

Pengaruh Fenomena Gerhana Matahari Penuh 21 Ogos 2017 Terhadap Pengionan Ionosfera Berdasarkan Data TEC dan Medan Geomagnet

(Influence of August 21, 2017 Total Solar Eclipse on Ionospheric Ionization Based on TEC and Geomagnetic Field Data)

Nurul Shazana Abdul Hamid^{a,b,*}, Choo Jin Yao Bryan^a, Siti Aminah Bahari^{b*}, Idahwati Sarudin^c & Nur Izzati Mohd Rosli^a

^aDepartment of Applied Physics, Faculty of Science and Technology, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 Bangi, Malaysia

^bSpace Science Centre (ANGKASA), Institute of Climate Change, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 Bangi, Malaysia

^cSchool of Physics, Universiti Sains Malaysia, 11800 USM, Pulau Pinang, Malaysia

*Corresponding authors: zana@ukm.edu.my & siti Aminah Bahari@ukm.edu.my

Received 3 February 2026, Received in revised form 22 June 2026

Accepted 22 July 2026, Available online 30 September 2026

ABSTRAK

Gerhana matahari merupakan fenomena astronomi yang berlaku apabila Bulan menghalang sinaran suria daripada mencapai atmosfera atas Bumi, seterusnya menyebabkan pengurangan mendadak dalam kadar pengionan ionosfera. Oleh itu, kajian ini dijalankan untuk meneliti kesan Gerhana Matahari Penuh terhadap ionosfera yang berlaku pada 21 Ogos 2017. Penelitian ini dibuat berdasarkan analisis variasi jumlah kandungan elektron (Total electron content, TEC) dan ketumpatan fluks magnet. Data TEC diperolehi daripada stesen penerima GPS P779 (zon gerhana penuh) dan COFC (zon gerhana separa) melalui rangkaian IGS, manakala data medan geomagnet diperolehi daripada stesen magnetometer BOU melalui pangkalan data SuperMAG. Analisis dijalankan dengan membandingkan profil hari gerhana terhadap purata hari senyap bagi mengenal pasti anomali yang wujud. Hasil kajian menunjukkan penurunan nilai TEC yang signifikan iaitu sebanyak 10 TECU di stesen P779 dan 3 TECU di stesen COFC, selaras dengan tahap pengurangan sinaran suria mengikut zon gerhana. Dari aspek geomagnet, stesen BOU merekodkan pola “dwi-puncak” yang unik semasa fasa maksimum gerhana, berbeza dengan pola harian lazim. Kestabilan indeks Dst yang menghampiri sifar mengesahkan bahawa gangguan ini berpunca daripada gerhana dan bukannya ribut geomagnet. Secara keseluruhan, dapatan kajian menunjukkan bahawa pengurangan pengionan semasa gerhana bukan sahaja menjejaskan taburan ketumpatan electron dalam ionosfera, malah memberi impak terukur terhadap sifat magnetiknya melalui perubahan arus ionosfera.

Kata kunci: Gerhana matahari; ionosfera; medan geomagnet; jumlah kandungan elektron

ABSTRACT

A solar eclipse is an astronomical phenomenon that occurs when the Moon obstructs solar radiation from reaching the Earth's upper atmosphere, leading to a sudden reduction in ionospheric ionization rates. This study was conducted to examine the impact of the 21 August 2017 total solar eclipse on the ionosphere. The investigation is based on the analysis of variations in Total Electron Content (TEC) and magnetic flux density. TEC data were obtained from GPS receiver stations P779 (totality zone) and COFC (partial zone) via the IGS network, while geomagnetic field data were retrieved from the BOU magnetometer station through SuperMAG database. The analysis was conducted by comparing eclipse-day profiles with the mean of geomagnetic quiet days to identify induced anomalies. The results demonstrate a significant TEC depletion of 10 TECU at station P779 and 3 TECU at station COFC, consistent with the level of solar flux reduction across different eclipse zones. Regarding the geomagnetic aspect, the BOU station recorded a unique “double-peak” pattern during the maximum eclipse phase, deviating from the typical daily variation. The stability of the Dst index, which remained near zero, confirms that these perturbations were eclipse-induced rather than the result of

external geomagnetic storms. Overall, the findings indicate that the reduction in ionization during an eclipse not only affects the distribution of electron density in the ionosphere but also produces a measurable impact on its magnetic properties through changes in ionospheric currents.

Keywords: Solar eclipse; ionosphere; geomagnetic field; Total Electron Content (TEC)

PENGENALAN

Fenomena gerhana merupakan fenomena astronomi yang berlaku apabila sesebuah jasad samawi bergerak memasuki bayang-bayang jasad yang lain. Antara peristiwa gerhana yang dapat dicerap dari Bumi termasuklah gerhana matahari dan gerhana bulan. Dari sudut konteks gerhana matahari, fenomena ini berlaku apabila cakera Bulan menutupi keseluruhan Matahari, mengikut perspektif pemerhati di Bumi. Walau bagaimanapun, litupan penuh ini hanya berlaku semasa gerhana matahari penuh (total solar eclipse), berbeza dengan gerhana cincin (annular) yang berlaku apabila Bulan berada lebih jauh dari Bumi sehingga cakera Bulan tidak menutup Matahari sepenuhnya, serta gerhana separa (partial) yang hanya melitupi sebahagian cakera Matahari. Gerhana matahari penuh hanya dapat dilihat di kawasan yang dilalui oleh bayang-bayang utama Bulan (umbra). Di zon umbra, litupan penuh Bulan terhadap cakera Matahari mengakibatkan keamatan cahaya di Bumi menurun, sekali gus mewujudkan keadaan gelap sementara yang menyerupai waktu malam. Hal ini juga membolehkan korona Matahari, iaitu lapisan atmosfera luar yang lazimnya terlindung oleh kilauan fotosfera, dicerap dengan mata kasar (Lang 2009). Meskipun kejadian gerhana matahari terhad kepada fasa anak bulan, kecondongan orbit Bulan relatif kepada satah ekliptik Bumi menyebabkan fenomena ini tidak berlaku pada setiap bulan.

