

Pre-Processing Data Magnetometer Satelit LAPAN-A3 (Pre-Processing of LAPAN-A3 Satellite's Magnetometer Data)

La Ode Muhammad Musafar¹, Clara Y. Yatini¹, Fitri Nuraeni¹, Visca Wellyanita¹, Anton Winarko¹, Mira Juangsih¹, Elvina Ayu Ratnasari¹, Wahyudi Hasbi², Satriya Utama²

¹Pusat Riset Antariksa, LAPAN-BRIN, Bandung

²Pusat Teknologi Satelit, LAPAN-BRIN, Bogor

Riwayat naskah

Diterima:

Direvisi:

Disetujui:

Korespondensi:

latompe@gmail.com

ABSTRAK

Satelit LAPAN-A3 yang mengorbit pada ketinggian LEO (*low Earth orbit*) membawa beberapa muatan, termasuk di antaranya adalah HFGM (*hybrid fluxgate magnetometer*) yang digunakan untuk eksperimen pengukuran medan magnet Bumi di ketinggian atmosfer-atas/ionosfer. Magnetometer ini terdiri atas tiga buah sensor magnet identik yang dipasang di badan satelit. Ketiga sensor tersebut terpasang tegak lurus satu sama lain sehingga data medan magnet yang diukur merepresentasikan tiga komponen vektor medan magnet dalam kerangka acuan ortogonal lokal satelit. Data mentah HFGM tidak dapat langsung diterapkan untuk analisis karena arah sensor selalu mengalami perubahan mengikuti sikap satelit. Dalam makalah ini ditunjukkan metode *pre-processing* data HFGM satelit LAPAN-A3 yang diperlukan agar data hasil pengukuran HFGM dapat digunakan lebih jauh. Koreksi data mentah HFGM dilakukan dengan merotasikan data hasil pengukuran HFGM menuju model medan magnet. Model yang digunakan untuk rotasi adalah model IGRF dan model dipol. Hasil pengukuran HFGM yang telah dirotasi tersebut menunjukkan konsistensi dengan model medan magnet.

Kata kunci: LAPAN-A3, HFGM, Medan magnet, IGRF, Model dipol

ABSTRACT

LAPAN-A3 satellite, which orbits at LEO (*low Earth orbit*) altitude, carries several payloads including the HFGM (*hybrid fluxgate magnetometer*) which is used to conduct experiments to measure the Earth's magnetic field at upper atmosphere/ionosphere altitude. The magnetometer consists of three identical magnetic sensors that are placed on the satellite's body. Those three sensors are installed orthogonal to one another so that the recorded magnetic field data represent three components of the magnetic field vector in the satellite's local orthogonal frame of reference. Raw data of HFGM cannot be used directly because the satellite sensors' direction change according to satellite attitudes. This paper shows LAPAN-A3 satellite HFGM data pre-processing which are required before the raw data further used. The HFGM data corrections were done by rotating the measured magnetic field to magnetic field models. The models that are used to rotate the data are IGRF and dipole models. HFGM measurement results that have been rotated show consistency with the magnetic field models.

Keywords: LAPAN-A3, HFGM, Magnetic field, IGRF, Dipole model

1. Pendahuluan

Satelit LAPAN-A3 yang diluncurkan pada 22 Juni 2016 di Sriharikota, India merupakan satelit-mikro bermassa 115 kg dengan dimensi $677 \times 574 \times 960 \text{ mm}^3$. Satelit ini memiliki orbit polar pada ketinggian LEO (*low Earth orbit*) sekitar 500 km dari permukaan Bumi dengan inklinasi sekitar 97° .

Satelit ini membawa beberapa muatan, termasuk di antaranya adalah HFGM (*hybrid fluxgate magnetometer*) yang digunakan untuk melakukan eksperimen pengukuran medan magnet Bumi di ketinggian atmosfer-atas/ionosfer (Triharjanto *et al.*, 2014).

Pada ketinggian orbitnya, satelit LAPAN-A3 mengelilingi Bumi sekitar 14 kali

dalam satu hari. Dengan orbitnya yang polar, hasil pengukuran HFGM dalam rentang waktu satu kali mengelilingi Bumi dapat memberikan gambaran mengenai kondisi medan magnet global. Hal ini penting bagi informasi cuaca antariksa dan juga penting secara saintifik untuk menyelidiki sifat-sifat dan karakteristik dari medium atmosfer-atas/ionosfer tempat satelit tersebut melakukan pengukuran.

Cuaca antariksa adalah kondisi di lingkungan antariksa Bumi yang timbul akibat fenomena magnetik, partikel, dan radiasi elektromagnet yang berasal dari Matahari, keberadaan angin surya yang terus menerus berinteraksi dengan medan magnet Bumi serta sistem arus skala-besar yang mengalir di lingkungan antariksa Bumi. Satelit LAPAN-A3 pada ketinggian LEO melewati daerah penting secara kelistrikan dan kemagnetan berdasarkan klasifikasi lintang maupun sisi terang-gelap Bumi. Dalam arah lintang, satelit melewati daerah lintang tinggi yang merupakan lokasi *polar cap* yang memiliki geometri garis medan magnet terbuka dan menghubungkan ruang angkasa dekat Bumi dengan medium antarplanet (Wang *et al.*, 2018). Pada daerah lintang tinggi lainnya mengalir sistem arus aurora elektrojet (Smith *et al.*, 2017; Nakamura *et al.*, 2015; Aakjaer *et al.*, 2016). Garis medan magnet pada daerah oval aurora juga berperan dalam menghubungkan ionosfer kutub dengan magnetosfer-jauh di *magnetotail* pada belahan malam Bumi dan berperan penting dalam proses presipitasi partikel menuju ionosfer kutub (Brown, 1966; Frank & Ackerson, 1971; Taguchi *et al.*, 2015). Presipitasi tersebut memiliki kontribusi pada kopling ionosfer-termosfer (Hays *et al.*, 1973; Liuzzo *et al.*, 2014). Daerah lintang tengah merupakan pusat dari sirkulasi arus ionosfer. Selain itu, pada saat badai magnet besar arus cincin dapat meluas dari lintang rendah hingga lintang tengah. Arus cincin ini sangat penting dalam cuaca antariksa (Ganushkina *et al.*, 2017), termasuk Indonesia yang menempati daerah lintang rendah geografis maupun geomagnetik.

