

**KARAKTERISTIK PARTIKEL BERMUATAN DI WILAYAH ANOMALI  
ATLANTIK SELATAN YANG BERPOTENSI PENYEBAB GANGGUAN  
OPERASIONAL SATELIT ORBIT RENDAH  
[THE CHARACTERISTIC OF CHARGED PARTICLES IN THE SOUTH  
ATLANTIC ANOMALY REGION AS THE CAUSE OF OPERATIONAL  
DISRUPTION ON LOW ORBITING SATELLITES]**

**Nizam Ahmad<sup>1</sup> dan Neflia**

Peneliti Pusat Sains Antariksa, Lapan

<sup>1</sup>e-mail: ncjam\_a@yahoo.com

Diterima 6 Maret 2014; Disetujui 14 Mei 2014

**ABSTRACT**

South Atlantic Anomaly (SAA) region contains highly charged particles affecting low orbiting satellite (LEO). Charged particles in this region come from Galactic Cosmic Rays (GCR) and solar particles that trapped, propagated and interacted that caused variation on flux and energy of particles. Characteristic of charged particles in SAA can be assessed by analyzing particles data from NOAA 15 satellite. Particles from GCR was analyzed during solar minimum while solar particles was analyzed by the time of solar maximum. The analysis showed that GCR storms were occurred several times within solar maximum, but those storms were not significantly affected on geomagnetic activity represented by Kp and Dst indices. Analysis of particles data in energy channel,  $E > 30$  keV (elektron) and  $80 < E < 240$  keV (proton) also showed that GCR storms affected on electron fluxes in SAA, whereas those of proton. Particle flux enhancement in SAA also was done by analyzing solar proton event (SPE) data, but the influence was not significant. During solar minimum, average fluxes can reach about  $10^2$  particles/cm<sup>2</sup> whereas on solar maximum, average fluxes were increased up to  $10^3$  particles/cm<sup>2</sup>. Those energy and fluxes are commonly affecting on low orbiting satellite and causing surface charging phenomena.

Key words: *Charged particles, South Atlantic Anomaly, Satellite anomaly*

**ABSTRAK**

Wilayah Anomali Atlantik Selatan (AAS) mengandung partikel bermuatan yang membahayakan satelit-satelit yang berada di orbit rendah bumi (LEO). Partikel bermuatan yang terdapat di wilayah tersebut bersumber dari sinar kosmik galaksi (GCR) dan matahari yang terperangkap, merambat dan saling berinteraksi yang mengakibatkan fluks dan energi partikel bervariasi. Karakteristik partikel bermuatan di wilayah Anomali Atlantik Selatan dapat diketahui dengan menganalisis data partikel dari satelit NOAA 15. Tinjauan partikel dari GCR dilakukan saat aktivitas matahari minimum sedangkan tinjauan partikel dari matahari dilakukan saat aktivitas matahari maksimum. Analisis data partikel memperlihatkan bahwa saat aktivitas matahari maksimum dan minimum, terjadi badai GCR beberapa kali. Badai GCR tidak selalu berpengaruh signifikan terhadap aktivitas geomagnet yang dilihat melalui indeks Kp dan Dst. Analisis data partikel di AAS untuk kanal energi  $E > 30$  keV (elektron) dan  $80 < E < 240$  keV (proton) juga memperlihatkan bahwa badai GCR berpengaruh terhadap fluks elektron di AAS, namun tidak terlihat pada fluks proton. Peningkatan fluks partikel di SAA juga dilihat dengan meninjau fenomena semburan proton dari matahari

(*Solar Proton Event-SPE*) dan memperlihatkan korelasi yang rendah. Pada kondisi matahari minimum, fluks rata-rata partikel di AAS sekitar  $10^2$  partikel/cm<sup>2</sup>, sedangkan pada kondisi matahari maksimum, fluks minimum sekitar  $10^3$  partikel/cm<sup>2</sup>. Energi dan fluks yang demikian pada umumnya mengakibatkan pemuatan permukaan pada satelit-satelit orbit rendah.

Kata kunci: *Partikel bermuatan, Anomali Atlantik Selatan, Anomali satelit*

## 1 PENDAHULUAN

Wilayah Anomali Atlantik Selatan (*South Atlantic Anomaly – SAA*) merupakan wilayah permukaan bumi yang mengandung partikel bermuatan dengan energi dan fluks yang sangat tinggi. Wilayah ini merupakan bagian dari sabuk radiasi dalam yang didominasi oleh partikel proton yang bersumber dari matahari (*solar flare, CME*) dan sinar kosmik galaksi (Shibata et al., 2010). Sabuk radiasi dalam yang mengandung SAA ini membentang pada ketinggian 100 – 10.000 km dengan energi di atas 100 MeV. Meskipun wilayah ini didominasi oleh partikel proton, namun ditemukan juga keberadaan partikel elektron dengan tingkat energi pada orde  $\sim 10^2$  keV (Hasting dan Garret, 1996) Keberadaan wilayah SAA ini tidak lepas dari keberadaan sabuk radiasi Van Allen (Pisacane, 2008). Sabuk radiasi Van Allen memiliki bidang yang simetri terhadap sumbu magnet bumi. Di kutub utara magnet bumi, medan magnet sangat kuat hingga menyebabkan sabuk proton tersebar jauh dari permukaan bumi, namun di kutub selatan magnet bumi medan magnet sangat lemah yang menyebabkan sabuk proton berada pada jarak dekat ke permukaan bumi. Hal ini disebabkan oleh posisi sumbu magnet bumi dengan kemiringan sekitar  $11,5^\circ$  dari sumbu rotasi bumi. Perpotongan sumbu rotasi bumi dan sumbu magnet bumi ini terletak pada jarak sekitar 500 km lebih ke utara di atas kutub selatan bumi. Kemiringan dan pergeseran sumbu magnet ini menyebabkan sabuk radiasi tersebut berada pada jarak yang dekat dengan bumi di atas laut Atlantik Selatan dan berada pada jarak yang jauh dari bumi di atas samudera pasifik utara. Sabuk radiasi yang lebih dekat dengan permukaan bumi inilah yang kemudian lebih dikenal dengan daerah Anomali Atlantik Selatan (*South Atlantic Anomaly - SAA*).

Wilayah SAA mengalami perubahan setiap waktu dan setiap ketinggian. Pada jarak 500 km dari permukaan bumi, wilayah SAA membentang pada lintang geografi dari  $-50^\circ$  hingga  $0^\circ$  dan pada bujur geografi dari  $-90^\circ$  hingga  $40^\circ$ . Bagian dengan intensitas paling tinggi dari wilayah ini bergeser ke barat dengan laju  $0,3^\circ$ /tahun. Laju pergeseran ini berkaitan erat dengan perbedaan rotasi antara inti dan permukaan bumi yang diperkirakan sekitar  $0,3^\circ - 0,5^\circ$  per tahun. Temuan terbaru juga menyatakan bahwa variasi medan magnet bumi turut mempengaruhi batas wilayah SAA tersebut. Bila terjadi pelemahan medan magnet, maka sabuk radiasi Van Allen akan semakin dekat ke bumi dan dalam waktu bersamaan terjadi perluasan daerah SAA pada ketinggian tertentu dari permukaan bumi.