Selain memberikan impak visual yang unik, halangan fizikal oleh Bulan ini turut mengganggu keseimbangan tenaga yang diterima oleh atmosfera atas. Pada altitud antara 60 km hingga 1000 km, sinaran ultraungu ekstrem (Extreme Ultraviolet, EUV) dan sinar X dari Matahari bertindak sebagai pemacu utama yang mengawal dinamik pengionan (Moldwin 2008). Proses pengionan yang berterusan ini membentuk satu lapisan yang didominasi oleh zarah bercas, yang secara kolektif dikenali sebagai ionosfera. Lapisan ini diklasifikasikan kepada rantau D, E, dan F, di mana setiap satunya dicirikan oleh profil kekonduksian dan ketumpatan elektron yang unik (Kelley 2009; Annadurai 2018). Kadar penghasilan elektron bebas dan ion bercas positif di lapisan ini sangat bergantung kepada fluks sinaran suria serta sudut altitud Matahari. Secara amnya, altitud yang lebih tinggi seperti di rantau F ionosfera menghasilkan kepadatan pengionan yang lebih dominan disebabkan oleh pendedahan langsung kepada sinaran yang lebih kuat.

Dinamik ionosfera lazimnya dipengaruhi oleh kitaran harian (siang dan malam) serta aktiviti cuaca angkasa seperti nyalaan suria dan ribut geomagnet. Walau bagaimanapun, keseimbangan lapisan ini juga sangat sensitif terhadap sebarang gangguan fizikal yang menyekat fluks sinaran tersebut. Oleh itu, peristiwa seperti transit Bulan di antara Matahari dan Bumi yang mengurangkan keamatan sinaran suria akan mengakibatkan penyusutan kadar pengionan secara signifikan. Fenomena penyusutan ini telah menarik perhatian ramai penyelidik, antaranya Kim dan Chang (2018) serta Emelyanov et al. (2024), yang secara konsisten melaporkan penurunan ketumpatan elektron semasa peristiwa gerhana. Bagi menyiasat perubahan ini, pelbagai instrumen dan kaedah cerapan telah digunakan, termasuk data sistem penentuan kedudukan global (Global Positioning System, GPS) berasaskan jumlah kandungan elektron (Total Electron Content, TEC) untuk menilai variasi ketumpatan elektron ionosfera, serta data magnetometer dasar untuk mengenal pasti perubahan arus ionosfera dan medan geomagnet. Sungguh yang demikian, kebanyakan kajian sedia ada cenderung menganalisis data magnetometer dasar dan data GPS secara berasingan.

Justeru itu, kajian ini dijalankan bagi merapatkan jurang penyelidikan tersebut melalui analisis perbandingan secara langsung antara kedua-dua data set bagi menilai tindak balas ionosfera secara lebih bersepadu semasa kejadian gerhana matahari. Pendekatan ini penting bagi meningkatkan pemahaman terhadap tindak balas ionosfera semasa perubahan mendadak fluks sinaran suria akibat gerhana matahari. Selain itu, analisis gabungan data TEC dan geomagnet turut membantu dalam memberikan gambaran umum mengenai tindak balas ionosfera dan medan geomagnet semasa kejadian gerhana matahari.