Salah satu unsur mendasar dan penting dari efek cuaca antariksa di wilayah Indonesia yang terletak pada daerah ekuatorial adalah aktivitas ionosfer. Ionosfer ekuatorial mengalami pengaruh cukup besar oleh pemanasan radiasi Matahari maupun arus

cincin. Oleh karena itu, pengamatan medan magnet pada ketinggian ionosfer di daerah ekuatorial sangat berguna dalam menyelidiki sifat-sifat elektrodinamika ionosfer, khususnya jika dikaitkan dengan anomali atau gangguan ionosferik (Jin *et al.*, 2020).

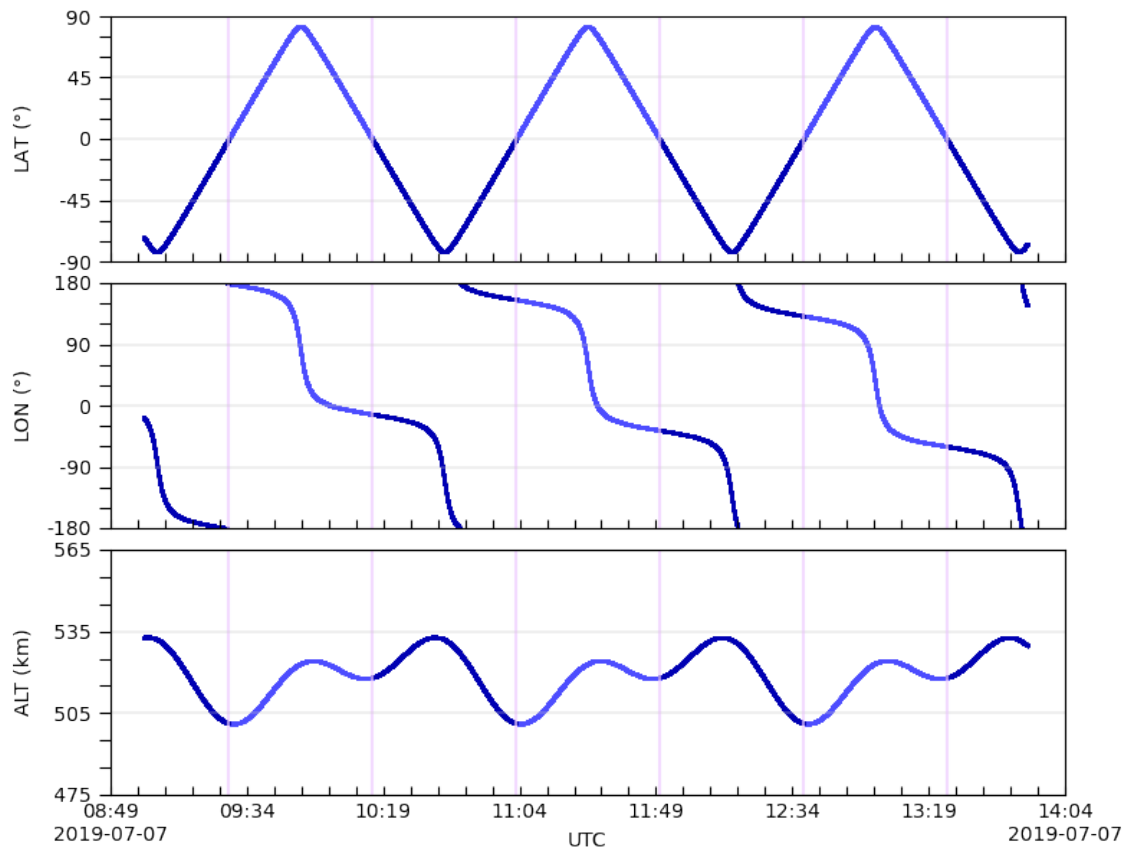
Magnetometer satelit LAPAN-A3 melakukan perekaman data medan magnet resolusi waktu yang tinggi, yaitu dengan *sampling* 128 data tiap detik. *Sampling* data tersebut setara dengan skala ruang $\sim 0,01^\circ$ dalam arah lintang dan $\sim 0,001^\circ$ di sepanjang lintasan orbit satelit. Data dengan resolusi tinggi ini dapat digunakan untuk menganalisis fenomena ionosfer yang bersifat lokal di sepanjang lintasan orbit tersebut. Kemampuan untuk mengidentifikasi sifat-sifat elektrodinamika ionosfer lokal dapat bermanfaat bagi layanan cuaca antariksa di Pusat Sains Antariksa.

Satelit LAPAN-A3 sejak mengorbit Bumi telah melakukan perekaman data medan magnet Bumi. Namun, data tersebut tidak serta-merta dapat diterapkan untuk analisis cuaca antariksa, khususnya daerah lintang rendah. Hal tersebut karena satelit terus-menerus mengalami perubahan sikap dalam orbitnya sehingga arah sensor mengikuti sikap satelit. Jadi, data pada sensor tidak merepresentasikan besar komponen medan magnet Bumi dalam arah tertentu yang tetap. Dalam makalah ini dibahas cara mengoreksi data tiap sensor agar dapat merepresentasikan komponen medan magnet Bumi dalam sebuah kerangka acuan tetap.

2. Data dan Metode

2.1. Data

Eksperimen pengukuran medan magnet Bumi oleh satelit LAPAN-A3 dilakukan menggunakan HFGM. Magnetometer ini terdiri atas tiga buah sensor magnet identik yang dipasang tetap di badan satelit. Ketiga sensor tersebut dipasang tegak lurus satu sama lain sehingga data medan magnet yang diperoleh merepresentasikan tiga komponen vektor medan magnet dalam kerangka acuan ortogonal lokal satelit. Dalam eksperimen pengukuran medan magnet Bumi ini perekaman medan magnet dilakukan dalam rentang waktu yang dapat mencapai 5 jam sehari disesuaikan dengan daya satelit.



