

DINAMIKA TABUNG MEDAN MAGNET DARI FLARE TEPI DIAMATI DARI SPD WATUKOSEK

Nanang Widodo*), Bambang Setiahad*), Bachtiar Anwar**)

RINGKASAN

Berdasarkan pengamatan rutin, setelah terjadi disk flare (flare di sekitar pusat piringan matahari) sering teramati perubahan jumlah sunspot di sekitarnya. Hal ini memberikan indikasi adanya perpecahan tabung magnetik (magnetik flux tube) setelah flare. Dengan menggunakan data flare tepi pada panjang gelombang H-alpha, fenomena ini dapat dikonfirmasi kebenarannya melalui analisa ketinggian materi flare terhadap waktu. Pada saat impulsive phase, materi flare terlepas dari tabung medan magnet dan mencapai puncaknya setelah energi flare tidak mampu lagi mendorong ke atas. Plasma flare kemudian turun kembali akibat gaya gravitasi matahari dan pada ketinggian tertentu plasma terperangkap oleh tabung medan magnet. Pecahnya tabung magnetik disimpulkan dari pola plot ketinggian materi flare terhadap waktu. Kecepatan minimum agar suatu materi flare dapat meninggalkan tabung magnetik adalah 60 km/s.

1. PENDAHULUAN

Aktivitas matahari, khususnya flare, tidak terlepas dari konfigurasi tabung medan magnet sunspot di daerah aktif tersebut. Keadaan tersebut disebabkan oleh dua kondisi yaitu: ketidakstabilan dan rekoneksi tabung medan magnet. Kedua teori di atas diperkenalkan oleh Dungey 1953.

Identifikasi data pengamatan H-alpha stasiun matahari Watukosek LAPAN, dari November 1990 sampai Oktober 1993, didapatkan tujuh peristiwa

flare di tepi cakram matahari. Seperti halnya penelitian flare pada umumnya, pada peristiwa flare tepi juga diamati perubahan aktivitas daerah flare. Hanya saja pada peristiwa flare tepi arah penjalaran materi tegak lurus dengan pengamatan kita. Maka analisa yang mungkin dilakukan adalah dengan mengikuti perambatan semburan materi flare terhadap tepi piringan matahari. Perekaman semua data flare tepi di atas diperoleh dari hasil pemotretan dengan teleskop H-alpha setiap menit.

Makalah ini membahas analisa flare tepi berdasarkan citra H-alpha dari Stasiun Pengamatan Matahari Watukosek. Ketinggian semburan

*) Peneliti SPD Watukosek

***) Peneliti Bidang Matahari dan Lingkungan Antariksa

materi flare diukur dan diplot terhadap waktu untuk mengetahui ada tidaknya perpecahan tabung medan magnet selama terjadi flare.

2. METODA PENGUKURAN

Flare tepi yang termasuk dalam pemilihan adalah flare dengan perubahan ketinggian flare relatif tegak lurus terhadap tepi matahari. Syarat pemilihan lainnya yaitu kedudukan kaki flare diperkirakan di atas 80° bujur Timur atau Barat. Sedangkan titik pusat dari luas kaki flare dipilih sebagai pangkal kaki flare.

Peralatan yang digunakan adalah : Proyektor slide, peta lokasi (stoney hurst), kaca milimeter blok, mesin cuci cetak film, kaca pembesar dan alat tulis. Prosedur pengukuran tinggi flare adalah sebagai berikut :

1. Film negatif diproyeksikan pada papan proyeksi dengan pembesaran diameter 24 cm.
2. Letak stoney hurst yang bersesuaian dengan hari terjadi flare dan tempatkan berimpit pada diameter papan proyeksi.
3. Putar stoney hurst sebesar sudut $\pm P$ (position angle) dari acuan sumbu Timur - Barat matahari.
4. Sebelum melakukan pengukuran, proyeksi negatif film harus tepat benar pada perbesaran diameter 24cm.
5. Ketinggian flare diukur mulai dari posisi kaki yang sama sampai puncak flare pada setiap pemotretan, dari awal hingga akhir.

Selanjutnya, pemakaian hukum kekekalan energi diperlukan untuk menurunkan persamaan gerak fasa kedua menjadi bentuk persamaan parabola. Persamaan ini kemudian ditransformasikan ke dalam bentuk matrik guna menyusun metode kuadrat terkecil dan memperoleh hasil seteliti mungkin.