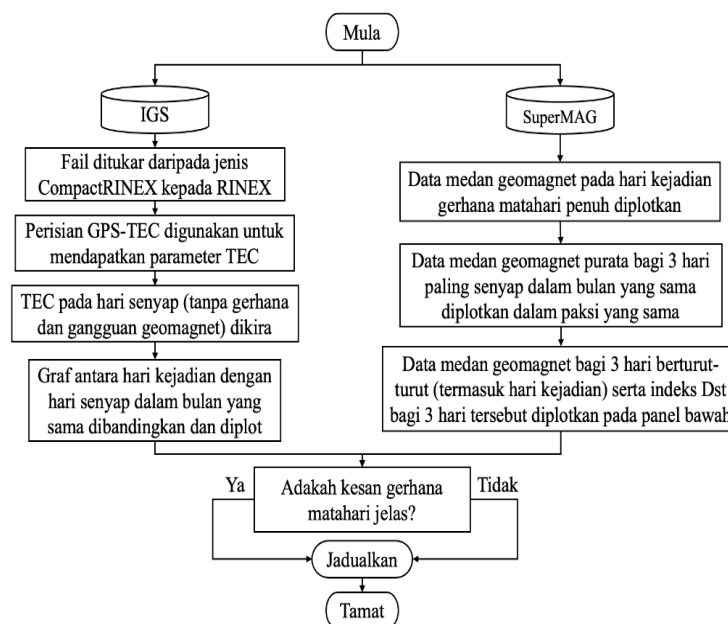
KAEDAH DAN ANALISIS KAJIAN

Kajian ini menyepadukan dua sumber data utama bagi menyiasat impak gerhana matahari pada 21 Ogos 2017 terhadap dinamik ionosfera. Data pertama melibatkan data TEC yang diperoleh daripada stesen P779 (35.20°U, 82.87°B) dan stesen COFC (40.59°U, 105.16°B) dari rangkaian *International GNSS Service* (IGS). Sebagai sebuah kolaborasi global yang ekstensif, IGS membekalkan data GPS berkualiti tinggi, sekali gus membolehkan variasi TEC ditentukan secara tepat mengikut koordinat geografi dan masa kejadian yang spesifik (Johnston et al. 2017).

Data variasi medan geomagnet pula diperoleh dari stesen magnetometer Boulder (BOU; 40.14°U, 105.24°B) daripada pangkalan data SuperMAG. SuperMAG merupakan pangkalan data geomagnet global yang menyepadukan data daripada pelbagai rangkaian magnetometer di seluruh dunia termasuk INTERMAGNET, Magnetic Data Acquisition System (MAGDAS) dan South American Meridional B-field Array (SAMBA), sekali gus membolehkan analisis variasi medan geomagnet dijalankan secara lebih seragam dan bersepadu (Gjerloev 2012).

Bagi prosedur pemilihan kes, portal EclipseWise.com digunakan untuk mengenal pasti peristiwa gerhana matahari penuh serta meneliti laluan bayang-bayang Bulan

iaitu kawasan di permukaan Bumi yang mencerap gerhana matahari penuh atau *path of totality*. Maklumat ini penting bagi memastikan pemilihan stesen GPS dan stesen magnetometer yang digunakan terletak tepat di dalam zon gerhana untuk cerapan yang sah. Oleh kerana sifat data adalah berbeza antara parameter kandungan elektron dan medan magnet, maka protokol pemprosesan yang khusus telah diaplikasikan kepada setiap sumber data bagi menjamin ketepatan analisis. Langkah-langkah terperinci mengenai metodologi pemprosesan serta aliran kerja bagi kedua-dua sumber data tersebut digambarkan secara sistematik melalui carta alir dalam Rajah 1.



RAJAH 1. Carta alir pemprosesan data TEC-GPS dan data medan geomagnet

Dalam kajian ini, peringkat analisis awal dimulakan dengan pemprosesan data GPS yang dicerap oleh penerima GPS, di mana fail asal dalam format CompactRINEX ditukarkan kepada format Receiver Independent Exchange Format (RINEX) melalui aplikasi CRX2RNX sebelum parameter TEC diekstrak menggunakan perisian *GPS-TEC Analysis Program* yang dibangunkan oleh Gopi Seemala (Gopi et al. 2023). Prosedur terperinci bagi pemerolehan parameter TEC daripada data GPS boleh dirujuk dalam penulisan Gopi et al (2023). Profil TEC yang terhasil ditandakan dengan fasa gerhana dan waktu malam bagi menilai penyusutan kadar pengionan berbanding purata hari senyap. Hari senyap adalah merujuk kepada hari yang tidak mengalami sebarang gangguan geomagnet dan aktiviti suria. Data hari senyap tersebut kemudiannya dipuratakan selama tujuh hari bagi membolehkan kesan gerhana bulan terhadap ionosfera dilihat dengan jelas. Bagi data medan geomagnet pula, analisis dimulakan dengan

memplotkan tiga komponen utama iaitu utara X, timur Y, dan menegak Z. Ketiga-tiga komponen ini dibandingkan dengan purata data tiga hari senyap dalam bulan yang sama bagi menilai kepekaan setiap parameter terhadap variasi medan magnet semasa kejadian. Seterusnya, komponen X, Y dan Z digabungkan bagi menghasilkan magnitud jumlah medan geomagnet, iaitu F yang bertindak sebagai rujukan utama kepada ketumpatan fluks magnet di stesen pemerhatian. Berdasarkan rujukan tersebut, data semasa hari kejadian diplot bersama dengan data purata tiga hari senyap untuk dianalisis. Fasa kritikal gerhana seperti permulaan gerhana separa, fasa gerhana penuh, dan penamatan gerhana juga ditandakan bagi memudahkan visualisasi perbandingan. Sementara itu, status cuaca angkasa dikenal pasti melalui indeks Dst untuk memastikan gangguan yang dikesan bukan berpunca daripada ribut geomagnet.

Setelah kedua-dua set data TEC dan medan geomagnet dianalisis secara berasingan, satu perbandingan menyeluruh dijalankan bagi menentukan kesan gerhana matahari terhadap dinamik pengionan ionosfera secara bersepadu. Sekiranya impak yang dikesan adalah signifikan, analisis lanjut akan dilaksanakan bagi memahami mekanisme fizik di sebalik fenomena tersebut. Namun, sekiranya tiada kesan ketara yang ditemui, faktor-faktor penghalang atau pemboleh ubah atmosfera yang menghadkan tindak balas tersebut akan dikenal pasti dan diuraikan secara terperinci.