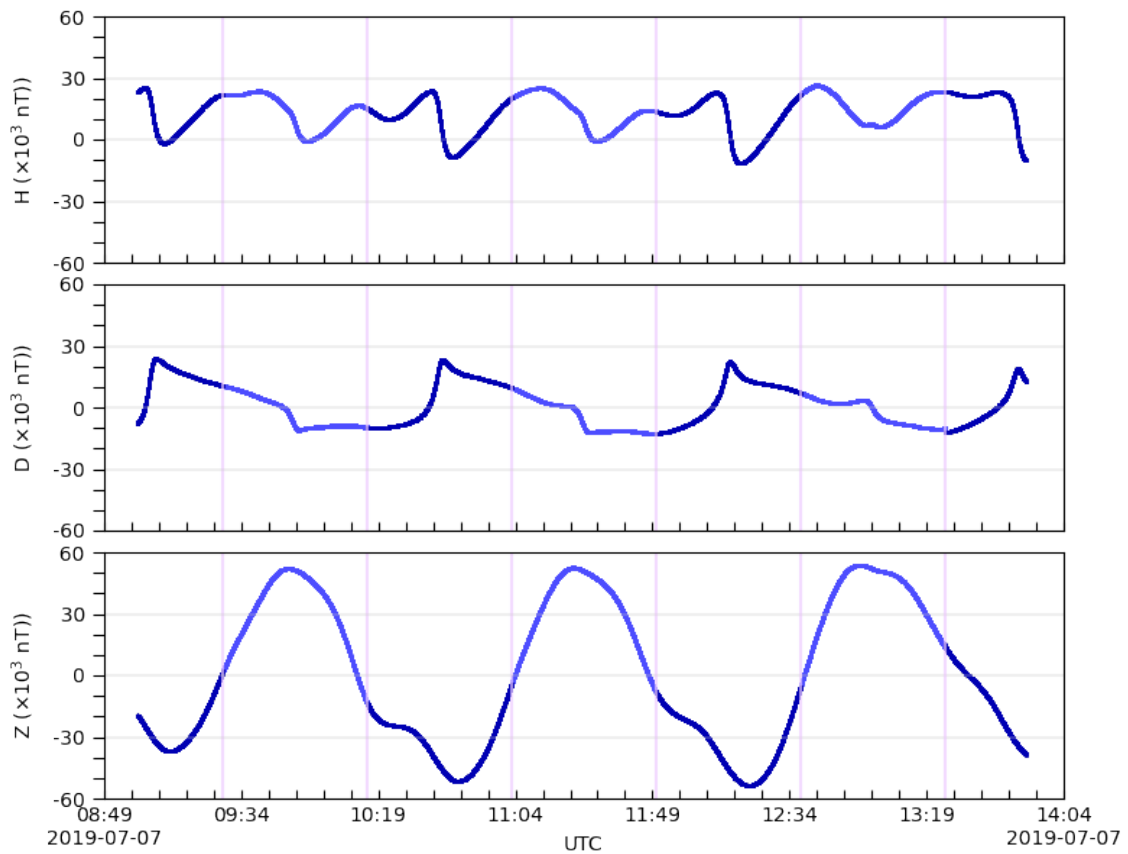
Gambar 1. Posisi satelit LAPAN-A3 dalam sistem koordinat geodesi pada tanggal 7 Juli 2019 pukul 08.59.59–13.51.31 UTC.

Dalam perekaman data selama 5 jam diperoleh data sebanyak 3 kali mengorbit polar dalam arah lintang dan 3 kali mengelilingi Bumi pada arah meridian. Plot deret waktu lintasan satelit LAPAN-A3 ditunjukkan dalam Gambar 1. Grafik tersebut menyajikan lintasan satelit pada 7 Juli 2019 antara pukul 08.59.59–13.51.31 UTC. Representasi posisi satelit dalam gambar tersebut dinyatakan dalam sistem koordinat geodesi. Panel atas menunjukkan deret waktu dari lintang, panel tengah adalah deret waktu bujur, dan panel bawah menunjukkan ketinggian satelit. Warna biru gelap menggambarkan posisi satelit saat berada di atas belahan utara Bumi sedangkan biru terang untuk belahan selatan. Sumbu mendatar dalam tiap panel menyatakan waktu dalam UTC.

Dalam Gambar 2 ditunjukkan komponen medan magnet yang terekam oleh sensor HFGM pada waktu yang sama dengan Gambar 1. Panel atas hingga bawah secara berturut-turut merepresentasikan besar

komponen medan magnet. Ketiga sensor medan magnet masing-masing ditandai sebagai sensor H, D, dan Z. Namun, perlu diingat bahwa pengertian H, D, dan Z di sini berbeda dari pengertian komponen H, D, dan Z sebagaimana lazimnya dalam penandaan arah utara-selatan, timur-barat, dan vertikal. Panel atas hingga bawah dalam Gambar 2 menunjukkan hasil pengukuran sensor H, D, dan Z.

Karena satelit selalu bergerak dan berputar dengan arah sembarang, arah sensor H, D, dan Z selalu berubah mengikuti perubahan sikap satelit. Akibatnya, komponen medan magnet hasil rekaman sensor tersebut merepresentasikan besar komponen medan magnet dalam arah sembarang sehingga tidak memungkinkan untuk melakukan interpretasi data tersebut secara langsung. Perlu dilakukan transformasi terhadap masing-masing komponen medan magnet pada suatu kerangka acuan tetap agar interpretasi dapat dilakukan.



Gambar 2. Medan magnet rekaman sensor magnetometer satelit LAPAN-A3 dalam sistem pada 7 Juli 2019 pukul 08.59.59–13.51.31 UTC di posisi yang diberikan dalam Gambar 1.

2.2. Model Dipol dan Model IGRF

Model dipol adalah model untuk sumber medan internal Bumi yang diturunkan secara teoretis. Model ini menunjukkan bahwa pada kondisi ideal ketika tidak ada gangguan elektromagnetik, medan magnet Bumi bersifat dipolar. Namun, keberadaan angin surya mengakibatkan sifat dipolar tersebut mengalami modifikasi geometri dipol. Ini berarti bahwa hingga pada ketinggian tempat terjadinya superposisi medan dipol dan medan magnet antarplanet, sifat dipolar medan magnet Bumi masih tetap terpelihara (Campbell, 1997).

Model IGRF (International Geomagnetic Field Reference) merupakan model empiris yang diturunkan dari data hasil pengamatan medan magnet permukaan Bumi (Barton, 1997). Model ini dibangun dengan memecahkan persamaan potensial menggunakan pendekatan harmonik bola dari representasi sumber internal medan magnet Bumi (Barracough, 1990). Model ini diperbaharui setiap 5 tahun dan hingga saat ini telah terdapat model IGRF generasi ke-13 (Aiken *et al.*, 2021). Meskipun model IGRF diturunkan menggunakan data medan magnet

permukaan Bumi, model ini juga berlaku sah untuk daerah di atas permukaan Bumi yang medan magnetnya masih bersifat dipolar (Maus, 2010; Matteo & Morton, 2011).

Satelit LAPAN-A3 mengorbit pada ketinggian LEO, yaitu ketinggian dengan sifat dipolar medan magnet Bumi yang masih terpelihara. Dengan demikian, kedua model di atas dapat digunakan untuk melakukan transformasi hasil pengukuran HFGM pada satelit LAPAN-A3. *Library* kedua model tersebut telah banyak tersedia dan ditulis dalam berbagai bahasa pemrograman. Salah satu dari *library* yang banyak digunakan adalah modul GEOPACK.

