plasma lapisan ionosfer. Sinyal yang diterima kembali

oleh lapisan ionosfer direkam dalam bentuk ionogram (Gambar 2). Sumbu vertikal menunjukkan ketinggian lapisan pantul (dalam satuan km) dan sumbu mendatar merepresentasikan frekuensi plasma lapisan ionosfer. Ionogram yang dihasilkan ionosonda CADI kemudian diinterpretasikan melalui proses *scaling* sehingga diperoleh nilai parameter frekuensi minimum (f_{min}), frekuensi kritis lapisan F₁ (f_oF_1), frekuensi kritis lapisan F₂ (f_oF_2), dan hampiran ketinggian lapisan ionosfer dengan frekuensi plasma tertinggi (h_pF_2). Parameter terakhir ini ditentukan dengan melakukan *scaling* terhadap jejak lapisan F pada ionogram dengan frekuensi = $0,834 \times f_oF_2$ (UAG-Report 23A).



Gambar 2. Ionogram hasil pengamatan di stasiun Pontianak menggunakan ionosonda CADI.

Respons ionosfer terhadap gerhana dianalisis berdasarkan penyimpangan nilai f_oF_1 , f_oF_2 , dan h_pF_2 pada saat gerhana terhadap nilai pembandingan (*baseline*) dari tiga parameter tersebut. Jika simpangan terhadap *baseline* cukup besar maka gerhana telah menyebabkan perubahan lapisan F. Langkah selanjutnya adalah menentukan waktu mulainya penurunan (t_0) masing-masing parameter, waktu tercapainya penurunan terdalam (t_1) dan nilai minimumnya, serta waktu berakhirnya masa pemulihan (t_2) dan nilai maksimumnya. Berdasarkan perbedaan nilai masing-masing parameter pada saat t_0 ,

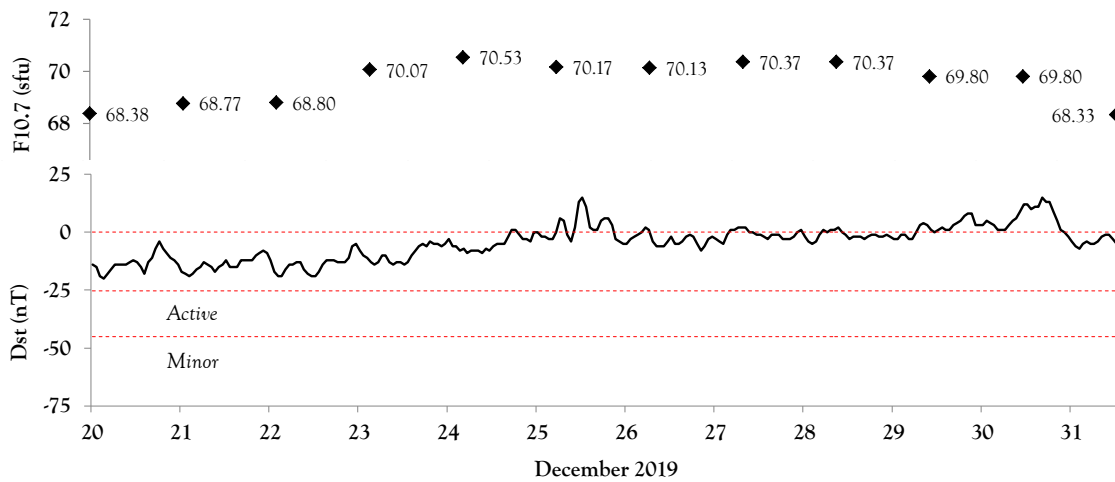
t_1 , t_2 , akan ditentukan perubahan lapisan F. Selain itu, akan dianalisis pula perubahan kerapatan elektron maksimum, N_mF yang nilainya diturunkan dari frekuensi kritis lapisan menggunakan persamaan (3).

$$N_mF = \frac{f_o^2}{80,5 \times 10^6} \dots \dots \dots (3)$$

Dengan f_o adalah frekuensi kritis lapisan F₁ (f_oF_1) atau frekuensi kritis lapisan F₂ (f_oF_2) dan N_mF dalam satuan elektron/cm³. Jadi, dengan persamaan (3) dapat ditentukan N_mF_1 untuk lapisan F₁ dan N_mF_2 untuk lapisan F₂. Berdasarkan penurunan dan kenaikan kedua parameter tersebut pada t_0 , t_1 , dan t_2 , ditentukan estimasi laju rata-rata penurunan dan kenaikan kerapatan elektron akibat gerhana.

Penurunan nilai f_oF_1 dan f_oF_2 menunjukkan berkurangnya kerapatan elektron lapisan F₁ dan F₂, sedangkan parameter h_pF_2 digunakan sebagai pendekatan untuk peristiwa kenaikan h_mF_2 . Lapisan F₁ relatif stabil lebih terkendalkan oleh aktivitas Matahari (*solar controlled*) sehingga sebagai *baseline* untuk f_oF_1 cukup digunakan nilai rata-rata f_oF_1 tanggal 25 dan 27 Desember 2019. Sementara itu, perubahan lapisan F₂ tidak hanya dikendalikan oleh aktivitas Matahari semata sehingga *baseline* untuk f_oF_2 dan h_pF_2 digunakan nilai rata-rata hasil pengamatan tanggal 22, 23, 24, 25, 27, dan 28 Desember 2019.