Wilayah Anomali Atlantik Selatan sangat berpengaruh pada satelit-satelit orbit rendah yang mengitari bumi (Hasting dan Garret, 1996). Satelit-satelit ini akan melintasi wilayah ini secara periodik. Akibatnya satelit tersebut memiliki potensi terkena radiasi dari partikel proton energi tinggi setiap kali melewati wilayah SAA. Contoh nyata kasus ini dialami oleh stasiun luar angkasa internasional (*International Space Station – ISS*) yang mengorbit pada ketinggian sekitar 400 km dari permukaan bumi dengan inklinasi  $51,6^\circ$ , mengalami radiasi yang menyebabkan wahana tersebut memerlukan sistem pelindung ekstra. Hal yang sama juga dialami oleh wahana ulang alik (*space shuttle*) seperti Columbia, Challenger, Discovery, Atlantis, Endeavour dan wahana yang membawa teleskop luar angkasa Hubble (*Hubble Space Telescope – HST*) yang harus dilengkapi pelindung ekstra dan menunda pengambilan data selama

melewati wilayah SAA tersebut. Beberapa satelit lain yang mengalami masalah ketika melintasi wilayah SAA ini adalah sebagai berikut,

- ROSAT yang merupakan sebuah wahana yang merupakan observatorium sinar\_X yang mengorbit pada tanggal 1 Juni 1990. Kendali posisi wahana tersebut harus dimatikan selama melewati SAA untuk mencegah kerusakan parah,
- Pada tahun 1999, NASA meluncurkan *Terra Earth Observing System* (TEOS) untuk mempelajari perubahan iklim global. Sehari setelah diluncurkan terjadi anomali pada sistem motor penggerak yang menyebabkan status antena menjadi "*safe mode*". Hal ini mengakibatkan kegagalan dalam melacak jejak satelit dan pengambilan data ke stasiun bumi,
- Pada tahun 2001, satelit MODIS milik NASA mengalami kegagalan karena satelit tidak berfungsi dengan baik ketika melintasi SAA. Perlu waktu lebih dari dua minggu untuk membuat satelit kembali berfungsi,
- Teleskop luar angkasa Hubble (*Hubble Space Telescope – HST*) mengalami kerusakan giroskop saat melewati SAA,
- Peralatan altimeter pada satelit TOPEX mengalami gangguan (*random up-set*) yang mengorbit pada ketinggian 1000 km saat melintas di SAA,
- Peralatan pada wahana antariksa Columbia mengalami gangguan sehingga pengamatan tidak dapat dilakukan saat melewati SAA,
- Astronot mengalami gangguan biologis akibat tumbukan partikel energi tinggi ketika melewati SAA.

Sejak tahun 2007 Indonesia memiliki sebuah satelit mikro, Lapan TUBSAT, yang ditempatkan pada orbit rendah sekitar 630 km di atas permukaan bumi dengan inklinasi polar sekitar 98°. Rata-rata satelit tersebut melewati daerah SAA sebanyak 2 kali dalam sehari dengan durasi sekitar 20 menit setiap lintasan. Pada tahun 2015, Lapan berencana akan meluncurkan kembali dua buah satelit mikro yaitu satelit Lapan A2 pada ketinggian orbit rendah sekitar 650 km dengan inklinasi ekuatorial sekitar 8 - 10°. Satelit dengan orbit seperti ini diperkirakan akan melewati daerah SAA sebanyak 14 kali dengan durasi sekitar 15 menit setiap lintasan. Daerah SAA yang mengandung partikel energi tinggi akan memberikan radiasi pada satelit Lapan TUBSAT selama sekitar 40 menit setiap hari dan begitu pula pada satelit Lapan A2 akan mengalami radiasi dengan total waktu sekitar 210 menit (3,5 jam) per hari. Durasi yang cukup lama ini akan berpotensi memberikan dampak negatif pada operasional satelit Lapan TUBSAT dan Lapan A2 mengingat tingkat energi rata-rata partikel di daerah tersebut berkisar pada orde  $\sim 10^2$  MeV untuk proton dan orde  $\sim 10^2$  keV untuk elektron. Variasi tingkat energi ini bergantung pada aktivitas matahari dan badai geomagnet yang mempengaruhi fluks dan energi di wilayah SAA tersebut. Fluks dan energi ini sangat mempengaruhi besar dampak partikel pada satelit-satelit yang melintasi wilayah SAA. Lapan (Lembaga Penerbangan Antariksa Nasional) sebagai satu-satunya lembaga antariksa di Indonesia yang memiliki program pembuatan, pengembangan dan penempatan satelit di orbit berperan dan bertanggung jawab menanggulangi setiap dampak terburuk akibat cuaca antariksa pada satelitnya (khususnya) dan satelit milik Indonesia (umumnya). Dengan demikian, untuk mengantisipasi tingkat kerusakan satelit-satelit orbit rendah, khususnya milik Lapan perlu dilakukan suatu penelitian mengenai karakteristik partikel bermuatan di wilayah SAA yang mempengaruhi kinerja satelit dengan harapan operator satelit akan memiliki waktu merancang strategi tindakan mitigasi yang dapat mengurangi tingkat kerusakan satelit berdasarkan informasi yang diberikan melalui penelitian ini.