2.3. Metode

Model medan magnet Bumi pada ketinggian orbit satelit LAPAN-A3 diperlukan untuk mengoreksi hasil pengukuran HFGM satelit itu. Model yang dapat digunakan pada ketinggian tersebut adalah model dipol dan model IGRF. Asumsi yang digunakan dalam melakukan koreksi data mentah HFGM satelit LAPAN-A3 adalah pada kondisi geomagnet tenang, vektor medan magnet hasil pengukuran sensor memiliki arah mendekati

vektor medan magnet yang diturunkan dari model. Dengan menggunakan vektor medan magnet model sebagai acuan, medan magnet hasil pengukuran HFGM dapat dirotasikan sedemikian rupa sehingga memiliki arah yang sesuai dengan model. Hal ini dapat dilakukan karena sensor HFGM dipasang secara ortogonal dan konfigurasi tersebut tidak mengalami perubahan selama pengukuran.

Vektor medan magnet model dinyatakan sebagai B_m , sedangkan medan magnet HFGM sebagai B_s . R adalah matriks rotasi B_s agar memiliki arah sesuai dengan B_m . Dengan demikian, hubungan antara B_s dan B_m secara matematis dapat dituliskan sebagai Persamaan (1).

$$B_m = R \cdot B_s \quad (1)$$

Matriks rotasi memiliki bentuk sebagai berikut:

$$R = R_1(\alpha)R_2(\beta)R_3(\gamma) \quad (2)$$

dengan $R_1(\alpha)$, $R_2(\beta)$, dan $R_3(\gamma)$ masing-masing diberikan oleh Arfken & Weber (2005) dan Goldstein *et al.* (2014) sebagai berikut:

$$R(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (3a)$$

$$R(\beta) = \begin{pmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{pmatrix} \quad (3b)$$

$$R(\gamma) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\gamma & -\sin\gamma \\ 0 & \sin\gamma & \cos\gamma \end{pmatrix} \quad (3c)$$

Karena sensor H, D, dan Z diletakkan secara ortogonal, vektor hasil pengukuran HFGM dapat dituliskan secara sederhana dalam ungkapan sistem koordinat kartesian sebagai berikut:

$$B_s = H\hat{e}_x + D\hat{e}_y + Z\hat{e}_z \quad (4)$$

dan, dengan cara serupa, vektor medan magnet model dapat dituliskan pula sebagai berikut:

$$B_m = B_x\hat{e}_x + B_y\hat{e}_y + B_z\hat{e}_z \quad (5)$$

Karena (H , D , Z) diperoleh dari hasil pengukuran HFGM dan (B_x , B_y , B_z) dapat dihitung pada seluruh titik pengukuran (H , D ,

Z), matriks rotasi R dalam persamaan (2) atau (3) dapat diperoleh. Dengan menggunakan persamaan (4) dan (5), sudut rotasi untuk matriks yang diberikan dalam persamaan (3) memiliki bentuk sebagai berikut:

$$\left. \begin{aligned} \cos\alpha &= DB_y + ZB_z \\ \cos\beta &= HB_y + ZB_z \\ \cos\gamma &= HB_x + DB_y \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

2.4. Modul GEOPACK

GEOPACK merupakan modul perangkat lunak dari *library* model Tsyganenko yang dibangun menggunakan data hasil pengamatan berbasis satelit. *Library* modul ini pada mulanya dituliskan dalam bahasa FORTRAN serta merupakan modul *open-source*. Meskipun demikian, dewasa ini *library* dari modul tersebut telah tersedia juga dalam berbagai bahasa pemrograman, di antaranya dalam bahasa Python.

Model Tsyganenko merupakan model semiempiris untuk medan magnet magnetosferik. Model tersebut melibatkan kontribusi sumber eksternal magnetosfer berupa sistem arus skala-besar di antariksa, seperti arus cincin, sistem arus *magnetotail*, arus *magnetopause*, serta sistem arus FAC (*field aligned-current*).

Model Tsyganenko terdiri atas beberapa versi. Versi paling awal adalah model T89 yang dikembangkan melalui pendekatan empiris sederhana untuk magnetosfer global (Tsyganenko & Usmanov, 1982; Tsyganenko, 1987; Tsyganenko, 1989). Selanjutnya, model sederhana tersebut dikembangkan untuk kasus magnetosfer realistis dengan memasukkan sistem arus skala-besar di daerah kutub, yaitu sistem arus *Birkeland Region-1* dan *Region-2* yang berkaitan erat dengan elektrojet aurora serta kontribusi medan magnet antarplanet yang mampu menerobos *magnetopause* masuk ke dalam magnetosfer (Tsyganenko, 1995; Tsyganenko & Stern, 1996). Model ini selanjutnya dikenal sebagai model T96. Pengembangan selanjutnya dari model T96 adalah model T02. Model ini mampu untuk menyajikan berbagai konfigurasi magnetosfer-dalam serta magnetosfer-luar pada berbagai kondisi parameter plasma angin surya dan medan magnet antarplanet serta level aktivitas geomagnet berbeda. Dalam model ini juga diperhitungkan sifat asimetri fajar-senja magnetosfer bagian-dalam akibat menguatnya arus cincin parsial selama berlangsungnya gangguan

magnetosfer (Tsyganenko, 2002a; Tsyganenko, 2002b). Pengembangan terkini dari model Tsyganenko adalah model T05. Model terakhir ini merupakan sebuah model medan geomagnet yang dinamis, termasuk ketika berlangsungnya badai magnet (Tsyganenko *et al.*, 2003; Tsyganenko & Sitnov, 2005)

Modul GEOPACK juga memasukkan model medan internal, yaitu model dipol dan model IGRF yang dibangun menggunakan data pengamatan medan magnet permukaan Bumi. Model IGRF dalam *library* GEOPACK untuk makalah ini menggunakan koefisien dari model IGRF-13. Selain itu, dalam modul GEOPACK terdapat juga sejumlah *library* untuk transformasi sistem koordinat di dalam magnetosfer Bumi (Russel, 1971; Hapgood, 1992). *Library* dari GEOPACK ini digunakan dalam melakukan koreksi data hasil pengamatan magnetometer satelit LAPAN-A3 sebagai acuan dalam melakukan transformasi medan magnet.