3. PEMBAGIAN FASA FLARE TEPI

Ketujuh peristiwa flare tepi, secara fisis, mengalami suatu fasa atau tahapan yang sama. Kondisi fisis tersebut dapat dibedakan dalam tiga bagian yaitu : sayap naik, lintasan parabolik dan sayap turun. Pembagian fasa berdasarkan rentang waktu dari masing-masing fasa menunjukkan adanya perbedaan sifat keterikatan plasma terhadap tabung medan magnet yang mengurungnya. Pembagian fasa tersebut dapat digambarkan tanpa skala, pada gambar 3.1.

Besaran Δh mempunyai arti bahwa ada perbedaan ketinggian saat materi flare mulai meninggalkan tabung medan magnetik dan saat kembali terperangkap tabung medan magnetik. Adanya Δh disebabkan oleh energi potensial yang tersisa ikut mendorong tabung magnetik ke atas selama terjadi flare. Sehingga saat materi kembali terperangkap, kedudukan tabung magnetik telah bertambah ketinggiannya. Ketiga fasa tersebut adalah sebagai berikut :

- Sayap naik, berarti ketinggian flare pada fasa ini merupakan posisi materi yang masih terkurung dalam ta-

bung medan magnet. Pertambahan ketinggian terhadap waktu menunjukkan garis linier.

- Lintasa Parabola, dinamakan lintasan parabola karena pergerakan titik puncak materi flare pada fasa kedua ini mempunyai lintasan seperti gerak parabola. Pada fasa ini materi flare telah terlepas dari pengaruh tabung medan magnet. Ketinggian pada menit pertama dijadikan besaran awal untuk mengukur kecepatan awal materi flare saat meninggalkan medan magnet. Tinggi perambatan flare akan mencapai titik maksimum apabila energi plasma yang terkandung dalam semburan sudah tidak mampu lagi menambah ketinggian dan kembali ke dalam tabung medan magnet. Untuk membuktikan kebenaran dugaan ini lintasan parabolik tersebut didekati dengan metode kuadrat terkecil pangkat dua.
- Sayap turun berarti materi flare mulai terperangkap kembali dalam tabung medan magnet. Lintasannya cenderung lebih landai dan merupakan garis linier. Pada tahapan ini sebagian dari tujuh flare memiliki pola lintasan berupa anak tangga menurun. Peristiwa ini memberikan gambaran adanya kemungkinan terjadinya perpecahan tabung magnetik.

4. ANALISA DATA

Gambar 4.1a adalah salah satu contoh kejadian flare pada tanggal 17 Juni 1991 ditepi barat piringan matahari yang mempunyai lintasan paling kompleks. Sedangkan gambar 4.1b me-

rupakan contoh lintasan plasma flare tepi yang lebih sederhana.

Perhitungan lintasan parabola di mulai dari $t = 9$ menit. Pada saat ini materi flare mulai meninggalkan tabung medan magnet. Setelah mencapai ketinggian maksimum, materi flare kembali turun dan terperangkap dalam tabung kembali pada $t = 20$ menit. Saat jatuh di tabung materi sempat terperangkap beberapa menit di tabung pertama (paling atas). Karena tabung magnetik tidak mampu lagi menjaga kestabilan maka materi terlepas kembali dan jatuh pada tabung dibawahnya, dan demikian pula seterusnya.

Pola perambatan flare dalam bentuk tiga dimensi kurang lebih sebagai berikut :

Konfigurasi tabung medan magnet pada gambar 4.2 mewakili peristiwa flare tanggal 24 September 1991, 10 Desember 1991 dan Maret 1992. Materi yang telah mencapai tinggi maksimum kembali turun ke permukaan karena gaya gravitasi matahari. Pada saat jatuh tersebut materi flare terperangkap pada tabung medan magnet dan terbawa aliran materi yang mempunyai energi lebih stabil. Adapun konfigurasi tabung magnetik lain yang menggambarkan kejadian flare tanggal 4 Januari 1992 dan 18 Juli 1992 (A) terdapat dua tabung medan magnet yang bersimpangan dan berdekatan.