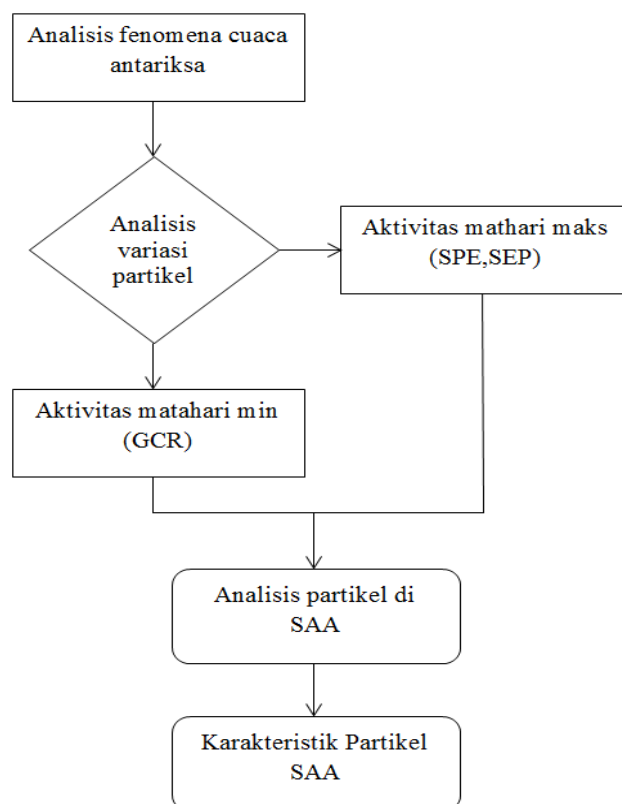
## 2 DATA DAN METODOLOGI

Penelitian mengenai karakteristik partikel ini menggunakan data bilangan *sunspot* sebagai indikator tingkat aktivitas matahari dan data tingkat energi dan fluks partikel proton dan elektron sebagai penyebab utama terjadinya anomali pada satelit. Sumber data bilangan *sunspot* dapat diakses melalui situs [http:// omniweb. gsfc. nasa.gov/form/dx1.html](http://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html). Data partikel bermuatan dari satelit NOAA 15 dapat di akses melalui situs <http://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/poes/data/>. Data sinar kosmik galaksi (*Galactic Cosmic Rays – GCR*) bersumber dari stasiun pengamatan GCR yang ada di Moscow (*Moscow Neutron Monitor - MNM*) yang dapat diakses melalui situs <http://helios.izmiran.rssi.ru/cosray/events.htm>. Untuk bilangan *sunspot*, data yang digunakan adalah data harian, sedangkan data tingkat energi dan fluks partikel bermuatan adalah data yang diperoleh dari satelit NOAA 15.

Metodologi yang digunakan dalam menganalisis karakteristik partikel bermuatan di wilayah SAA ini adalah sebagai berikut,

- Menganalisis variasi partikel pada saat tingkat aktivitas matahari maksimum dan pada saat aktivitas matahari minimum (GCR maksimum),
- Melakukan kajian dan analisis terhadap fisis dan propagasi partikel di sabuk radiasi Van Allen,
- Melakukan kajian dan analisis wilayah SAA melalui data satelit NOAA 15,
- Menganalisis karakteristik partikel bermuatan di wilayah SAA sebagai potensi penyebab gangguan operasional satelit.

Diagram analisis karakteristik partikel bermuatan di SAA dapat dilihat pada Gambar 2-1.



Gambar 2-1: Diagram analisis partikel bermuatan di SAA

Analisis karakteristik partikel bermuatan di wilayah SAA ini pada dasarnya beranjak dari tinjauan fenomena cuaca antariksa secara umum. Matahari melalui CME menghasilkan semburan partikel yang dibawa oleh angin matahari (*solar wind*) yang

dikenal dengan peristiwa *Solar Energetic Particle* (SEP) dan dari fenomena *flare* yang dikenal dengan peristiwa *Solar Proton Event* (SPE). Partikel yang dilontarkan dan mengarah ke bumi mencapai lapisan magnetosfer dan atmosfer bumi dengan fluks dan energi yang bervariasi, bergantung pada interaksi partikel tersebut di setiap lapisan yang memiliki komposisi molekul yang berbeda-beda. Beberapa partikel ini mengalir dalam garis-garis gaya magnet bumi (*magnetic field lines*) dan beberapa lainnya lolos dan bergerak menjauhi bumi. Beberapa partikel dalam garis-garis gaya magnet ini ada yang terperangkap dalam sabuk radiasi, mengendap dan saling berinteraksi dengan partikel lainnya hingga membentuk plasma dengan energi dan fluks yang berbeda. Plasma dalam sabuk radiasi ini bervariasi mengikuti aktivitas matahari. Pada saat aktivitas matahari maksimum, variasi plasma dipengaruhi oleh lontaran partikel dari fenomena SPE dan SEP, sedangkan pada saat aktivitas matahari minimum variasi plasma lebih banyak dipengaruhi oleh lontaran partikel dari sinar kosmik galaksi (GCR).

Variasi plasma oleh partikel yang bersumber dari aktivitas matahari dan sinar kosmik galaksi akan menyebabkan wilayah sabuk radiasi mengalami perubahan akibat gerak plasma yang mendapat tambahan partikel dari kedua sumber tersebut. Hal ini mengindikasikan terjadi perubahan pada gerak, kecepatan dan komposisi plasma yang mempengaruhi karakteristik partikel di wilayah tersebut. Perubahan yang terjadi pada wilayah sabuk radiasi dapat dikatakan akan mempengaruhi gerak, kecepatan dan komposisi plasma yang terdapat di wilayah SAA mengingat wilayah ini masih bagian kecil dari wilayah sabuk radiasi dalam (*inner belt*).

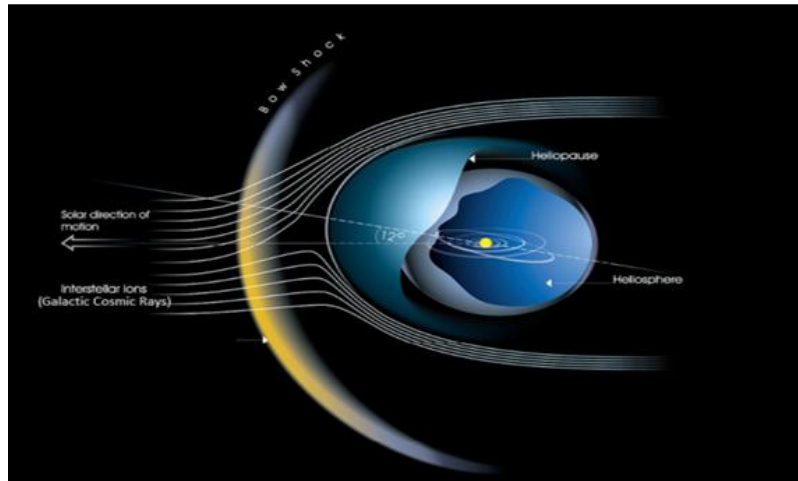
Perubahan gerak, kecepatan dan komposisi partikel di wilayah SAA ini akan mempengaruhi energi dan fluks partikel dalam wilayah tersebut pada selang waktu tertentu. Akibatnya satelit-satelit yang mengorbit pada ketinggian orbit rendah bumi akan berinteraksi dengan partikel bermuatan dan menimbulkan dampak yang berbeda-beda, bergantung pada tingkat energi dan fluks partikel serta material (bahan) satelit itu sendiri. Interaksi antara partikel dan satelit cenderung bersifat destruktif (merusak) sistem satelit, sehingga satelit tidak beroperasi secara optimal. Fenomena ini sering disebut dengan anomali satelit.