Selama rentang waktu 22–28 Desember 2019 nilai fluks Matahari pada panjang gelombang 10,7 cm atau F10,7 (<https://spaceweather.gc.ca/forecast-prevision/solar-solaire/solarflux/sx-5-flux-en.php?year=2019>) di antara 68,6 hingga 70,9 sfu dan indeks Dst (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst/dir/>) di antara -19 hingga 15 nT (lihat Gambar 3). Nilai Dst dan F10,7 tersebut memastikan bahwa pada hari-hari tersebut aktivitas Matahari dan geomagnet relatif tenang sehingga perubahan yang terjadi di lapisan F benar-benar hanya disebabkan oleh gerhana Matahari.



Gambar 3. Grafik F10,7 dan indeks Dst selama 20–31 Desember 2019 yang menunjukkan bahwa Matahari dan magnetosfer dalam kondisi tenang.

4. Hasil dan Pembahasan

Berdasarkan Gambar 3 telah ditunjukkan bahwa selama GMC tanggal 26 Desember 2019, aktivitas Matahari dan magnetosfer dalam kondisi tenang. Hal ini memastikan bahwa perubahan kerapatan elektron dan ketinggian lapisan ionosfer di atas Pontianak adalah dampak dari gerhana tersebut.

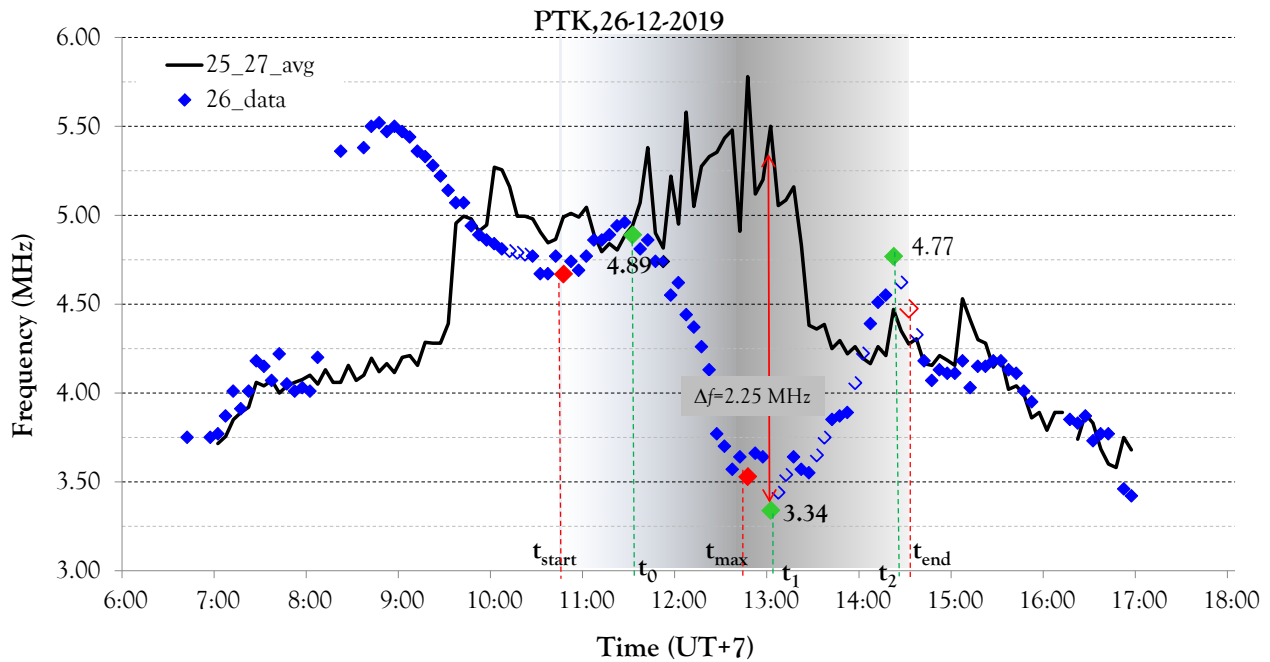
Gambar 4 menunjukkan hasil pengolahan data f_oF_1 dan data pembandingnya sebelum, saat terjadi gerhana, dan sesudahnya, serta waktu gerhana dan fase perubahan f_oF_1 . Tanda wajik (\blacklozenge dan \blacklozenge) menunjukkan f_oF_1 pada tanggal 26 Desember 2019 dan garis tegas adalah rata-rata f_oF_1 tanggal 25 dan 27 Desember 2019 sebagai *baseline*. Tanda \blacklozenge merupakan nilai f_oF_1 hasil pengamatan dan tanda \blacklozenge adalah nilai hasil interpolasi linear. Data interpolasi digunakan sebagai data bantuan dalam analisis. GMC terjadi selama t_{start} , hingga t_{end} , fase penurunan f_oF_1 antara t_0 hingga t_1 , dan fase pemulihan antara t_1 hingga t_2 .

Waktu mulai penurunan nilai f_oF_1 pada pukul 11.30 WIB (t_0) dengan nilai $f_oF_1 = 4,89$ MHz atau sebanding dengan $N_mF_1 = 297.045$ elektron/cm³. Terjadi keterlambatan waktu sekitar 45 menit untuk terjadinya penurunan f_oF_1 (fase penurunan). Kemudian terjadi penurunan nilai f_oF_1 seiring dengan kenaikan tingkat keredupan zona gerhana. Penurunan dari f_oF_1 terbesar terjadi sekitar pukul 13.00 WIB (t_1) dengan nilai 3,34 MHz ($N_mF_1 = 138.578$ elektron/cm³) bersamaan dengan waktu maksimum gerhana (t_{max}). Selama

rentang waktu $t_1 - t_0 = 90$ menit telah terjadi penurunan f_oF_1 sebesar 4,89 MHz – 3,34 MHz = 1,55 MHz atau penurunan kerapatan elektron sebesar 297.045 elektron/cm³ – 138.579 elektron/cm³ = 158.466 elektron/cm³). Jadi, selama fase kenaikan tingkat keredupan zona gerhana, estimasi rata-rata penurunan N_mF_1 sekitar 29 elektron/cm³/s.