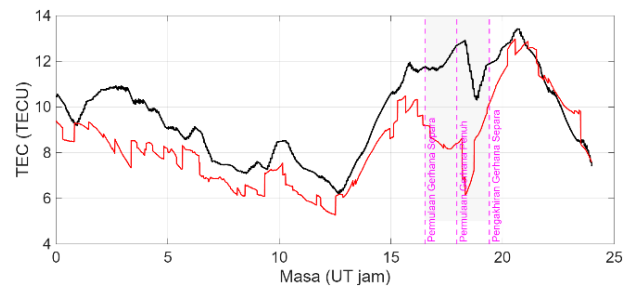
HASIL DAN PERBINCANGAN

Bahagian ini membincangkan hasil analisis kesan gerhana matahari terhadap ionosfera Bumi berdasarkan dua parameter utama, iaitu variasi TEC dan medan geomagnet. Subtopik 3.1 memfokuskan kepada analisis data TEC bagi menilai perubahan kadar pengionan ionosfera semasa gerhana, manakala Subtopik 3.2 pula membincangkan variasi medan geomagnet berdasarkan data magnetometer bagi mengenal pasti tindak balas geomagnet terhadap kejadian tersebut.

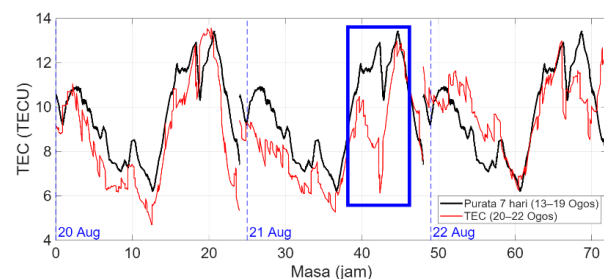
KESAN GERHANA MATAHARI TERHADAP IONOSFERA BUMI: ANALISIS DATA TEC

Dalam kajian ini, analisis berasaskan data TEC berjaya menunjukkan kesan gerhana matahari yang berlaku pada 21 Ogos 2017 terhadap ionosfera Bumi di dua zon utama iaitu zon gerhana penuh dan zon gerhana separa. Kesan gerhana tersebut dilihat menerusi perubahan nilai TEC sebagai proksi kepada kadar pengionan di ionosfera. Rajah 2 menunjukkan penurunan mendadak nilai TEC sekitar 17:07 UT di stesen P779 (zon gerhana penuh) semasa gerhana 21 Ogos 2017 (garisan merah), iaitu sebanyak sekitar 10 TECU (semasa permulaan gerhana penuh) relatif kepada purata hari senyap (garisan hitam). Purata hari senyap tersebut dikira berdasarkan tujuh hari terpilih dalam bulan yang sama yang bebas daripada aktiviti geomagnet bagi mewakili keadaan latar ionosfera tanpa gangguan luaran. Rajah 3 pula menunjukkan perbandingan data purata hari senyap dengan variasi TEC bagi tempoh tiga hari berturut-turut meliputi hari sebelum, semasa, dan selepas gerhana. Perbandingan ini penting bagi memastikan bahawa penurunan TEC yang diperhatikan bukan disebabkan oleh turun naik harian biasa ionosfera, sebaliknya berkait langsung dengan kejadian gerhana matahari. Kawasan yang ditandakan dalam Rajah 3 (kotak biru) menunjukkan penyusutan ketara nilai TEC semasa

tempoh gerhana berbanding corak variasi pada hari sebelum dan selepas gerhana bagi julat masa yang sama.



RAJAH 2. Data TEC untuk stesen P779 semasa hari kejadian Gerhana Matahari Penuh pada 21 Ogos 2017 (garisan merah) dan purata 7 hari senyap pada bulan Ogos 2017 (garisan hitam)

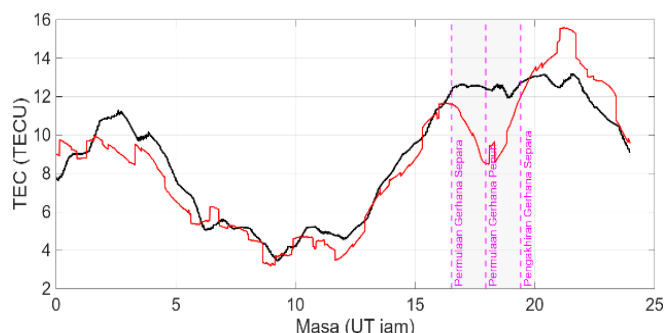


RAJAH 3. Data TEC untuk stesen P779 yang meliputi hari sebelum dan hari selepas kejadian gerhana pada 21 Ogos 2017 (garisan merah) dan purata 7 hari senyap pada bulan Ogos 2017 (garisan hitam)