Kajian dan analisis yang dilakukan terhadap plasma di wilayah SAA memberikan informasi mengenai karakteristik partikel bermuatan di wilayah SAA sebagai penyebab terjadinya kasus anomali satelit. Informasi ini sangat bermanfaat bagi operator satelit untuk memikirkan dan merancang strategi tepat yang harus dilakukan pada satelit untuk mengurangi dan mengantisipasi dampak kerusakan akibat interaksi partikel bermuatan pada satelit selama melintasi wilayah SAA tersebut.

### 3 HASIL

#### A. Perambatan Partikel Sinar Kosmik Galaksi

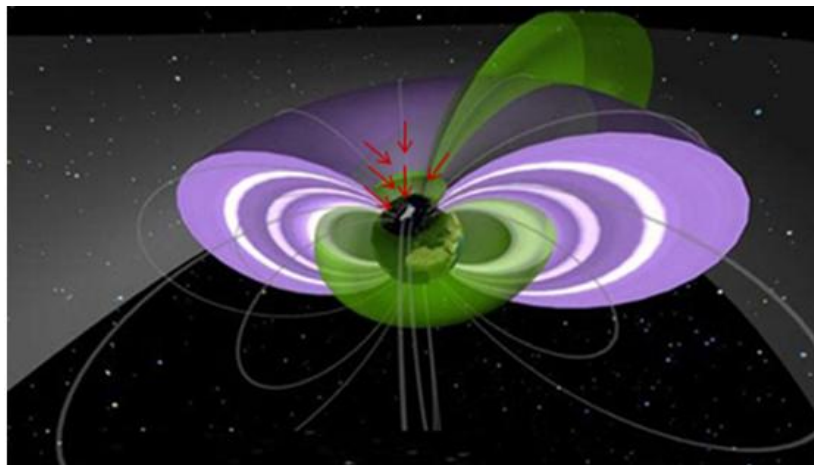
Sinar kosmik galaksi (GCR) merupakan partikel energi tinggi yang menyebar dalam sistem tata surya yang bersumber dari ledakan bintang-bintang dalam sebuah galaksi. Komposisi terbesar dari GCR adalah proton, elektron dan inti atom, namun proton memiliki komposisi yang paling dominan (Easley, 2007). Peningkatan partikel dari GCR diketahui memiliki korelasi terhadap aktivitas matahari. Pada saat aktivitas matahari minimum, maka peningkatan intensitas partikel dari GCR mengalami maksimum dan begitu juga sebaliknya (Shea and Smart, 1990). Perambatan partikel dari GCR dalam sistem matahari bumi mengikuti medan magnet antar planet (*Interplanetary Magnetic Field* – IMF), namun ditemukan juga bahwa terdapat sejumlah besar partikel bermuatan dari GCR yang tersebar acak. Ilustrasi perambatan partikel tersebut dapat dilihat pada Gambar 3-1.



Gambar 3-1: Perambatan partikel GCR dalam sistem matahari (<http://sci.esa.int/trs/36022-the-interstellar-heliopause-probe/>)

Partikel GCR bersifat isotropik (arah datang seragam) ketika memasuki heliosfer, namun ketika di ruangan antar planet (sistem matahari-bumi), partikel mengalir mengikuti medan magnet antar planet dan sejumlah lainnya bersifat acak (Jokipii, 2011).

Sejumlah partikel yang mengikuti medan magnet antar planet yang bersinggungan dengan magnetosfer bumi akan merambat memasuki wilayah kutub utara bumi untuk selanjutnya mengalir dan terkonsentrasi dalam sabuk radiasi dalam (*inner belt*). Ilustrasi mengenai perambatan partikel ini dapat dilihat pada Gambar 3-2.

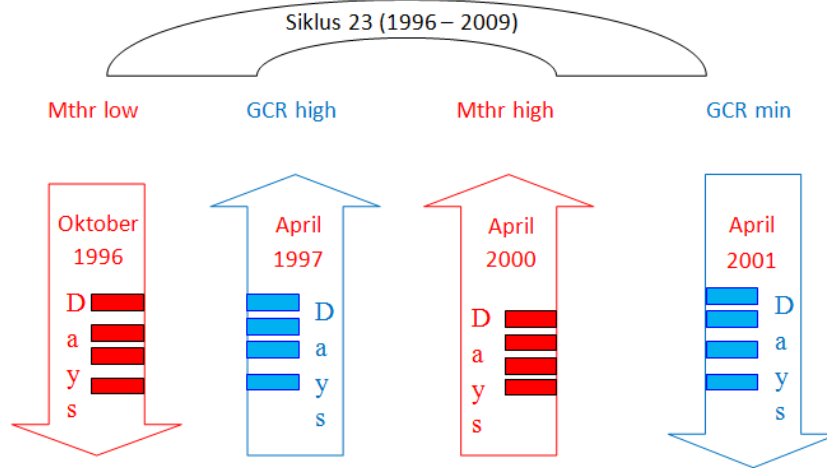


Gambar 3-2: Perambatan partikel GCR dalam sabuk radiasi dalam ([http://diewutdesvakuums.de/differentials\\_the\\_way\\_to\\_the\\_vacuum\\_structure.htm](http://diewutdesvakuums.de/differentials_the_way_to_the_vacuum_structure.htm))

Tingkat energi yang dimiliki oleh partikel GCR umumnya lebih besar dibandingkan tingkat energi partikel dari matahari. Pada tingkat energi sekitar  $\geq 100$  MeV, partikel yang mengalir dalam ruang antar planet didominasi oleh partikel dari GCR (Jokipii, 2011).

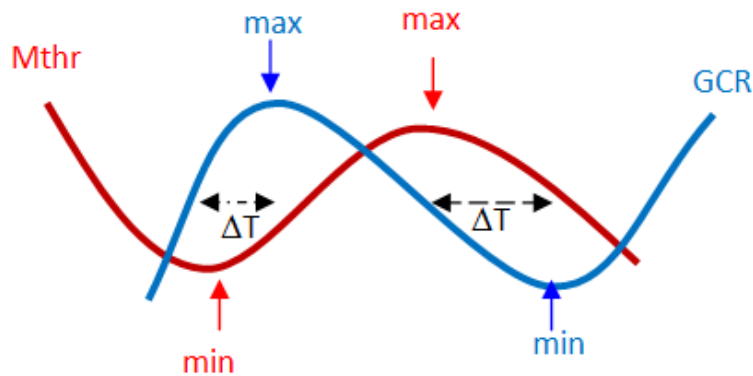
### B. Variasi Partikel di SAA

Untuk melihat variasi partikel di wilayah anomali atlantik selatan dari fenomena GCR dan aktivitas matahari, perlu melihat terlebih dahulu peningkatan partikel di wilayah magnetosfer bumi saat kedua fenomena itu terjadi. Dalam hal ini diambil data ketika aktivitas minimum pada beberapa waktu tertentu dan ketika matahari mencapai maksimum untuk beberapa peristiwa besar dalam siklus 23. Lebih sederhana dapat dilihat pada bagan Gambar 3-3.