Fase kenaikan/pemulihan kembali nilai f_oF_1 dimulai pada pukul 13.00 WIB atau sekitar 14 menit setelah maksimum gerhana. Seiring dengan penurunan tingkat keredupan zona gerhana, nilai f_oF_1 berangsur-angsur naik hingga pukul 14.20 WIB (t_2) atau sekitar 12 menit sebelum gerhana berakhir, dengan nilai $f_oF_1 = 4,77$ MHz ($N_mF_1 = 282.645$ elektron/cm³). Jadi, selama rentang waktu $t_2 - t_1 = 80$ menit, telah terjadi kenaikan N_mF_1 sebesar 144.066 elektron/cm³. Dengan demikian, selama fase pemulihan terjadi kenaikan N_mF_1 dengan estimasi laju kenaikannya sekitar 30 elektron/cm³/s.

Penurunan f_oF_1 yang terjadi bersamaan dengan waktu gerhana ini sesuai dengan hasil riset terdahulu (Le *et al.*, 2008^{a,b}; Panda *et al.*, 2015; Stankov *et al.*, 2017). Simpangan maksimum f_oF_1 terhadap nilai *baseline* sebesar 2,25 MHz terjadi pada pukul 13.35 WIB. Hal ini menunjukkan bahwa selama GMC 29 Desember 2019 telah terjadi penurunan f_oF_1 hingga 39% relatif terhadap nilainya pada saat kondisi normal. Penurunan relatif ini juga sesuai dengan hasil riset yang pernah dilakukan Goncharenko *et al.*, (2018).



Gambar 4. Grafik nilai f_oF_1 tanggal 26 Desember 2019 (♦: hasil pengamatan; ◇: hasil interpolasi) dan nilai rata-ratanya (garis tegas) selama rentang waktu 25–27 Desember 2019.

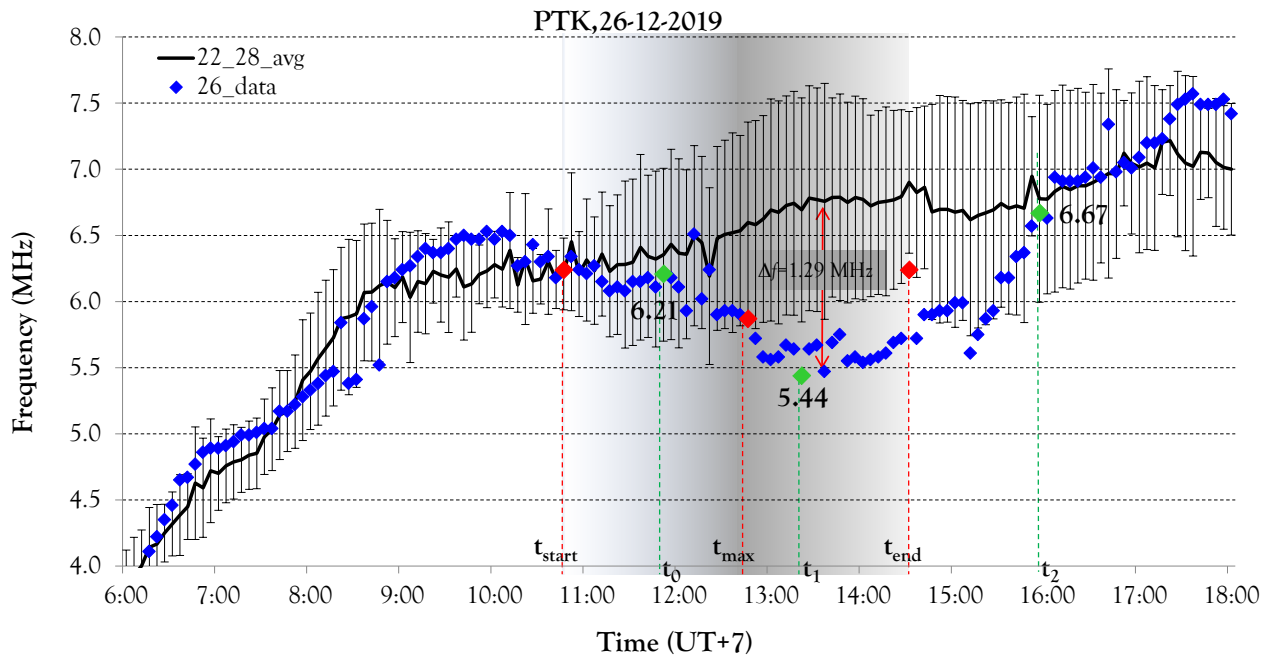
Perubahan lapisan F_2 ditunjukkan pada Gambar 5. Tanda ♦ dan ◇ adalah f_oF_2 hasil pengamatan dan interpolasi, sedangkan garis tegas merupakan rata-rata f_oF_2 hasil pengamatan tanggal 22 hingga 28 Desember 2019 tanpa data tanggal 26 Desember 2019. Rentang waktu gerhana ditandai dengan t_{start} , t_{max} , dan t_{end} , sedangkan fase penurunan dan pemulihan ditandai dengan t_0 , t_1 , dan t_2 .