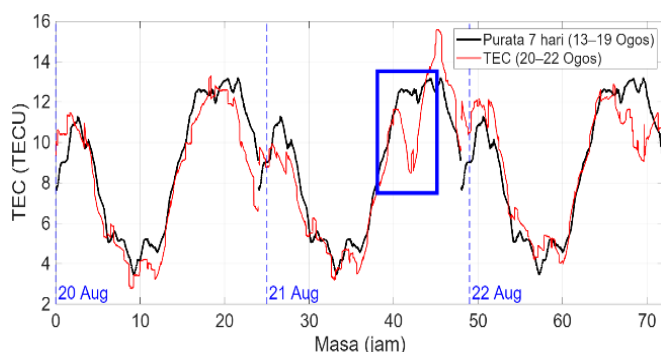
Di zon gerhana separa, variasi TEC daripada data stesen COFC pada Rajah 4 menunjukkan penurunan sebanyak $\Delta\text{TECU} \approx 3$ unit, daripada 11.5 TECU pada permulaan gerhana separa sekitar 16:30 UT kepada 8.5 TECU pada permulaan gerhana penuh sekitar 18:18. Magnitud penurunan ini, walau bagaimanapun, adalah lebih kecil berbanding penurunan sekitar 10 TECU yang direkodkan di stesen P779 dalam zon gerhana penuh, selaras dengan pengurangan sinaran suria yang lebih rendah di zon gerhana separa. Perbezaan magnitud ini menunjukkan bahawa tindak balas ionosfera terhadap gerhana adalah bergantung kepada tahap litupan cakera Matahari, dengan pengurangan sinaran suria yang lebih rendah di zon gerhana separa menghasilkan penyusutan TEC yang lebih kecil.

Rajah 5 pula memperlihatkan variasi TEC bagi tempoh tiga hari berturut-turut, iaitu sebelum, semasa dan selepas gerhana, sama seperti pendekatan Rajah 3. Kawasan yang ditandakan dalam kotak biru menunjukkan penyusutan ketara nilai TEC semasa tempoh gerhana berbanding variasi TEC pada hari sebelum dan selepas gerhana bagi julat masa yang sepadan. Sama seperti pemerhatian dari stesen P779, perbandingan data hari senyap dan hari

gerhana dari stesen COFC ini turut mengukuhkan bahawa penurunan TEC yang diperhatikan bukan sekadar variasi harian biasa ionosfera, tetapi berkait dengan pengurangan pengionan semasa kejadian gerhana matahari.



RAJAH 4. Data TEC untuk stesen COFC semasa hari kejadian Gerhana Matahari Penuh pada 21 Ogos 2017 (garisan merah) dan purata 7 hari senyap pada bulan Ogos 2017 (garisan hitam)



RAJAH 5. Data TEC untuk stesen COFC yang meliputi hari sebelum dan hari selepas kejadian gerhana pada 21 Ogos 2017 (garisan merah) dan purata 7 hari senyap pada bulan Ogos 2017 (garisan hitam)

Secara fizikal, kadar pengionan ionosfera bergantung secara langsung kepada keamatan sinaran Matahari sebagai sumber utama penghasilan elektron. Oleh itu, pengurangan sinaran semasa gerhana mengurangkan kadar pengionan, sekaligus menurunkan nilai TEC yang dicerap. Huba dan Drop (2017) telah meramalkan pengurangan TEC sekitar

30% menggunakan simulasi SAMI3. Bagi memahami magnitud dan corak tindak balas ionosfera semasa gerhana, beberapa kajian terdahulu telah menggunakan data Sistem Navigasi Satelit Global (Global Navigation Satellite System, GNSS) berasaskan TEC untuk menilai perubahan ketumpatan elektron ionosfera. Selain itu, terdapat juga kajian yang menggabungkan analisis data GNSS dengan data geomagnet bagi menilai kesan gerhana terhadap sistem arus ionosfera dan medan geomagnet Bumi. Ringkasan perbandingan antara kajian-kajian terdahulu dengan dapatan kajian ini ditunjukkan dalam Jadual 1. Walau bagaimanapun, perbincangan dalam subtopik ini terlebih dahulu memfokuskan kepada dapatan berasaskan data GNSS dan TEC sebelum analisis geomagnet dibincangkan dalam subtopik seterusnya.

Berdasarkan Jadual 1, fenomena gerhana matahari pada tarikh yang dikaji secara konsisten menunjukkan pengurangan nilai TEC dengan magnitud yang berbeza-beza, bergantung kepada lokasi pemerhatian, tahap litupan dan kaedah analisis yang digunakan. Misalnya, Coster et al. (2017) melaporkan penurunan melebihi 60%, manakala Cherniak dan Zakharenkova (2018) serta Chen et al. (2019) mencatatkan pengurangan sekitar 30% hingga 50% dengan sela masa tindak balas (time lag) yang berbeza-beza antara 8 hingga 32 minit. Selaras dengan pemerhatian terdahulu, kajian ini turut menunjukkan penurunan TEC yang ketara semasa kejadian gerhana, dengan magnitud penurunan yang berbeza antara zon gerhana penuh dan zon gerhana separa.

Dapatan ini menegaskan bahawa gangguan terhadap profil ionosfera ini bersifat sementara dan tidak berpanjangan, di mana tahap magnitudnya sangat bergantung kepada fasa, tempoh, serta peratusan litupan gerhana tersebut. Memandangkan ketiadaan sinaran EUV sebagai punca utama pengionan, terutama sekali semasa fasa gerhana penuh, penurunan TEC berlaku secara mendadak. Namun begitu, kestabilan ionosfera didapati pulih dengan pantas sejurus selepas bayang-bayang Bulan meninggalkan permukaan Bumi dan mendedahkan kembali atmosfera kepada sinaran Matahari.