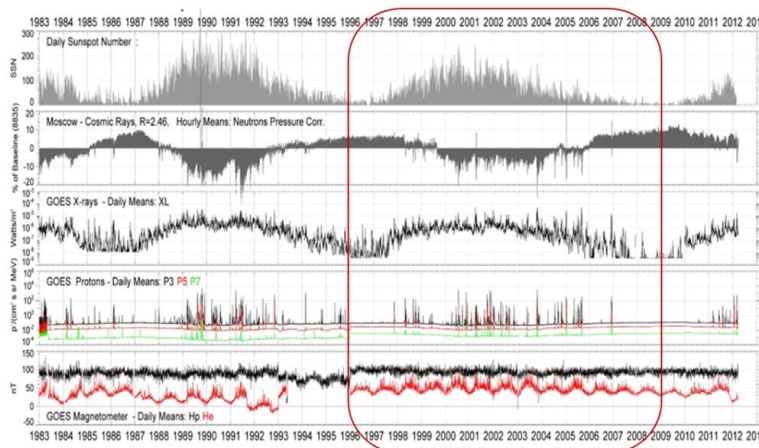
Gambar 3-3: Bagan di atas memperlihatkan bahwa pada saat tingkat aktivitas matahari rendah (minimum), maka terjadi peningkatan intensitas partikel dari GCR (GCR maksimum).

Peningkatan ini memiliki jeda waktu sekitar 6 bulan. Data juga memperlihatkan turunnya intensitas partikel dari GCR (GCR minimum) saat aktivitas matahari tinggi (maksimum). Intensitas minimum ini memiliki jeda waktu sekitar 1 tahun (di ilustrasikan pada Gambar 3-4).



Gambar 3-4: Bagan di atas memperlihatkan jeda waktu ( $\Delta T$ ) antara fase siklus matahari minimum ke fase GCR maksimum dan fase siklus matahari maksimum ke fase GCR minimum dalam siklus 23

Langkah berikut adalah melihat perubahan atau peningkatan partikel di SAA pada dua peristiwa, yaitu saat matahari minimum dan GCR maksimum serta saat matahari maksimum dan GCR minimum. Peningkatan partikel selama siklus 23 di lingkungan antariksa bumi dapat dilihat pada Gambar 3-5.



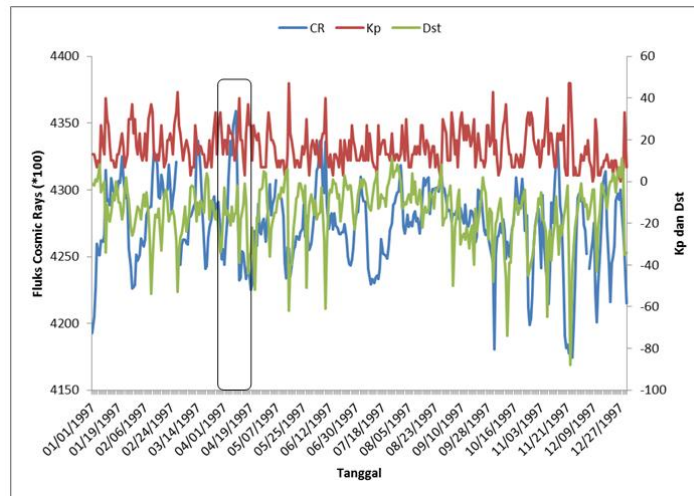
Gambar 3-5: Profil peningkatan fluks partikel selama siklus 23 ditandai dengan lingkaran merah ([http://en.wikipedia.org/wiki/File:SpaceEnvironmentOverview\\_From\\_19830101.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:SpaceEnvironmentOverview_From_19830101.jpg))

Gambar 3-5 sekaligus memperlihatkan bahwa ketika aktivitas matahari meningkat, maka GCR mengalami penurunan dan sebaliknya. Pengamatan yang dilakukan dengan menggunakan peralatan GCR yang ada di Moscow memperlihatkan bahwa selama bulan April 1997 (GCR maksimum), terjadi badai GCR (GCR storms) sebanyak 4 kali yaitu pada tanggal 10, 14, 16 dan 21 April 2007. Adapun pada saat GCR minimum pada bulan April 2001 terjadi juga badai GCR sebanyak 10 kali yaitu pada tanggal 4,6,7,8,11,13,18,21,24 dan 28 April 2001. Pada saat aktivitas matahari minimum, tidak diperoleh data kejadian badai GCR namun pada saat aktivitas matahari maksimum, terjadi badai GCR sebanyak 6 kali yaitu tanggal 1,6,12,16,18 dan 24 April 2000. Lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 3-1.

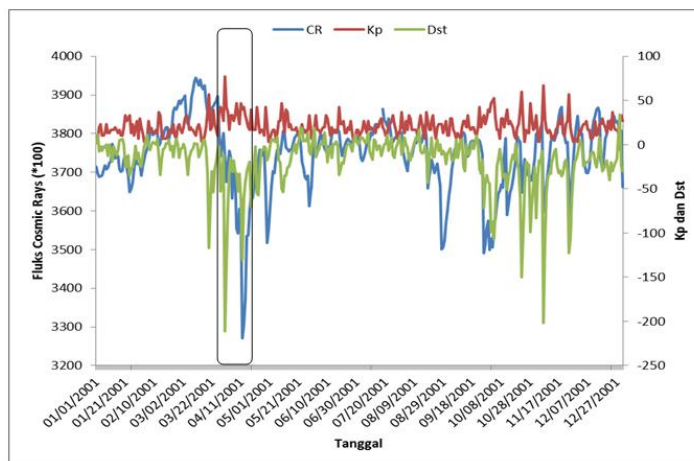
Tabel 3-1: KEJADIAN SAAT TERJADI BADAI GCR

Event	Waktu		GCR storms
	Tahun	Bulan	Tanggal
Fase siklus Matahari min	1996	Oktober	-
Fase GCR maks	1997	April	10,14,16,21
Fase siklus Matahari maks	2000	April	1,6,12,16,18,24
Fase GCR min	2001	April	4,6,7,8,11,13,18,21,24,28

Selama kurun waktu 1997, profil peningkatan GCR serta dampaknya pada komposisi partikel di magnetosfer bumi dapat dilihat pada Gambar 3-6.