Penurunan nilai f_oF_2 (fase penurunan) mulai terjadi setelah pukul 11.50 WIB (t_0) atau 65 menit setelah kontak pertama (t_{start}) gerhana (pukul 10.45 WIB) dengan nilai $f_oF_2 = 6,21$ MHz atau sebanding dengan kerapatan elektron, $N_mF_2 = 479.057$ elektron/cm³. Seiring dengan penurunan tingkat keredupan zona gerhana, nilai f_oF_2 turun hingga mencapai nilai terendah 5,44 MHz ($N_mF_2 = 367.622$ elektron/cm³), pada pukul 13.20 WIB (t_1) atau sekitar 30 menit setelah puncak gerhana (pukul 12.44 WIB). Durasi penurunan f_oF_2 adalah $t_1 - t_0 \sim 90$ menit sehingga dapat ditentukan estimasi laju rata-rata penurunan kerapatan elektron sekitar 21 elektron/cm³/s. Setelah t_1 , f_oF_2 mengalami kenaikan (pemulihan) hingga mencapai 6,67 MHz ($N_mF_2 = 552.657$ elektron/cm³) pada pukul 15.55 WIB (t_2) atau 85 menit setelah akhir gerhana, mengikuti kenaikan tingkat keredupan zona gerhana pada fase pemulihan. Jadi, durasi fase pemulihan f_oF_2 adalah $t_2 - t_1 = 155$ menit sehingga diperoleh

estimasi untuk laju rata-rata kenaikan kerapatan elektron sekitar 20 elektron/cm³/s.

Simpangan f_oF_2 terbesar terhadap *baseline* mencapai 1,29 MHz pada pukul 13.35 WIB atau terjadi penurunan f_oF_2 hingga 19% relatif terhadap nilai f_oF_2 *baseline*. Penurunan f_oF_2 hingga 19% ini masih dalam rentang penurunan f_oF_2 pada GMC tanggal 30 Mei 1984, yaitu antara 15% hingga 30% (Salah *et al.*, 1986). Penurunan f_oF_2 tersebut lebih rendah dari penurunan f_oF_2 pada saat gerhana Matahari total. Penurunan f_oF_2 pada saat gerhana Matahari total tanggal 9 Maret 2016 mencapai maksimum 40% (Dear *et al.*, 2020) dan saat gerhana Matahari total 27 Agustus 2017 antara 30% hingga 40% (Goncharenko *et al.*, 2018).

Efek keterlambatan antara t_{start} dengan t_0 , antara t_{max} dengan t_1 , dan antara t_{end} dengan t_2 , menunjukkan adanya proses kompleks gabungan yang bekerja, bukan hanya efek gerhana saja. Proses transpor disebabkan oleh perbedaan kerapatan plasma dan perbedaan temperatur (Risbeth, 1968). Selain itu, variasi respons ini juga mungkin dipengaruhi oleh waktu lokal saat terjadinya gerhana. Perubahan f_oF_2 yang diamati saat GMC 26 Desember 2019 ini semakin menguatkan hasil riset dan temuan yang telah dilaporkan oleh peneliti-peneliti sebelumnya.



Gambar 5. Grafik nilai f_oF_2 tanggal 26 Desember 2019 (♦) dan nilai rata-ratanya (garis tegas) selama rentang waktu 22–28 Desember 2019.

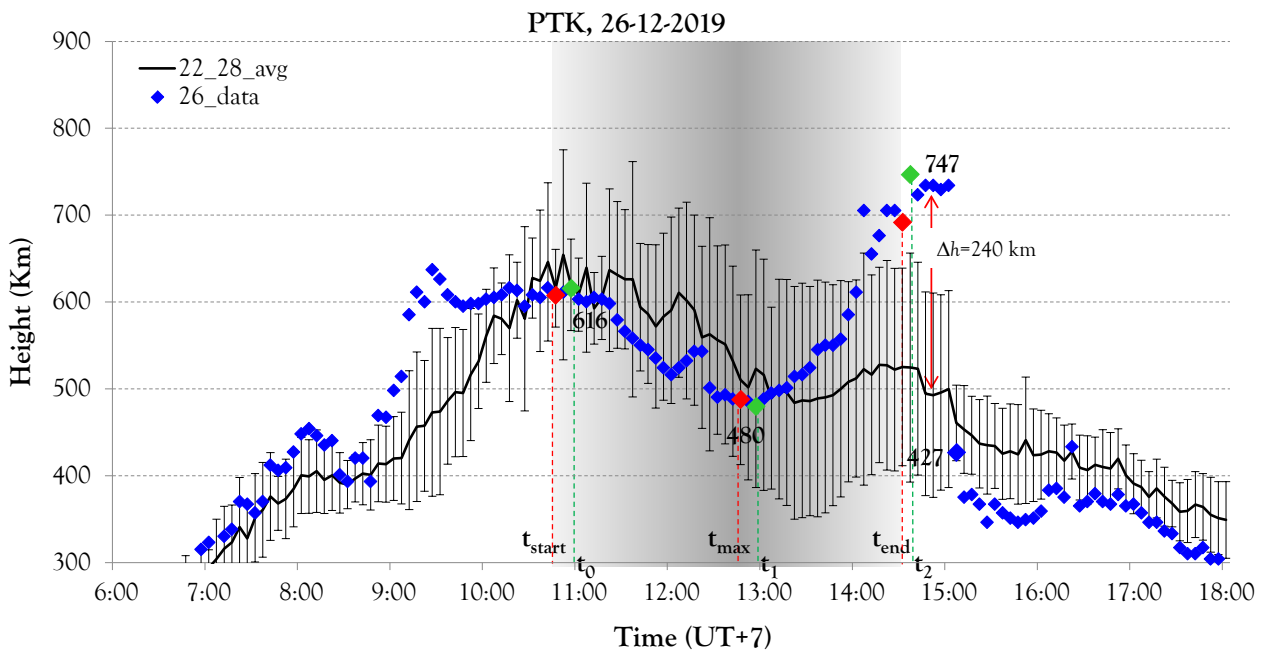
Perbedaan jeda waktu respons lapisan F_1 dan F_2 terhadap GMC 26 Desember 2019 menunjukkan adanya perbedaan proses perubahan kedua lapisan tersebut. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh perbedaan proses rekombinasi di ketinggian lapisan F_1 dan lapisan F_2 . Partikel netral di ketinggian lapisan F_1 lebih melimpah dibandingkan lapisan F_2 sehingga tumbukan antara elektron dengan partikel netral terjadi lebih sering dan pada akhirnya pengurangan jumlah elektron di lapisan F_1 berlangsung lebih cepat. Sementara itu, pengurangan jumlah elektron di lapisan F_2 berlangsung lebih atau sangat lambat, ditambah proses transpor di lapisan F_2 , mengakibatkan pengurangan kerapatan elektron berlangsung lebih lambat. Demikian pula kompleksitas proses di lapisan F_2 ini yang mengakibatkan keterlambatan waktu fase pemulihan.