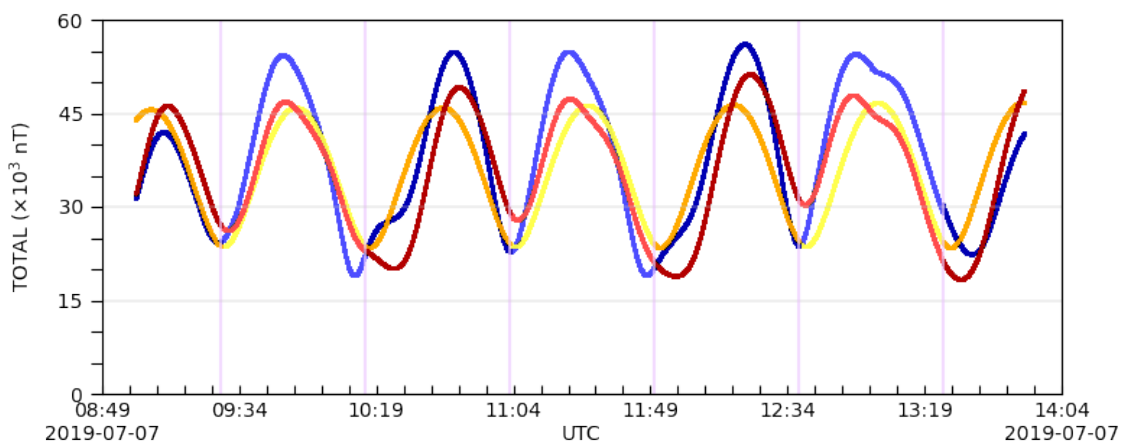
3. Pre-Processing Data dan Pembahasan

Pre-processing data mentah rekaman magnetometer satelit LAPAN-A3 dilakukan dengan memanfaatkan model teoretis, yaitu model medan dipol, serta model empiris, yaitu model IGRF. Orbit satelit LAPAN-A3 adalah LEO dengan rata-rata ketinggian sekitar 500 km dari permukaan Bumi. Pada ketinggian LEO, medan magnet Bumi masih bersifat dipolar dan kedua model tersebut berlaku

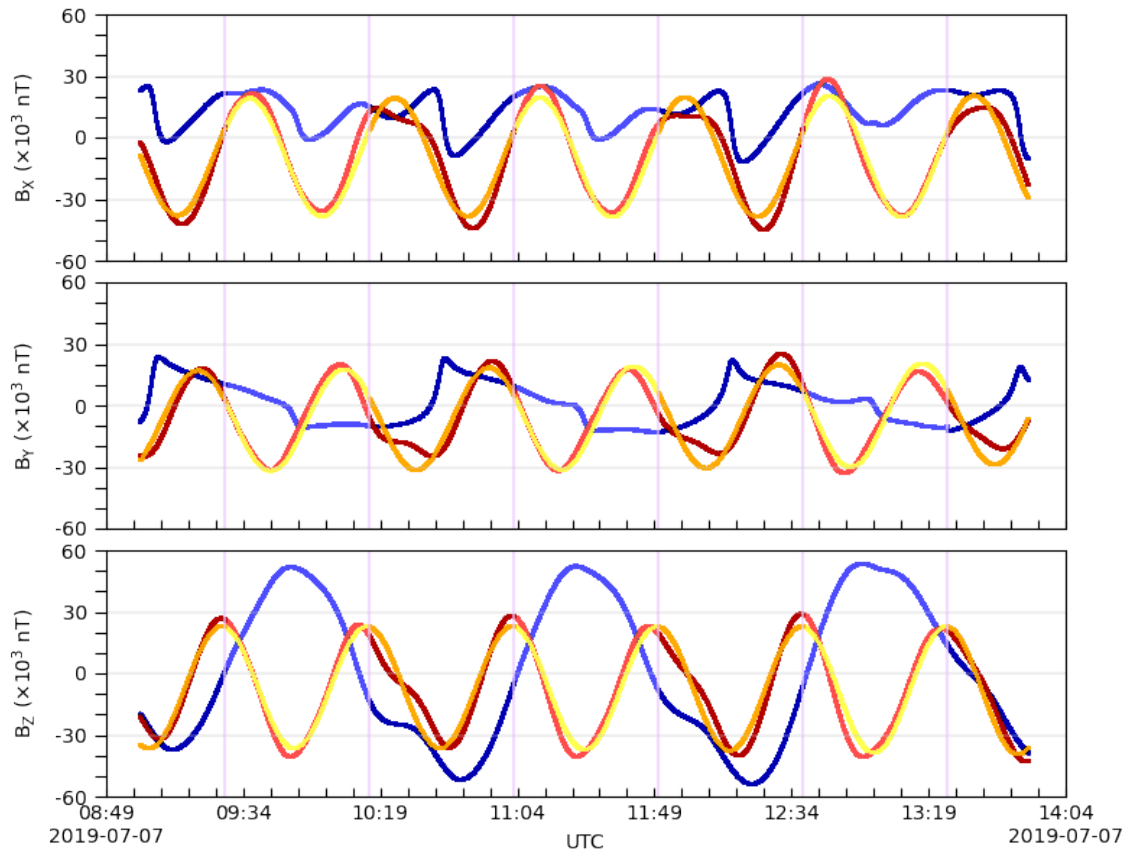
dalam menjelaskan sifat-sifat dan distribusi medan magnet Bumi. Perhitungan model tersebut dilakukan dengan menggunakan *library* GEOPACK.

Hal paling awal dalam *pre-processing* data adalah melakukan konfirmasi konsistensi data hasil pengukuran terhadap model. Konsistensi ini dapat dilihat melalui besaran yang invarian terhadap rotasi, yaitu medan total hasil pengukuran. Gambar 3 menunjukkan medan total pada tanggal 7 Juli 2019 pukul 08.59.59–13.51.31 UTC. Kurva berwarna biru, merah, dan kuning secara berturut-turut menyajikan medan total data mentah, model dipol, dan model IGRF. Sementara itu, kurva dengan warna terang menyatakan data ketika satelit di belahan-utara Bumi, dan belahan-selatan dinyatakan oleh kurva dengan warna lebih gelap. Kurva data dalam Gambar 3 menunjukkan adanya konsistensi fasa antara medan total hasil pengukuran magnetometer LAPAN-A3 dengan kedua model. Meskipun demikian, terdapat perbedaan yang cukup besar antara hasil pengukuran dengan kedua model tersebut.

Untuk melakukan koreksi komponen medan magnet hasil pengukuran sensor HFGM diperlukan representasi komponen medan magnet model dalam sistem koordinat tertentu. Pertama, dipilih representasi dalam sistem koordinat geografis. Selanjutnya, dihitung komponen medan model di sepanjang lintasan satelit LAPAN-A3 dengan menggunakan GEOPACK.



Gambar 3. Total medan magnet rekaman magnetometer satelit LAPAN-A3 (biru) dan medan yang diturunkan dari model dipol (kuning) dan IGRF (merah) pada tanggal 7 Juli 2019 pukul 08.59.59–13.51.31 UTC.