JADUAL 1. Perbandingan data, kawasan kajian, metodologi dan dapatan kajian lepas terhadap kajian ini semasa Gerhana Matahari Penuh 21 Ogos 2017

Penyelidik	Data & Kawasan Kajian	Metodologi Utama	Hasil Dapatan Utama
Coster et al. (2017)	~2,000 stesen GNSS (Amerika Utara)	VTEC, model NATEC, Penapis Savitzky-Golay	Penurunan VTEC > 60%; puncak TEC mengekori gerhana ~10 minit.
Cherniak dan Zakharenkova (2017)	~4,000 stesen GNSS (Amerika Syarikat & Kanada)	Peta VTEC 2D, teknik Zakharenkova et al. (2016)	Penurunan VTEC 30–50%; kelewatan 8–20 minit selepas kemuncak.
Chen et al. (2019)	Pemerhatian GNSS berasaskan dasar	NCAR-TIEGCM, Penapis Kalman Ensemble (DART)	Pengurangan TEC ~ 4 TECU (~40% penurunan).

continue...

...cont.

Meza et al. (2021)	~400 stesen GNSS & INTERMAGNET	Model Ashour-Chapman, data medan geomagnet	Penurunan $\Delta VTEC_{maks}$ 20–45%; kelewatan 22–32 minit selepas kemuncak; penurunan data medan geomagnet.
Hamid et al. (2026)	Stesen GPS COFC dan P779, stesen magnetometer BOU (Amerika Syarikat)	Data TEC dan data medan geomagnet	Penurunan $\Delta TEC \approx 3$ dan ≈ 10 unit; penurunan dan perubahan profil harian data medan geomagnet

KESAN GERHANA MATAHARI TERHADAP IONOSFERA BUMI: ANALISIS DATA MEDAN GEOMAGNET

Bagi meneliti tindak balas medan geomagnet terhadap kejadian gerhana pada 21 Ogos 2017, variasi ketumpatan fluks magnet yang direkodkan oleh stesen magnetometer BOU telah dianalisis sepanjang tempoh tersebut. Rajah 6 menunjukkan profil ketumpatan fluks magnet semasa hari gerhana (garisan merah) berbanding purata tiga hari senyap dalam bulan yang sama (garisan hitam). Berdasarkan rajah tersebut, satu pola dwi-puncak yang jelas dapat diperhatikan semasa tempoh gerhana, masing-masing bertepatan dengan fasa permulaan dan fasa maksimum gerhana. Corak ini berbeza daripada profil purata hari senyap yang lazimnya menunjukkan hanya satu titik peralihan dan membentuk pola menyerupai “U” atau “V”.

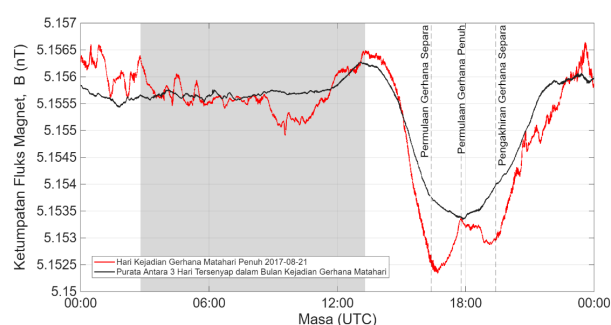
Kehadiran pola dwi-puncak ini menunjukkan bahawa pengurangan pengionan ionosfera semasa gerhana berlaku secara berperingkat mengikut perubahan litupan cakera Matahari. Penurunan awal ketumpatan fluks magnet diperhatikan semasa permulaan gerhana penuh, diikuti oleh penurunan susulan semasa fasa maksimum. Hal ini membuktikan bahawa kehadiran Bulan sepanjang tempoh gerhana telah menyebabkan pengurangan sinaran suria, khususnya sinaran EUV, lalu mengurangkan penghasilan zarah bercas dalam ionosfera dan seterusnya mempengaruhi sistem arus ionosfera yang menyumbang kepada variasi medan geomagnet yang direkodkan di stesen pemerhatian.

Panel atas pada Rajah 7 pula memperlihatkan variasi ketumpatan fluks magnet bagi tempoh tiga hari berturut-turut yang meliputi hari sebelum, semasa dan selepas gerhana, manakala panel bawah pula menunjukkan bacaan indeks Dst bagi tempoh yang sama. Perbandingan ini menunjukkan bahawa pola dwi-puncak yang diperhatikan hanya muncul semasa hari gerhana (anak panah biru) dan tidak hadir pada hari sebelum atau selepas kejadian. Pemerhatian ini mengukuhkan bahawa perubahan medan geomagnet yang direkodkan adalah berkait secara langsung dengan kejadian gerhana matahari dan bukannya variasi harian geomagnet biasa.