Nilai laju penurunan dan laju kenaikan kerapatan elektron ternyata hampir sama di lapisan F_1 , begitu pula di lapisan F_2 . Hal ini menjadi satu karakteristik tersendiri respons lapisan F di atas Pontianak terhadap fenomena GMC ini. Selain kemiripan tersebut, terdapat juga perbedaan karakteristik antara respons lapisan F_1 dan F_2 . Fase pemulihan di lapisan F_2 masih berlangsung meskipun rentang waktu gerhana telah usai, sedangkan semua fase di lapisan F_1 terjadi sepanjang rentang waktu gerhana. Perbedaan antara respons lapisan F_1 dan F_2 ini menunjukkan bahwa perubahan lapisan F_1 lebih

dikendalikan oleh aktivitas Matahari, sedangkan perubahan lapisan F_2 tidak hanya dikendalikan oleh aktivitas Matahari, melainkan oleh faktor lainnya juga.

Perubahan ketinggian lapisan F_2 dengan frekuensi maksimum (h_mF_2), yang nilainya dihipotesiskan dengan h_pF_2 , ditunjukkan pada Gambar 6. Nilai h_pF_2 sekitar pukul 11.55 WIB (t_0) atau 10 menit setelah permulaan gerhana pukul 11.45 WIB adalah 616 km. Setelah itu, terjadi penurunan h_pF_2 hingga mencapai minimum 480 km pada pukul 12.55 WIB (t_1) atau 10 menit setelah puncak GMC (t_{max}). Selama rentang waktu dari t_0 hingga t_1 sekitar 2 jam terjadi penurunan $h_pF_2 \sim 136$ km sehingga laju penurunan rata-rata sekitar 68 km/jam atau 18,9 m/s. Mengacu kepada rata-rata h_pF_2 selama rentang waktu 22–28 Desember 2019, penurunan ini bukanlah merupakan respons lapisan F_2 terhadap GMC. Hal ini ditunjukkan oleh kesamaan pola h_pF_2 rata-rata 7 hari yang juga mengalami penurunan yang sama.

Setelah pukul 12.55 WIB, h_pF_2 mengalami kenaikan hingga mencapai maksimum 747 km pada pukul 14.35 WIB (t_2) atau 5 menit setelah berakhirnya GMC (t_{end}). Dalam rentang waktu $t_1 - t_2$ selama ~ 1 jam 40 menit terjadi kenaikan h_pF_2 sebesar 267 km sehingga estimasi laju rata-rata kenaikan h_pF_2 adalah sekitar 100 km/jam atau 27,8 m/s. Laju kenaikan rata-rata ini masih dalam rentang laju kenaikan h_pF_2 di atas Biak pada gerhana Matahari total 9 Maret 2016, yaitu 21–40 m/s



Gambar 6. Grafik nilai h_pF_2 tanggal 26 Desember 2019 (♦) dan nilai rata-ratanya (garis tegas) selama rentang waktu 22–28 Desember 2019.

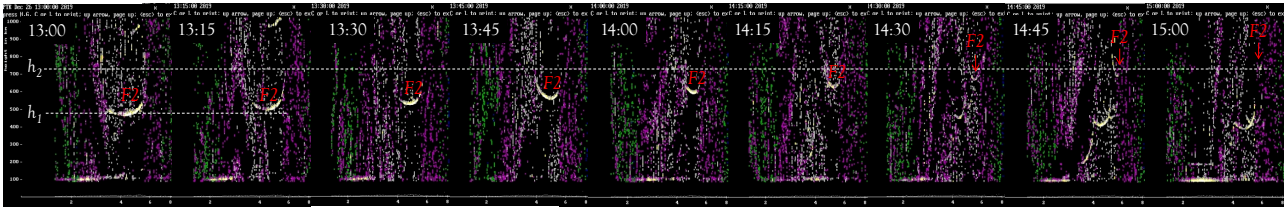
(Dear *et al.*, 2020), tetapi lebih tinggi dari hasil Verhulst *et al.* (2016) yang memperoleh hasil laju *drift* vertikal sebesar 20 m/s.