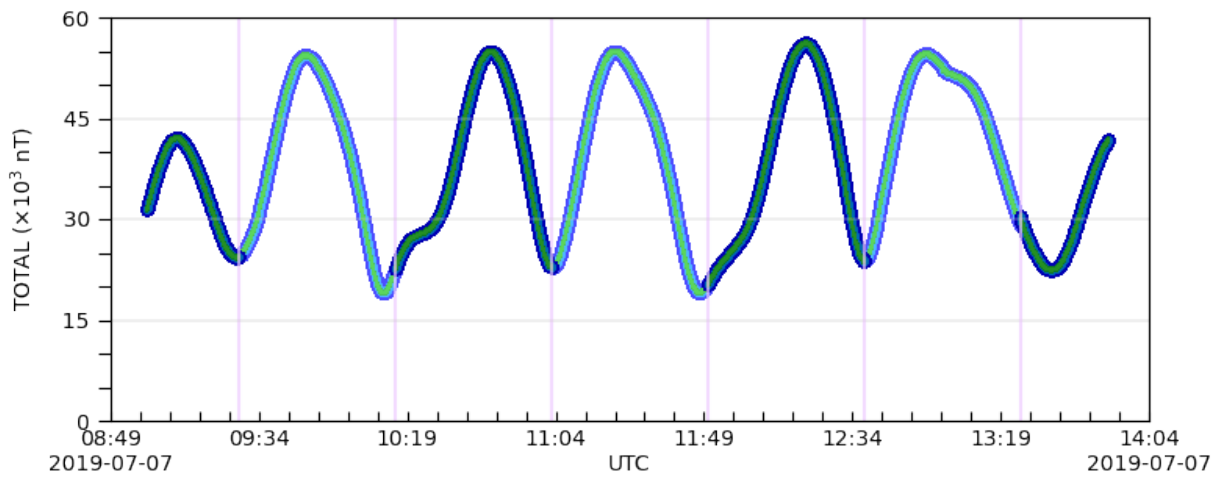
Gambar 4. Komponen medan magnet rekaman magnetometer satelit LAPAN-A3 (biru) dan medan yang diturunkan dari model dipol (kuning) dan IGRF (merah) pada tanggal 7 Juli 2019 pukul 08.59.59–13.51.31 UTC.

Dalam Gambar 4 ditunjukkan medan magnet hasil pengukuran HFGM satelit LAPAN-A3 bersama-sama dengan model. Panel atas hingga bawah berturut-turut menunjukkan nilai pada sensor H, D, dan Z (biru), sedangkan kurva berwarna kuning dan merah masing-masing menunjukkan (B_X , B_Y , B_Z) dalam representasi sistem koordinat geografis (kartesian) yang dihitung dari model dipol dan model IGRF pada waktu dan lokasi yang sama. Kurva dengan warna terang dan gelap masing-masing menunjukkan data medan magnet ketika satelit LAPAN-A3 berada di belahan utara dan selatan. Dari Gambar 4 terlihat medan magnet model IGRF/dipol memiliki fasa dan besar yang hampir sama. Adapun hasil pengukuran sensor H, D, dan Z menunjukkan fasa dan besar yang hampir sama untuk B_X dan B_Y , tetapi untuk B_Z menunjukkan fluktuasi yang benar-benar berbeda. Bukti ini menunjukkan bahwa hasil pengukuran HFGM pada satelit LAPAN-A3 harus dikoreksi terlebih dahulu agar dapat digunakan untuk penelitian.

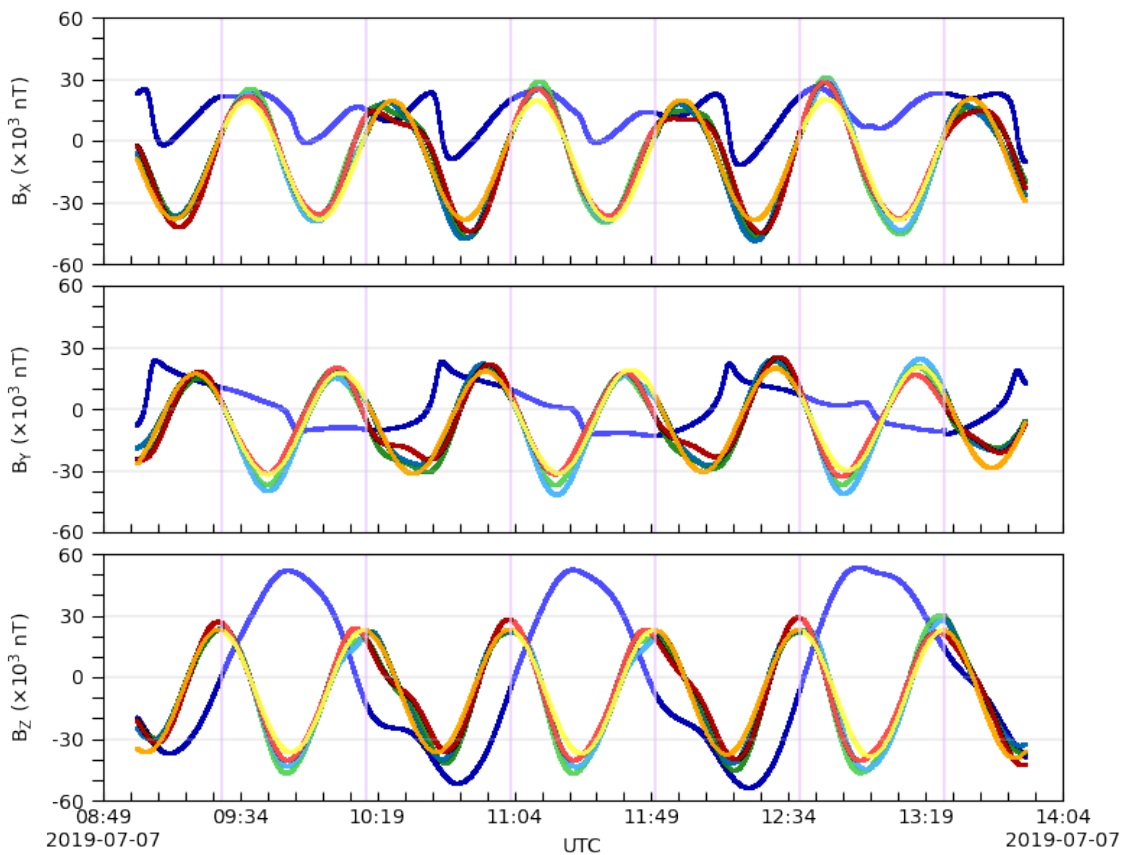
Dengan nilai komponen medan magnet model yang diperoleh di atas dan menggunakan persamaan (1)–(6), matriks

rotasi vektor medan magnet hasil pengukuran HFGM menuju arah vektor model dapat dihitung. Akan tetapi, selama pengukuran dilakukan, terjadi perubahan pada sikap satelit yang menyebabkan arah sensor HFGM terhadap sistem koordinat tertentu berubah pula. Dengan demikian, akan ada enam kemungkinan matriks rotasi yang diperoleh dari permutasi $R_{ijk} = R_i R_j R_k$ dengan $i = j = k = 1, 2, 3$ yang merupakan representasi dari arah sensor H, D, dan Z dari HFGM di satelit LAPAN-A3.