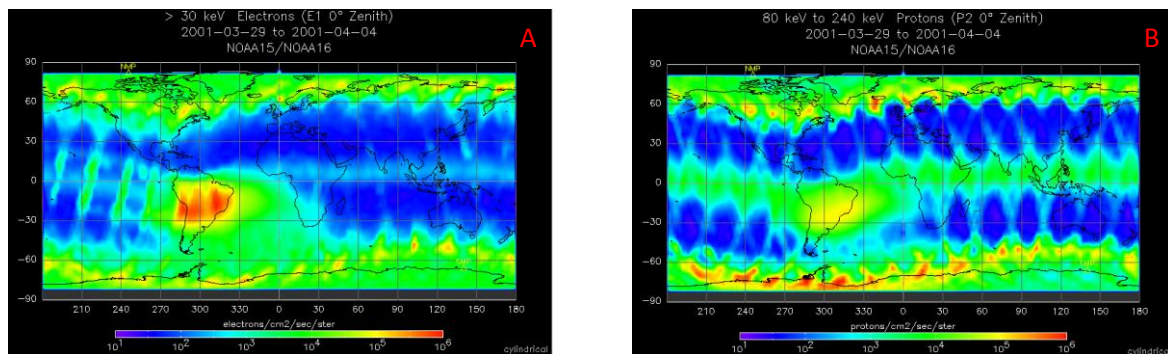
Gambar 3-6: Profil peningkatan GCR tahun 1997 dan dampaknya di magnetosfer



Gambar 3-7: Profil penurunan GCR tahun 2001 dan dampaknya di magnetosfer

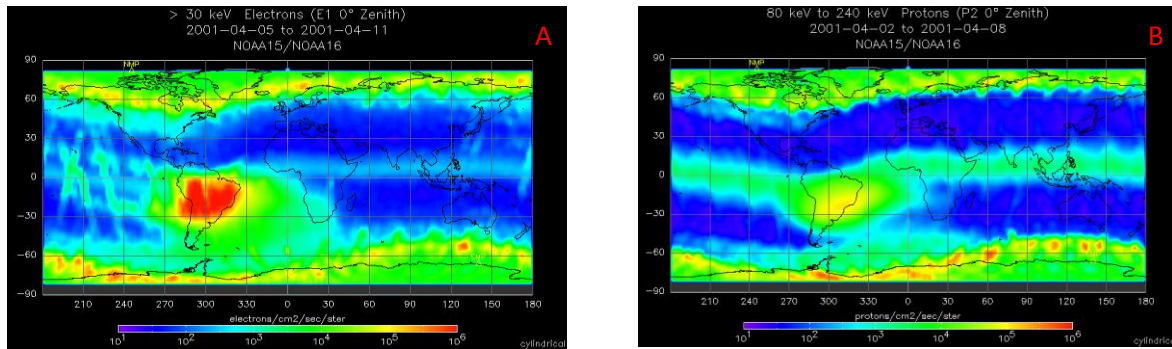


Pada Gambar 3-7, GCR berada pada kondisi minimum dan terjadi penurunan dengan fluks maksimum hanya 394.508 partikel/cm<sup>2</sup>. Pada kondisi tersebut terjadi peningkatan aktivitas geomagnet bila ditinjau dari indeks Dst yang mencapai nilai -200 nT. Dalam hal ini kemungkinan pengaruh matahari lebih dominan dibandingkan GCR. Mengingat data sebaran partikel di SAA untuk tahun 1997 tidak dapat diakses dengan mudah, maka untuk analisis digunakan data tahun 2000 dan 2001, yaitu saat Matahari maksimum dan GCR minimum. Meskipun GCR minimum, namun terjadi beberapa kali badai GCR dalam periode bulan April 2001, namun dalam analisis ini diambil yang memiliki magnitudo efek di atas 5 sesuai dengan klasifikasi yang dilakukan oleh MNM yaitu pada tanggal 4, 8,11 dan 28 April 2001. Pada tahun 2000, tidak ditemukan badai GCR di atas magnitudo 5. Perubahan fluks partikel di wilayah SAA dalam kurun waktu tersebut dapat dilihat pada Gambar 3-8 hingga Gambar 3-10.



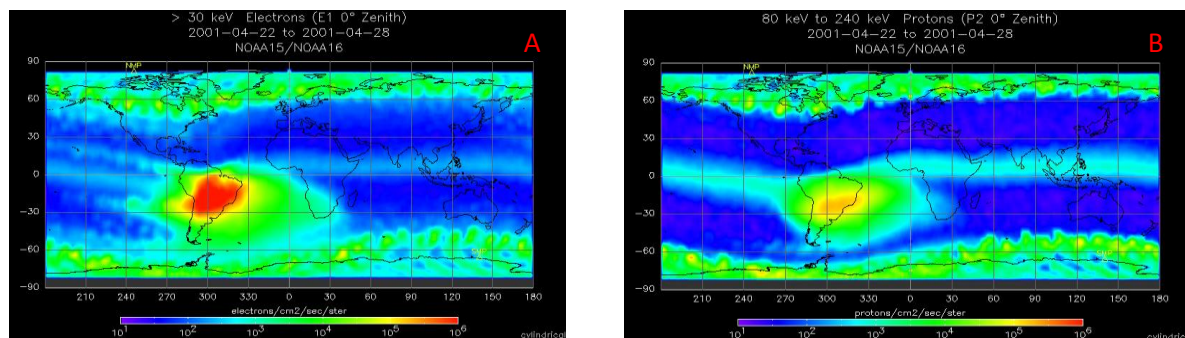
Gambar 3-8: Variasi fluks partikel di SAA pada tanggal 4 April 2001 untuk elektron (A) dan proton (B)

Pada Gambar 3-8 terlihat bahwa terjadi peningkatan fluks elektron ( $E > 30$  keV) hingga mencapai orde  $\sim 10^6$  partikel/cm<sup>2</sup> dengan lebar bujur sebaran sekitar 40°, namun tidak terlihat adanya peningkatan proton ( $80 \text{ keV} < E < 240 \text{ keV}$ ) di wilayah SAA.



Gambar 3-9: Variasi fluks partikel di SAA pada tanggal 11 April 2001 untuk elektron (A) dan proton (B)

Gambar 3-9 juga memperlihatkan peningkatan elektron dengan orde  $\sim 10^6$  partikel/cm<sup>2</sup> dengan sebaran bujur sekitar 40°, namun fluks proton tidak sebesar elektron, hanya sekitar orde  $\sim 10^5$  partikel/cm<sup>2</sup>.



Gambar 3-10: Variasi fluks partikel di SAA pada tanggal 28 April 2001 untuk elektron (A) dan proton (B)

Badai GCR yang terjadi pada tanggal 28 April 2001 juga memperlihatkan peningkatan fluks elektron yang mencapai orde  $\sim 10^6$  partikel/cm<sup>2</sup> dengan lebar bujur sekitar 40°, namun tidak terjadi peningkatan yang signifikan pada fluks proton.