Rangkaian ionogram pada Gambar 7 menunjukkan proses kenaikan lapisan F berdasarkan ketinggian h_1 (~ 500 km) hingga h_2 (> 700 km), yang mengakibatkan kenaikan h_pF_2 pada Gambar 6. Pergerakan lapisan F₂ arah vertikal ini juga diketahui dari beberapa riset terdahulu (misalnya, Le *et al.*, 2008^a, Atulkar *et al.*, 2015; Verhulst *et al.*, 2016; Stankov *et al.*, 2017; Dear *et al.*, 2020; Aa *et al.*, 2020). Telah terjadi kenaikan ketinggian lapisan F₂ di stasiun Dourbes pada saat gerhana Matahari tanggal 3 Oktober 2005, sangat mirip dengan kenaikan ketinggian lapisan F₂ pada malam hari (Stankov *et al.*, 2017).

Kenaikan vertikal dari lapisan F₂ ionosfer selama gerhana yang teramati ini merupakan akumulasi dampak dari dua faktor. Faktor pertama adalah berkurangnya kerapatan elektron di lapisan bagian bawah (E, F₁, dan bagian bawah lapisan F₂) akibat terputusnya proses fotoionisasi, dan dipercepat oleh proses rekombinasi (Dear *et al.*, 2020) yang masih tetap berlangsung selama gerhana. Hal ini menyebabkan profil kerapatan plasma terdeformasi, yaitu bergeser ke kiri karena berkurangnya kerapatan dan h_mF_2 bergeser ke atas (lebih tinggi) mengikuti pergeseran puncak kerapatan F₂ (N_mF_2) (Le *et al.*, 2008^a; Stankov

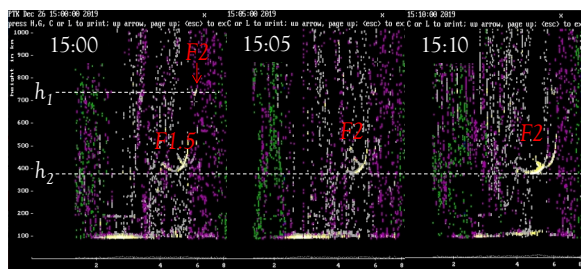
et al., 2017). Faktor kedua adalah penumpukan medan listrik polarisasi dalam daerah gerhana karena perubahan konduktivitas lokal yang terjadi akibat kerapatan plasma berkurang dalam daerah tersebut sehingga menghasilkan pergerakan *drift* $E \times B$ ke atas (Verhulst *et al.*, 2016; Dear *et al.*, 2020). Dapat kita pahami penumpukan medan listrik polarisasi ini bukan merupakan suatu proses yang instan, melainkan proses bertahap dari waktu ke waktu akibat berkurangnya kerapatan plasma saat terjadi gerhana. Berdasarkan Gambar 6, kami menduga penumpukan medan listrik polarisasi ini mencapai nilai batas minimum untuk menghasilkan kecepatan *drift* $E \times B$ ke atas pada saat puncak gerhana (t_{max}) sehingga nilai h_pF_2 perlahan meningkat.

Nilai h_pF_2 bertahan di atas 700 km hingga pukul 15.00 WIB dan kemudian lapisan F seakan turun secara mendadak menjadi 427 km pada pukul 15.05 WIB. Penurunan mendadak h_pF_2 ini bukanlah representasi pergerakan ke bawah dari lapisan F₂, melainkan akibat dari hilangnya jejak lapisan di ketinggian ~ 700 km sehingga lapisan yang masih bertahan adalah lapisan di ketinggian ~ 400 km (Gambar 8). Lapisan pada ketinggian ~ 400 km ini pada pukul 15.00 WIB dan sebelumnya diinterpretasikan sebagai jejak lapisan F_{1.5}. Pada pukul 15.05 WIB dan sesudahnya, lapisan F₂ menghilang dan lapisan yang masih bertahan adalah lapisan



Gambar 7. Rangkaian ionogram yang menunjukkan proses kenaikan ketinggian lapisan F_2 di atas Pontianak pada saat terjadi GMC tanggal 26 Desember 2019.

pada ketinggian ~ 400 km. Sesuai konvensi *scaling*, lapisan yang masih bertahan ini diinterpretasikan sebagai lapisan F_2 dan nilai h_pF_2 ditentukan dari jejak lapisan tersebut. Penurunan ketinggian secara mendadak dari 700 km menjadi 400 km dalam waktu 5 menit ini tidaklah realistis.



Gambar 8. Rangkaian ionogram pada saat kejadian ‘penurunan mendadak’ ketinggian lapisan F_2 setelah fase kenaikan ketinggian akibat GMC tanggal 26 Desember 2019.

Menghilangnya jejak lapisan pada ketinggian ~ 700 km setelah pukul 15.00 WIB disebabkan oleh berkurangnya kerapatan elektron pada ketinggian tersebut seiring dengan pulihnya kondisi lapisan F_2 . Penurunan kerapatan elektron tersebut sebagai akibat dari defisit unsur O_2 dan N_2 pada ketinggian ~ 700 km sehingga elektron hasil ionisasi berkurang, meskipun ketersediaan energi untuk ionisasinya masih mencukupi. Akibatnya, terjadi deformasi profil kerapatan elektron di lapisan F_2 yang mengakibatkan puncak kerapatan elektron yang semula berada di ketinggian 700 km berubah menjadi 400 km. Kemudian jejak lapisan pada ketinggian 700 km ‘tertutup’ (*blanketed*) oleh jejak lapisan yang ada di ketinggian ~ 400 km sehingga tidak terekam oleh ionosonda.