Perlu ditekankan bahwa tidak terdapat pasangan indeks yang sama dalam R_{ijk} . Seluruh kemungkinan rotasi seperti ini harus diperhitungkan karena secara umum perkalian matriks $R_i R_j R_k$ tidak bersifat komutatif. Dengan adanya kemungkinan enam buah matriks rotasi tersebut, secara otomatis terdapat enam buah vektor proyeksi hasil pengukuran HFGM pada vektor medan magnet model, $B_{ijk} = R_{ijk} B_s$. Selanjutnya, dihitung vektor B_{ijk} yang paling dekat dengan B_m untuk memperoleh hasil rotasi vektor B_s yang tepat, dengan kriteria bahwa vektor B_{ijk} memiliki jarak minimal terhadap B_m .



Gambar 5. Total medan magnet hasil pengukuran sensor HFGM satelit LAPAN-A3 dan hasil rotasinya terhadap medan dipol dan IGRF.



Gambar 6. Koreksi hasil pengukuran HFGM satelit LAPAN-A3 dengan rotasi menuju vektor medan dipol (hijau) dan menuju vektor medan IGRF (sian), sedangkan kurva dengan warna lainnya sama dengan yang diberikan dalam Gambar 4.

Hal paling awal yang perlu dikonfirmasi ketika melakukan rotasi medan magnet hasil pengukuran HFGM satelit LAPAN-A3 terhadap medan magnet model adalah bahwa medan total HFGM dan hasil rotasinya harus tetap. Dalam Gambar 5 ditunjukkan tiga buah kurva. Warna biru adalah total medan magnet sensor, sedangkan hasil rotasinya adalah

hijau untuk rotasi terhadap medan model dipol, dan sian untuk model IGRF. Pada gambar tersebut terlihat bahwa ketiga kurva berimpit dan memiliki nilai yang sama. Ini berarti bahwa sifat invarian medan magnet tetap terpelihara dalam proses rotasi.

Hasil rotasi vektor medan magnet B_s terhadap medan magnet model ditunjukkan

dalam Gambar 6. Panel atas hingga bawah berturut-turut menyatakan komponen medan magnet dalam sistem koordinat GSM untuk arah X, Y, dan Z. Komponen medan hasil rotasi ditunjukkan oleh kurva berwarna hijau untuk rotasi menuju medan dipol dan warna sian untuk rotasi menuju medan IGRF, sedangkan kurva dengan warna lainnya sama dengan yang diberikan dalam Gambar 4. Hasil rotasi medan magnet tersebut memiliki besar dan fasa yang hampir sama dengan komponen medan.

Hal penting mengenai medan hasil rotasi adalah terpenuhinya sifat antisimetri komponen medan magnet terhadap lintang utara-selatan. Sifat ini merupakan sifat mendasar dari komponen medan magnet Bumi. Sifat yang demikian tidak terlihat dalam hal pengukuran sensor sebelum rotasi yang ditunjukkan oleh kurva berwarna biru. Hal ini dapat menjadi justifikasi bahwa tahap awal koreksi hasil pengukuran HFGM satelit LAPAN-A3 melalui rotasi menuju arah vektor medan model telah dilakukan dengan prosedur yang tepat.

Meskipun demikian, dalam sistem koordinat GSM komponen B_x (panel atas) dan B_y (panel tengah) terletak pada bidang horizontal yang sama. Karena sensor HFGM diletakkan tegak lurus satu sama lain, diharapkan kedua komponen tersebut memiliki beda fasa 90° . Komponen horizontal ini bervariasi sinusoidal. Ketika komponen B_x minimum maka B_y minimum, demikian pula sebaliknya. Akan tetapi, dalam Gambar 6 terlihat bahwa terdapat sedikit pergeseran fasa dari 90° . Hal ini dapat disebabkan oleh beberapa kemungkinan. Kemungkinan pertama adalah akibat dari lokasi satelit yang selalu berubah sehingga diperlukan analisis perilaku medan magnet dalam representasi waktu lokal karena kuat medan magnet komponen horizontal memiliki ketergantungan terhadap waktu lokal. Kemungkinan lainnya adalah pergeseran fasa dapat terjadi akibat adanya medan gangguan yang dapat memengaruhi besar komponen medan magnet hasil pengukuran. Terkait dengan hal ini, perlu dilakukan analisis mengenai distribusi medan magnet pada saat kondisi geomagnet tenang dan terganggu.

4. Kesimpulan

Pengukuran medan magnet Bumi menggunakan HFGM pada satelit LAPAN-A3 yang memiliki orbit polar, dapat memberikan gambaran mengenai geomagnet global. Data

medan magnet dengan *sampling* waktu resolusi tinggi yang dihasilkan ini dapat berguna untuk mempelajari sifat elektrodinamika di daerah ionosfer lokal pada lintasan yang dilewati oleh satelit LAPAN-A3. Hal ini tentunya sangat bermanfaat untuk memahami kondisi cuaca antariksa dan studi kopling magnetosfer-ionosfer-atmosfer. Pada makalah ini telah ditunjukkan metode *pre-processing* data HFGM satelit LAPAN-A3 yang diperlukan sebelum data mentah dapat dianalisis lebih lanjut, yaitu dengan melakukan rotasi medan magnet sesuai langkah-langkah yang telah disebutkan.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyatakan ucapan terima kasih kepada mitra bestari yang telah memberikan saran dalam penulisan makalah ini. Penulis juga berterimakasih kepada Tim Pusat Teknologi Satelit (Pusteksat), LAPAN yang telah melakukan perekaman data magnetometer satelit LAPAN-A3. Dan tidak lupa penulis juga mengucapkan terimakasih kepada Kepala Pusat Sains Antariksa dan Kepala Pusat Teknologi Satelit LAPAN yang telah mewujudkan eksperimen pengukuran langsung medan magnet di antariksa.