**C. Peningkatan Fluks Saat Semburan Proton dari Matahari (SPE)**

Peningkatan fluks partikel proton dari matahari yang lebih dikenal sebagai semburan proton matahari, dalam konteks pengaruhnya pada satelit, lebih besar pengaruhnya pada wilayah orbit tinggi. Meskipun demikian, tidak tertutup kemungkinan penetrasi partikel hingga ke orbit rendah akan memberikan pengaruh terhadap variasi plasma di orbit rendah. Dengan demikian, analisis ini mencoba melihat pengaruh peningkatan plasma di orbit rendah menggunakan data kejadian SPE yang diperoleh melalui situs <http://umbra.nascom.nasa.gov/SEP/> dengan sedikit modifikasi tampilan data seperti yang terlihat pada Tabel 3-2.

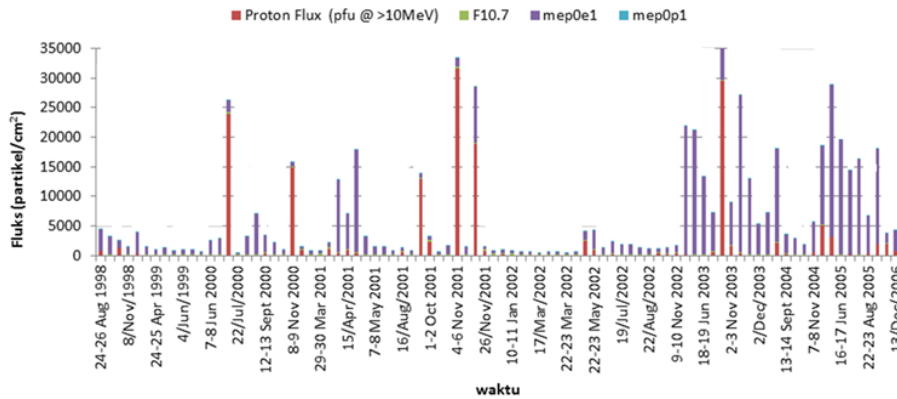
Tabel 3-2: DATA FLUKS PARTIKEL DI ORBIT TINGGI DAN ORBIT RENDAH

SPE	GOES ( <i>High Orbit</i> )	NOAA ( <i>Low Orbit</i> )		
	Proton Flux (pfu @ >10MeV)	F10.7	mep0e1	mep0p1
24-26 Aug 1998	670	126,9	3669,171	22,48268
25/Sep/1998	44	138,5	3052,443	44,22766
30 Sept - 1 Okt 1998	1200	118,8	1091,496	18,83979
8/Nov/1998	11	152,7	1230	55,69088
14/Nov/1998	310	126,5	3424,864	45,33095
23/Jan/1999	14	165,9	1173,375	22,78916
24-25 Apr 1999	32	102,6	813,8576	14,59839
5 Mei 1999	14	140,9	1044,942	18,7525
...	...	...	...	...

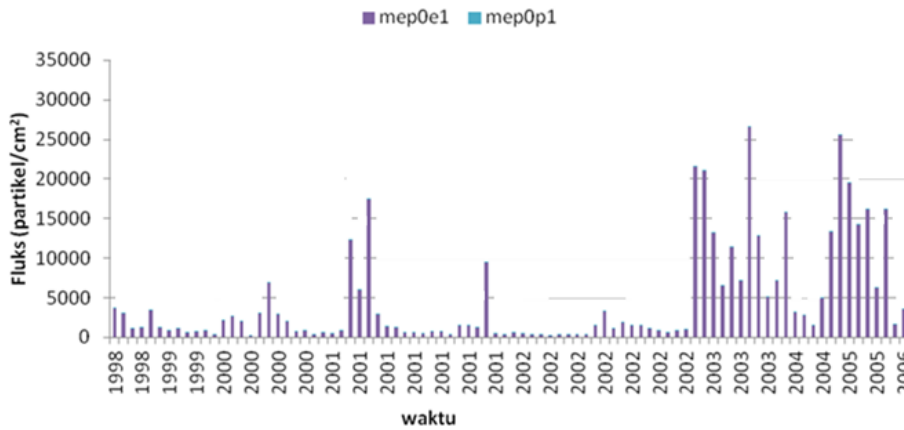
Tabel 3-2 merupakan beberapa contoh data kejadian SPE yang direkam oleh satelit GOES di orbit tinggi (GEO) serta data partikel pada kanal energi tertentu (elektron dan proton) khusus di wilayah SAA yang direkam oleh satelit NOAA 15 di orbit rendah (LEO). Titik –titik dalam tabel menunjukkan banyaknya data yang tidak dapat dicantumkan agar tampil praktis. Tabel 3-2 juga menampilkan data fluks radiasi matahari di atmosfer atas (*upper atmosphere*) melalui indeks F10,7. Data SPE yang ada untuk siklus 23 hanya sampai tahun 2006. Tanda titik tiga pada Tabel untuk tiap kolom berarti data tersebut bersambung hingga tahun 2006. Grafik peningkatan fluks saat SPE dan fluks di orbit rendah di wilayah SAA yang direkam oleh NOAA 15 dapat dilihat melalui histogram pada Gambar 3-11.

Gambar 3-11 memperlihatkan bahwa peningkatan SPE belum tentu akan menyebabkan peningkatan fluks partikel di wilayah SAA, bahkan banyak peningkatan fluks proton dan elektron di SAA tanpa didahului oleh peningkatan SPE di orbit tinggi. Namun beberapa diantaranya terlihat berkorelasi seperti pada tahun 2000 (14-15 Juli 2000), fluks SPE mencapai 24000 pfu dan fluks elektron dan proton di SAA juga mengalami peningkatan. Korelasi ini juga terlihat pada tahun 2001 (24-25 Sep, 1-2 Okt, 4-6 Nov, 22-24 Nov) dan juga tahun 2003 (28-29 Okt). Peningkatan radiasi matahari di atmosfer atas yang ditandai dengan fluktuasi nilai F10,7 memperlihatkan bahwa tidak selalu fluktuasi peningkatan/penurunan fluks partikel bersamaan dengan

peningkatan/penurunan fluks radiasi matahari. Profil peningkatan partikel elektron ( $E > 30$  keV) dan proton ( $80 < E < 240$  keV) di wilayah SAA dari tahun 1998 hingga tahun 2006 dapat dilihat melalui histogram Gambar 3-12.



Gambar 3-11: Histogram peningkatan fluks di orbit tinggi (SPE) dan orbit rendah (mep)



Gambar 3-12: Histogram peningkatan fluks partikel di SAA dalam siklus 23

Peningkatan fluks partikel terbesar di SAA justru terlihat bukan pada saat puncak aktivitas matahari, melainkan lebih banyak pada saat fase aktivitas matahari menurun, yaitu dari tahun 2002 akhir hingga tahun 2005 akhir. Hal ini mengindikasikan bahwa peningkatan fluks partikel di SAA juga tidak selalu identik dengan peningkatan aktivitas matahari, melainkan diduga terdapat mekanisme lain yang terkait dengan propagasi partikel di orbit rendah secara global dan wilayah SAA secara lokal.