5. Kesimpulan

Secara umum dapat disimpulkan bahwa GMC 26 Desember 2019 menyebabkan penurunan nilai f_oF_1 dan f_oF_2 serta kenaikan nilai h_pF_2 di atas Pontianak. Lapisan F_2

memberikan respons terhadap gerhana tersebut lebih lambat dibandingkan lapisan F_1 . Hasil yang diperoleh mengonfirmasi laporan para peneliti sebelumnya tentang perubahan lapisan ionosfer saat terjadinya gerhana Matahari, khususnya gerhana Matahari yang terjadi di daerah lintang rendah.

Pada fase penurunan f_oF_1 dalam rentang waktu gerhana mencapai 1,55 MHz dengan laju rata-rata penurunan N_mF_1 sekitar 29 elektron/cm³/s. Fase pemulihan terjadi sekitar 14 menit setelah maksimum gerhana dan berakhir beberapa menit sebelum berakhirnya gerhana, dengan laju rata-rata kenaikan N_mF_1 sekitar 30 elektron/cm³/s. Penurunan nilai f_oF_2 terlambat lebih dari 1 jam dari permulaan gerhana, dengan penurunan terdalam terjadi 30 menit setelah gerhana maksimum dan penurunan f_oF_2 mencapai 19% terhadap nilai rata-rata harian pembanding. Laju penurunan rata-rata N_mF_2 selama fase ini sekitar 21 elektron/cm³/s. Sementara itu, fase pemulihan berakhir 85 menit setelah berakhirnya gerhana dengan laju rata-rata kenaikan N_mF_2 sekitar 20 elektron/cm³/s). Dengan demikian, terdapat karakteristik sifat simetris antara laju penurunan kerapatan elektron pada fase penurunan dan kenaikan kerapatan elektron pada fase pemulihan baik pada lapisan F_1 maupun lapisan F_2 .

Kenaikan ketinggian lapisan F_2 terjadi sekitar 5 menit setelah berakhirnya gerhana ditandai dengan kenaikan nilai h_pF_2 terhadap nilai rata-rata harian pembanding selama kurang lebih 1 jam 40 menit. Laju kenaikan h_pF_2 rata-rata mencapai 100 km/jam atau 27,8 m/s. Pergerakan vertikal ini diduga akibat dari dua faktor, yaitu deformasi profil kerapatan elektron lapisan F_2 sebagai akibat menurunnya kerapatan elektron di daerah gerhana, dan terjadinya pergerakan vertikal $E \times B$ dari lapisan F_2 sebagai akibat terjadinya polarisasi medan listrik di daerah gerhana.

Penurunan secara tiba-tiba setelah fase kenaikan ketinggian lapisan F_2 tidak

merepresentasikan terjadinya pergerakan ke bawah dari lapisan tersebut, melainkan akibat dari penipisan kerapatan elektron pada ketinggian sekitar 700 km. Berkurangnya kerapatan pada ketinggian 700 km, seiring dengan pulihnya kembali kondisi lapisan F₂ pada ketinggian sekitar 400 km, mengakibatkan deformasi profil kerapatan elektron lapisan F₂. Akibatnya, puncak kerapatan yang semula berada di ketinggian 700 km berubah ke ketinggian 400 km.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada teknisi/operator ionosonda di BPAA LAPAN Pontianak yang telah menyediakan data pengamatan untuk penelitian ini. Ucapan terima kasih juga kami sampaikan kepada Ecep Edi Hidayat yang telah membantu melakukan *scaling* secara manual dan menyediakan citra ionogram untuk ilustrasi/gambar. Penelitian ini dilakukan sebagai salah satu bagian kegiatan riset *in house* dengan dana DIPA Pusat Sains Antariksa, LAPAN, tahun 2020. Penulis juga berterima kasih kepada para penelaah (mitra bestari) yang telah memberikan saran dan masukan bagi perbaikan makalah ini.

Pernyataan Kontribusi

AF merupakan kontributor utama yang mengolah data ionosfer, melakukan analisis, dan menyusun kesimpulan. **JY** sebagai kontributor utama telah merancang penelitian, menyusun latar belakang dan metodologi penelitian, serta melengkapi analisis. **FA** sebagai kontributor anggota membantu pengolahan data dan penyusunan makalah. **AP** sebagai kontributor anggota telah menyiapkan perangkat pengamatan dan menyusun metode pengamatan.

Rujukan

- Aa, E., Zhang, S.-R., Erickson, P.J., Goncharenko, L.P., Coster, & et al. (2020). Coordinated ground-based and space-borne observations of ionospheric response to the annular solar eclipse on 26 December 2019. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, Vol. 125, Issue 11 November 2020
- Aplin, K.L., Scott, C.J., & Gray, S.L. (2016). Atmospheric changes from solar eclipses. *Phil. Trans. R. Soc. A* 374: 20150217, doi: 10.1098/rsta.2015.0217
- Atulkar, R., Khan, P.A., Jeevakhan, H., & Purohit, P.K. (2015). Ionospheric response to annular and partial solar eclipse of 29 April 2014 in Antarctica and Australian regions. *Russian Journal of Earth Sciences*, 15. 1–8, doi: 10.2205/2015ES000549
- Cherniak, I.V. & Zakharenkova, I. (2018). Ionospheric total electron content response to the Great American Solar Eclipse of 21 August 2017. *Geophysical Research Letters*, 45, doi: 10.1002/2017GL075989
- Choudhary, R.K., St.-Maurice, J.-P., Ambili, K.M., Sunda, S., & Pathan, B.M. (2011). The impact of the January 15, 2010, annular solar eclipse on the equatorial and low latitude ionospheric densities, *J. Geophys. Res.*, 116, A09309, doi: 10.1029/2011JA016504
- Chuo, Y. (2013). Ionospheric effects on the F region during the sunrise for the annular solar eclipse over Taiwan on 21 May 2012. *Annales Geophysicae*, 31, 1891–1898, doi: 10.5194/angeo-31-1891-2013
- Coster, A. Goncharenko, L., Zhang, S.-R., Erickson, P., Rideout, W., & Vierinen, J. (2017). GNSS observations of ionospheric variations during the 21 August 2017 solar eclipse: GNSS TEC during 2017 solar eclipse. *Geophysical Research Letters*, 44, doi: 10.1002/2017GL075774
- Dear, V. & Yulianto (2016). Analisis gelombang radio mode angkasa saat peristiwa gerhana Matahari 9 Maret 2016. *Jurnal Sains Dirgantara*, Vol. 14 No. 1, Desember 2016, halaman 43–56
- Dear, V., Husin, A., Anggarani, S., Harjosuwito, J., & Pradipta, R. (2020). Ionospheric effects during the total solar eclipse over Southeast Asia-Pacific on 9 March 2016: Part 1. Vertical movement of plasma layer and reduction in electron plasma density. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 125, doi: 10.1029/2019JA026708
- Goncharenko, L.P., Erickson, P.J., Zhang, S.-R., Galkin, I., Coster, A.J., & Jonah, O.F. (2018). Ionospheric response to the solar eclipse of 21 August 2017 in Millstone Hill (42N) observations. *Geophysical Research Letters*, 45,