Pernyataan Kontribusi

Penulis pertama merupakan kontributor utama yang merancang penelitian, pengolahan dan analisis data serta menyusun draft makalah ini. Penulis kedua merupakan kontributor utama yang merancang penelitian ini serta perbaikan penulisan makalah ini. Penulis ketiga dan keempat merupakan kontributor utama dalam pengolahan dan analisis data serta melakukan revisi makalah ini. Penulis kelima merupakan kontributor utama dalam pengolahan data serta perbaikan layout makalah, penulis ke-enam dan ketujuh merupakan kontributor utama dalam pengolahan data. Penulis kedelapan dan kesembilan merupakan kontributor utama dalam penyediaan data.

Rujukan

- Aakjaer, C.D., Olsen, N., & Finlay, C.F. (2016). Determining Polar Ionospheric Electrojet Currents from Swarm Satellite Constellation Magnetic Data. *Earth, Planet and Space*, 68, 140
- Alken, P., et al. (2021). International Geomagnetic Reference Field: The

- Thirteenth Generation. *Earth, Planets and Space*, 73, 49
- Arfken, G. & Weber, H.J. (2005). *Mathematical Methods for Physicists*, 6ed. Orlando, FL: Academic Press
- Barracough, D.R. (1990). Modelling Geomagnetic Field. *J. Geomag. Geoelectr.*, 42, 1051–1070
- Barton, C.E. (1997). International Geomagnetic Reference Field: The Seventh Generation. *J. Geomag. Geoelectr.*, 49, 123–148
- Brown, R.R. (1966). Electron Precipitation in the Auroral Zone. *Space Science Reviews*, 5, 311–387
- Campbell, W.H., 1997. *Introduction to Geomagnetic Fields*. Cambridge University Press
- Frank, L.A. & Ackerson, K.L. (1971). Observations of Charged Particle Precipitation into the Auroral Zone. *J. Geophys. Res.*, 76(16), 3612–3543
- Ganushkina, N., Jayness, A., & Liemohn, M. (2017). Space Weather Effects Produced by the Ring Current Particles. *Space Science Reviews*, 212, 1315–1344
- Goldstein, H., Poole Jr., C., & Safko, J. (2014). *Classical Mechanics*, 3rd ed. Peason New International Edition
- Hagood, M.A. (1992). Space Physics Coordinate Transformations: A User Guide. *Planetary and Space Science*, 40(5), 711–717
- Hays, P.B., Jones, R.A., & Rees, M.H. (1973). Auroral Heating and the Composition of the Neutral Atmosphere. *Planetary and Space Science*, 21(4), 559–573
- Jin, Y., Xiong, C., Clausen, L., Spicher, A., Kotova, D., Brask, S., Kervalishvili, G., Stolle, C., & Miloch, W. (2020). Ionospheric Plasma Irregularities based on in situ Measurements from the Swarm Satellites. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 124, e2020JA028103
- Liuzzo, L.R., Ridley, A.J., Perlongo, N.J., Mitchell, E.J., Conde, M., Hampton, D.L., Bristow, W.A., & Nicols, M.J. (2014). High-latitude Ionospheric Drivers and their Effects on Wind Patterns in the Thermosphere. *J. Geophys. Res.*, 120(1), 715–735
- Matteo, N.A., & Morton, Y.T. (2011). Ionosphere Geomagnetic Field: Comparison of IGRF Model Prediction and Satellite Measurements 1991–2010. *Radio Sci.*, 46, RS4003
- Maus, S. (2010). An Ellipsoidal Harmonic Representation of Earth's Lithospheric Magnetic Field to Degree and Order 720. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 11
- Nakamura, M., Yoneda, A., Oda, M., & Tsubouchi, K. (2015). Statistical Analysis of Extreme Auroral Electrojet Indices. *Earth, Planet and Space*, 67, 153
- Russell, C.T. (1971). Geophysical Coordinate Transformations. *Cosmic Electrodyn.*, v.2, pp. 184–196
- Smith, A.R.A., Beggan, C.D., Macmillan, S., & Whaler, K.A. (2017). Climatology of the Auroral Electrojets Derived from the Along-track Gradient of Magnetic Field Intensity Measured by POGO, Magsat, CHAMP, and Swarm. *Space Weather*, 15(10), 1257–1269
- Taguchi, S., Hosokawa, K., & Ogawa, Y. (2015). Investigating the Particle Precipitation of a Moving Cusp Aurora using Simultaneous Observations from the Ground and Space. *Progress in Earth and Planetary Science*, 11
- Triharjanto, R.H., Bangkit, H. & Saifudin, A. (2014). Development of Space-based Magnetic Activities Measurement Mission in LAPAN's Micro-Satellites. *Proceeding of 2nd Asia Future Conference* at Bali, Indonesia
- Tsyganenko, N.A., & Usmanov, A.V. (1982). Determination of the Magnetospheric Current System Parameters and Development of Experimental Geomagnetic Field Models based on Data from IMP and HEOS Satellites. *Planet. Space Sci.*, 30, 985–998
- Tsyganenko, N.A. (1987). Global Quantitative Models of the Geomagnetic Field in the Cislunar Magnetosphere for Different Disturbance Levels. *Planet. Space Sci.*, 35, 1347–1358
- Tsyganenko, N.A. (1989). A Magnetospheric Magnetic Field Model with a Warped Tail Current Sheet. *Planet. Space Sci.*, 37, 5–20
- Tsyganenko, N.A. (1995). Modeling the Earth's Magnetospheric Magnetic Field Confined within a Realistic Magnetopause. *J. Geophys. Res.*, 100, 5599–5612
- Tsyganenko, N.A., & Stern, D.P. (1996). Modeling the Global Magnetic Field of the Large-scale Birkeland Current

- Systems. *J. Geophys. Res.*, 101, 27187–27198
- Tsyganenko, N.A. (2002a). A Model of the near Magnetosphere with a Dawn-dusk Asymmetry - 1. Mathematical Structure. *J. Geophys. Res.*, 107, A8
- Tsyganenko, N.A. (2002b). A Model of the near Magnetosphere with a Dawn-dusk Asymmetry - 2. Parameterization and Fitting to Observations. *J. Geophys. Res.*, 107, A7
- Tsyganenko, N.A., Singer, H.J., & Kasper, J.C. (2003). Storm-time Distortion of the Inner Magnetosphere: How severe can it get? *J. Geophys. Res.*, 108, A5
- Tsyganenko, N.A., & Sitnov, M.I. (2005). Modeling the Dynamics of the Inner Magnetosphere during Strong Geomagnetic Storms. *J. Geophys. Res.*, 110, A3
- Wang, C., *et al.* (2018). Determination of Polar Cap Boundary for the Substorm Event of 8 March 2008. *Frontiers in Physics: Space Physics*, 6:50