Pada tingkat energi yang lebih tinggi ( $E > 30$  keV untuk elektron dan  $80 < E < 240$  keV untuk proton) fluks partikel di SAA lebih rendah dibandingkan fluks partikel pada pengukuran mep0e1 dan mep0p1. Fluks partikel rata-rata di SAA tanpa adanya “pemicu” seperti penambahan partikel yang membuat sesama partikel berinteraksi adalah sekitar  $\sim 10^2$  partikel/cm<sup>2</sup> (mep0e1 dan mep0e2) yang dapat diketahui dari data partikel yang direkam oleh satelit NOAA 15, sedangkan untuk energi yang lebih tinggi memiliki fluks yang lebih rendah dari  $\sim 10^2$ .

Peningkatan partikel di SAA pada saat adanya “pemicu” dari matahari dan sinar kosmik galaksi ataupun melalui mekanisme lokal (propagasi dan saling interaksi antar partikel yang dinamis) menghasilkan fluks yang bervariasi, namun secara umum memiliki fluks di atas  $\sim 10^3$  partikel/cm<sup>2</sup>. Semua informasi ini dihasilkan melalui analisis data partikel yang direkam oleh satelit NOAA 15.

Tingkat energi dengan orde  $\sim$  keV untuk elektron dan proton telah dapat menyebabkan dampak pemuatan pada permukaan satelit (*surface charging*). Dampak

ini masuk dalam kategori “rendah”, namun yang perlu menjadi perhatian adalah akumulasi “dampak rendah” tersebut dalam periode waktu revolusi satelit yang menyebabkan bagian satelit yang berinteraksi dengan plasma energi rendah yang berakibat fatal sehingga tidak jarang menyebabkan satelit mengalami kerusakan yang lebih serius yang disebut *internal charging*, yaitu pemuatan yang dialami oleh komponen bagian dalam satelit (prosesor, chips, dll) akibat penetrasi partikel melalui permukaan satelit yang “robek” akibat proses korosi yang terjadi pada material struktur permukaan. Hal ini pernah dialami oleh wahana *Long Duration Exposure Facility* (LDEF) pada tingkat energi sekitar 5 eV (Hasting dan Garrett, 1996), termasuk juga satelit Lapan TUBSAT pada bulan September 2007 (Ahmad, 2010).

#### 4 KESIMPULAN

Partikel bermuatan yang merambat hingga orbit rendah bumi (*Low Earth Orbit – LEO*) bervariasi dan pada umumnya berasal dari dua sumber, yaitu dari partikel yang dilontarkan oleh matahari dan partikel yang bersumber dari sinar kosmik galaksi (*Galactic Cosmic Rays – GCR*). Pada saat aktivitas matahari rendah (minimum), maka partikel yang bersumber dari GCR mengalami peningkatan, sebaliknya pada saat aktivitas matahari tinggi (maksimum), partikel yang berasal dari GCR mengalami penurunan. Peningkatan fluks partikel GCR tidak signifikan mempengaruhi peningkatan partikel di magnetosfer yang terlihat melalui indeks Kp dan Dst. Meskipun fluks partikel GCR mengalami penurunan, namun ditemukan adanya peningkatan partikel melalui fenomena badai GCR (*GCR storms*). Peningkatan partikel dari badai GCR pada beberapa waktu terlihat berkorelasi dengan peningkatan fluks elektron di SAA, namun tidak terlihat pada peningkatan fluks proton. Analisis variasi partikel di SAA melalui kejadian SPE juga memberikan informasi bahwa peningkatan fluks partikel di SAA tidak selalu identik dengan peningkatan aktivitas matahari ataupun GCR. Diduga ada mekanisme lain yang menyebabkan peningkatan tersebut yang memerlukan penelitian lebih mendalam dengan data yang komprehensif. Pada kondisi ‘tenang’, fluks partikel di SAA berkisar pada  $10^2$  partikel/cm<sup>2</sup>, sedangkan pada kondisi ‘terganggu’, fluks partikel berada di atas  $10^3$  partikel/cm<sup>2</sup>. Adapun sebaran bujur fluks elektron pada saat badai GCR berada pada rentang 30° - 40° dengan fluks tinggi mencapai orde  $\sim 10^6$  partikel/cm<sup>2</sup>. Hal ini mengindikasikan bahwa sumbangsih partikel dari GCR memang ada yang mempengaruhi distribusi partikel elektron di SAA, namun sebaliknya tidak terlihat pada proton. Pada umumnya energi dengan orde  $\sim$  keV untuk proton dan elektron memberikan dampak “rendah” pada satelit yang menyebabkan pemuatan pada permukaan satelit, namun mengingat satelit memiliki revolusi (siklus edar orbit) dalam satu hari lebih dari 10 kali untuk orbit rendah, maka dampak “rendah” tersebut dapat terakumulasi yang menyebabkan satelit menjadi rentan yang pada akhirnya mengakibatkan kerusakan yang lebih serius (*internal charging*). Informasi karakteristik partikel bermuatan di SAA menjadi hal yang fundamental untuk merancang sebuah sistem peringatan dini gangguan operasional satelit di masa mendatang terutama satelit-satelit orbit rendah, baik yang mengorbit polar maupun ekuatorial.

#### DAFTAR RUJUKAN

- Ahmad, N., 2010. *Charging Phenomena On Lapan TUBSAT Satellite*, IWSWI Proceedings, hal. 39-43. ISBN 978-979-1458-49-8.
- Easley, S. M., 2007. *Anisotropy in the South Atlantic Anomaly*, Thesis of Airforce Institute of Technology, Ohio.
- Hasting, D. dan Garret, H., 1996. *Spacecraft Environment Interaction*, Cambridge University Press.

- Jokipii, J. R., 2011. *Cosmic Rays in the Heliosphere*, Presentation at the 2011 Heliophysics Summer School, Boulder. – ganti dengan makalah prosiding, jurnal atau buku-.
- Pisacane, V. L., 2008. *The Space Environment and Its Effects on Space Systems*, AIAA Education Series, ISBN 978-1-56347-926-7.
- Shea, M. A. dan Smart, D. F., 1990. *The Effect of Solar Activity on the Cosmic Ray Intensity at Solar Minimum*, 21<sup>st</sup> International Cosmic Ray Conference, Conference Papers, 6, hal. 13-17.
- Shibata, M., Katayose, Y., Huang, J. dan Chen, D., 2010. *Chemical Composition and Maximum Energy of Galactic Cosmic Rays*, The Astrophysical Journal, 716, hal. 1076-1083.