- 4601–4609, doi: 10.1029/2018GL077334
- Husin, A., Jiyo, Anggarani, S., Ekawati, S., & Dear, V. (2016). Analysis of ionospheric irregularities during total solar eclipse 2016 based on GNSS observation. *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 771, No. 1, p. 012035, doi: 10.1088/1742-6596/771/1/012035
- Jose, L., Vineeth, C., Pant, T.K., & Kumar, K.K. (2020). Response of the equatorial ionosphere to the annular solar eclipse of January 15, 2010. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, doi: 10.1029/2019JA027348
- Le, H., Liu, L., Yue, X., & Wan, W. (2008^a). The midlatitude F2 layer during solar eclipses: Observations and modeling. *J. Geophys. Res.*, 113, A08309, doi:10.1029/2007JA013012
- Le, H., Liu, L., Yue, X., & Wan, W. (2008^b). The ionospheric responses to the 11 August 1999 solar eclipse: Observations and modeling. *Ann. Geophys.*, 26, 107–116
- Liu, J.Y., Yang, S.S., Rajesh, P.K., Sun, Y.Y., Chum, J., & et al. (2019). Ionospheric response to the 21 May 2012 annular solar eclipse over Taiwan. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 124, doi: 10.1029/2018JA025928
- Muslim, B., Sunardi, B., Merdijanto, U., Heryanto, D.T., Efendi, J., & Andrian, Y. (2016). Respon ionosfer terhadap gerhana Matahari 9 Maret 2016 dari GPS Palu. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, Vol. 17 No. 3 Tahun 2016, halaman 191–198
- Panda, S.K., Gedam, S.S., Rajaram, G., Sripathi, S., & Bhaskar, A. (2015). Impact of the 15 Jan 2010 annular solar eclipse on the equatorial and low latitude ionosphere over the Indian region. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 135, 181–191, doi: 10.1016/j.jastp.2015.11.004.
- Perwitasari, S. & Muslim, B. (2009), Respon ionosfer terhadap gerhana Matahari 26 Januari 2009 dari pengamatan ionosonda. *Prosiding Seminar Nasional Penelitian, Pendidikan, dan Penerapan MIPA*, Universitas Negeri Yogyakarta
- Pradipta, R., Yizengaw, E., & Doherty, P. (2018). Ionospheric density irregularities, turbulence, and wave disturbances during the total solar eclipse over North America on 21 August 2017. *Geophysical Research Letters*, 45, 7909–7917, doi: 10.1029/2018GL079383
- Rishbeth, H. (1968) Solar eclipses and ionospheric theory. *Space Science Reviews*, 8, 543–554
- Salah, J.E., Oliver, W.L., Foster, J.C., Holt, J.M., Emery, B.A., & Roble, R.G. (1986). Observations of the May 30, 1984, annular solar eclipse at Millstone Hill. *Journal of Geophysical Research*, 91(A2), 1651–1660, doi: 10.1029/JA091iA02p01
- Stankov, S.M., Bergeot, N., Berghmans, D., Bolsée, D., Bruyninx, C., & et al. (2017). Multi-instrument observations of the solar eclipse on 20 March 2015 and its effects on the ionosphere over Belgium and Europe. *J. Space Weather Space Clim.*, 7, A19 (2017), doi: 10.1051/swsc/2017017
- Verhulst, T.G.W, Sapundjiev, D., & Stankov, S.M. (2016). High-resolution ionospheric observations and modeling over Belgium during the solar eclipse of 20 March 2015 including first results of ionospheric tilt and plasma drift measurements. *Advances in Space Research*, 57, 2407–2419
- Vita, A.N., Sunardi, B., Sulastri, & Sakya, A.E. (2017). Pengaruh gerhana Matahari total 09 Maret 2016 terhadap kandungan total elektron ionosfer. *Prosiding Seminar Nasional Fisika (E-Jurnal) SNF2017*, doi:10.21009/03.SNF2017
- Wang, X., Berthelier, J.J., & Lebreton, J.P. (2010). Ionosphere variations at 700 km altitude observed by the DEMETER satellite during the 29 March 2006 solar eclipse. *Journal of Geophysical Research A: Space Physics*, 115, doi: 10.1029/2010JA015497