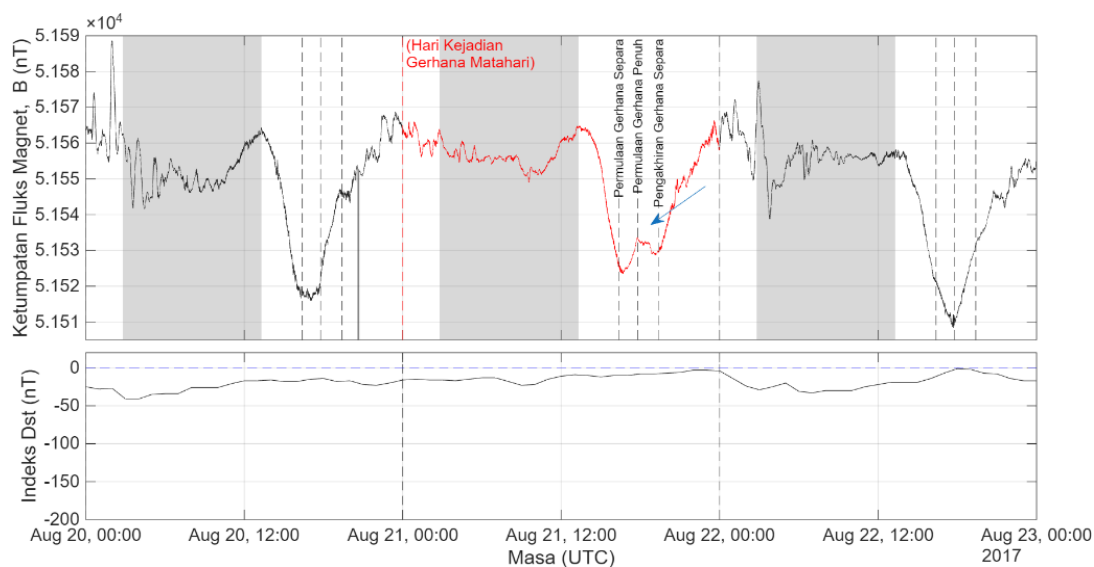
Hal ini diperkukuhkan lagi melalui pemerhatian nilai indeks Dst dalam panel bawah Rajah 7. Variasi indeks Dst didapati konsisten menghampiri sifar sepanjang tempoh

pemerhatian tanpa sebarang penurunan besar yang lazim dikaitkan dengan ribut geomagnet. Keadaan ini menunjukkan bahawa tempoh analisis diklasifikasikan sebagai hari senyap iaitu tanpa sebarang gangguan geomagnet global yang signifikan. Oleh itu, perubahan profil ketumpatan fluks magnet yang diperhatikan adalah berpunca daripada pengurangan pengionan ionosfera akibat gerhana dan bukannya pengaruh aktiviti cuaca angkasa lain. Dapatan ini sejajar dengan laporan Meza et al. (2021) yang turut melaporkan pengurangan medan geomagnet semasa gerhana akibat penurunan pengionan ionosfera. Ringkasan perbandingan antara dapatan kajian ini dengan kajian terdahulu turut ditunjukkan dalam Jadual 1.

Analisis terhadap data cerapan menunjukkan bahawa nilai geomagnet dan TEC mempunyai keupayaan untuk kembali ke paras normal dengan pantas sejurus selepas fenomena gerhana tamat. Sifat gangguan ini yang bersifat sementara dan berlaku dalam tempoh yang singkat menunjukkan impaknya terhadap sistem radio dan komunikasi adalah minimum, serta tidak menjejaskan kestabilan sistem secara kritikal. Hal ini diperkukuhkan lagi melalui penelitian terhadap indeks Dst, seperti dalam panel bawah Rajah 7, yang kekal hampir malar pada nilai 0 nT sepanjang tempoh pemerhatian. Kestabilan indeks ini mengesahkan bahawa pola dwi-puncak geomagnet dan variasi TEC yang dikesan adalah kesan daripada fenomena gerhana, bukannya dipengaruhi oleh gangguan luaran seperti ribut geomagnet.



RAJAH 6. Data medan geomagnet daripada stesen BOU pada 21 Ogos 2017 (garisan merah) dan purata 3 hari senyap pada bulan Ogos 2017 (garisan hitam), dengan kawasan berlorek menandakan waktu malam mengikut waktu tempatan



RAJAH 7. Data medan geomagnet dari 20 Ogos hingga 22 Ogos 2017, dengan anak panah biru menandakan kesan gerhana, manakala kawasan berlorek menandakan waktu malam. Panel bawah merupakan bacaan indeks Dst bagi tiga hari tersebut

KESIMPULAN

Secara keseluruhan, analisis berasaskan data TEC dan geomagnet menunjukkan kesan fenomena gerhana matahari yang jelas terhadap ionosfera Bumi. Penurunan nilai TEC yang signifikan menggambarkan pengurangan kadar pengionan akibat ketiadaan EUV, manakala pola dwi-puncak dalam ketumpatan fluks magnet membuktikan tindak balas medan geomagnet yang berkait rapat dengan perubahan pengionan ini. Dapatan ini menegaskan bahawa gangguan terhadap profil ionosfera dan sifat magnetik Bumi ini bersifat sementara dan tidak berpanjangan, di mana magnitudnya bergantung sepenuhnya kepada fasa serta tahap litupan gerhana.

Kajian ini juga menunjukkan bahawa gabungan analisis TEC dan data geomagnet mampu memberikan gambaran yang lebih menyeluruh terhadap tindak balas ionosfera semasa kejadian gerhana matahari. Pendekatan bersepadu ini bukan sahaja membolehkan perubahan ketumpatan elektron dikenal pasti, malah turut membantu dalam memahami hubungan antara pengionan ionosfera dan variasi medan geomagnet secara serentak. Oleh itu, penggunaan pelbagai parameter pemerhatian secara bersepadu berpotensi meningkatkan ketepatan kajian serta memperkukuh pemantauan gangguan ionosfera serta cuaca angkasa secara lebih menyeluruh.

Selain itu, kajian ini turut menunjukkan bahawa fenomena gerhana matahari boleh dijadikan sebagai eksperimen semula jadi bagi memahami tindak balas ionosfera terhadap perubahan mendadak fluks sinaran suria. Tidak seperti fenomena cuaca angkasa ribut geomagnet yang lazimnya dipengaruhi oleh pelbagai faktor

luaran secara serentak, gerhana matahari menghasilkan gangguan yang lebih terkawal dan setempat. Oleh itu, pemerhatian serentak terhadap perubahan TEC dan medan geomagnet semasa gerhana berpotensi membantu meningkatkan pemahaman tentang hubungan antara pengionan ionosfera, sistem arus ionosfera dan variasi medan geomagnet Bumi.

Untuk kajian masa depan, analisis statistik yang lebih mendalam diperlukan bagi menentukan perkaitan kuantitatif antara penurunan medan geomagnet dan data TEC. Selain itu, kaedah pemprosesan data boleh dipertingkatkan dengan mengekstrak data mentah TEC secara langsung melalui pengekodan sendiri (*self-coding*) bagi menggantikan penggunaan output imej yang mempunyai batasan dalam tafsiran. Langkah ini akan membolehkan pemodelan yang lebih teliti serta perbandingan dinamik ionosfera yang lebih mendalam bagi memahami kesan sebenar gerhana matahari terhadap sistem Bumi-angkasa.

PENGHARGAAN

Setinggi-tinggi penghargaan dizahirkan kepada Universiti Kebangsaan Malaysia atas peruntukan Geran Universiti Penyelidikan (GUP-2023-048). Sokongan padu daripada Universiti Sains Malaysia melalui Geran Bridging dengan No. Projek: R501 - LR - RND003 - 0000001578 – 0000 kepada Idahwati Sarudin turut dihargai. Data medan geomagnet diperoleh daripada pangkalan data SuperMAG, dan penghargaan diberikan kepada institusi serta agensi kebangsaan yang menyokong kolaborasi SuperMAG (<http://supermag.jhuapl.edu/>).

PENGISYTIHARAN KEPENTINGAN BERSAING

Tiada.

RUJUKAN

- Annadurai, Norhani Muhammad Nasir. 2018. *Analisis Kesan Suar Suria Terhadap Arus Ionosfera Berdasarkan Data Magnetometer Global*. Fakulti Sains dan Teknologi, Universiti Kebangsaan Malaysia.
- Chen, C.-H., Lin, C.-H. C. & Matsuo, T. 2019. Ionospheric responses to the 21 August 2017 solar eclipse by using data assimilation approach. *Progress in Earth and Planetary Science* 6: 13. <https://doi.org/10.1186/s40645-019-0263-4>
- Cherniak, I. & Zakharenkova, I. 2018. Ionospheric total electron content response to the Great American solar eclipse of 21 August 2017. *Geophysical Research Letters* 45(3): 1199–1208. <https://doi.org/10.1002/2017GL075989>
- Coster, A. J., Goncharenko, L., Zhang, S.-R., Erickson, P. J., Rideout, W. & Vierinen, J. 2017. GNSS observations of ionospheric variations during the 21 August 2017 solar eclipse. *Geophysical Research Letters* 44(24): 12041–12048. <https://doi.org/10.1002/2017GL075774>
- Emelyanov, L. Y., Bogomaz, O. V., Chernogor, L. F. & Domnin, I. F. 2024. Response of the mid-latitude ionosphere to the solar eclipse on 25 October 2022: Results of F2-layer vertical sounding. *Advances in Space Research* 73(5): 2338–2354. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.12.034>
- Gjerloev, J. W. 2012. The SuperMAG data processing technique. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 117(A9): A09213. <https://doi.org/10.1029/2012JA017683>
- Huba, J. D. & Drob, D. 2017. SAMI3 prediction of the impact of the 21 August 2017 total solar eclipse on the ionosphere/plasmasphere system. *Geophysical Research Letters* 44(12): 5928–5935. <https://doi.org/10.1002/2017GL073549>
- Johnston, G., Riddell, A. & Hausler, G. 2017. The International GNSS Service. Dlm. Teunissen, P. J. G. & Montenbruck, O. (pnyt.). *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*, hlm. 967–982. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42928-1_33
- Kelley, M. C. 2009. *The Earth's Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics*. Edisi ke-2. Amsterdam: Academic Press.
- Kim, J.-H. & Chang, H.-Y. 2018. Statistical analysis of geomagnetic field variations during solar eclipses. *Advances in Space Research* 61(8): 2040–2049. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.01.022>
- Lang, K. R. 2009. *The Sun from Space*. Edisi ke-2. Berlin: Springer.
- Meza, A., Bosch, G., Natali, M. P. & Eylonstein, B. 2022. Ionospheric and geomagnetic response to the total solar eclipse on 21 August 2017. *Advances in Space Research* 69(1): 16–25. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.07.029>
- Moldwin, M. 2008. *An Introduction to Space Weather*. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511801365>
- Seemala, G. K. 2023. Estimation of ionospheric total electron content (TEC) from GNSS observations. Dlm. Singh, A. K. & Tiwari, S. (pnyt.). *Atmospheric Remote Sensing*, hlm. 63–84. Amsterdam: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99262-6.00022-5>