Gambar 4.3a adalah ilustrasi perjalanan titik materi flare yang diawali dari tabung 1 dan saat jatuh, masuk tabung 1 kemudian berpindah ke tabung nomor 2. Proses perpindahan materi ke tabung lainnya disebabkan tabung 1 tidak mampu untuk mempertahankan

kestabilan medan magnetnya dengan tambahan materi dari luar. Pada tabung 2 materi sempat tertahan beberapa saat dengan ketinggian yang hampir sama dan selanjutnya mengikuti arus medan magnet yang tetap stabil. Pada gambar 4.3b mempunyai perbedaan dalam hal berulangnya semburan flare pada gelombang kedua, di mana tinggi puncak kedua lebih rendah dibanding puncak pertama. Di sini diberikan tiga alasan untuk menerangkan kasus ini.

Pertama, sebagai akibat datangnya materi flare yang jatuh dan terperangkap pada tabung 2 menyebabkan tabung 2 labil. Tambahan energi ini akan membangkitkan aktivitas energi yang terkurung dalam tabung medan magnet 2 sampai terjadi flare kedua.

Kedua, ada satu persimpangan tabung medan magnet pada titik tertentu, sehingga plasma terperangkap kembali pada tabung magnet lain di mana pada tabung kedua ini sedang pada tahap peningkatan aktivitasnya dan ikut terbawa naik menjadi flare kedua.

Ketiga, karena faktor kesalahan dalam pengukuran ketinggian flare, seolah-olah tabung magnetik terangkat kembali. Kemungkinan lain adalah memang tidak ada perpindahan materi flare melainkan karena tabung medan magnet lainnya juga mengalami flare. Sedangkan yang teramati secara vertikal mungkin menunjukkan lokasi semburan yang sama. Kejadian semacam ini sering kita amati pada flare di tengah piringan matahari dengan penampakan maksimumnya berulang sampai tiga kali pada satu daerah sunspot.

Pada gambar 4.4a, diasumsikan satu tabung magnetik besar pecah menjadi beberapa tabung magnetik kecil setelah flare. Peristiwa ini bila diproyeksikan pada permukaan fotosfer terlihat sebagai peristiwa pecahnya spot besar (penumbra) menjadi spot-spot kecil. Pada gambar 4.4b, diasumsikan flare timbul dari tabung 1, dan saat kembali jatuh materi tertahan beberapa saat di tabung 2. Karena ketidakmampuan tabung 2 untuk tetap mempertahankan materi maka selanjutnya masuk ke tabung 3.

4.1 Hukum Kekekalan Energi

Untuk mengkaji secara fisis tentang perambatan dinamika tabung medan magnet flare tepi maka akan lebih mudah bila digunakan hukum Kekekalan Energi, pada ke tiga fasa. Berdasarkan pola lintasan materi flare yang cenderung menunjukkan bentuk parabola, maka hukum ini hanya diberlakukan pada fasa kedua (lintasan parabolik). Dengan memberikan batasan bahwa energi yang terkandung dalam plasma bersifat nontermal maka pengaruh perubahan temperatur terhadap ketinggian dapat diabaikan. Analisis ini diterapkan pada masing-masing flare tepi yang mempunyai bentuk lintasan berbeda-beda. Pemakaian hukum kekekalan energi diharapkan mampu menerangkan kondisi fisis setiap flare.

Energi total merupakan penjumlahan energi kinetik dan potensial di setiap titik. Pemunculan energi ledakan berasal dalam medan magnet di kromosfer dan korona bawah (Wolfgang, 1987) :

Energi dititik awal = Energi di setiap titik

$$\frac{mV_o^2}{2} = \frac{mV^2}{2} + mgh \quad \dots(4-1)$$

Dalam memecahkan persamaan (4-1) diperlukan asumsi-asumsi yang dapat membantu dalam membuktikan berlakunya hukum kekekalan energi, tanpa mengurangi arti keberadaan variabel dalam kondisi dasar di matahari. Maka dalam analisis ini diasumsikan bahwa :

1. Titik-titik massa materi tertinggi yang dilontarkan di setiap waktu dianggap konstan ($m = \text{tetap}$).
2. Konstanta gravitasi terhadap ketinggian dianggap konstan, ($g = \text{tetap}$).
3. Perhitungan yang menyangkut berbagai variabel relativistik ditiadakan

Dengan demikian persamaan di atas dapat disederhanakan menjadi :

$$V_o^2 = V^2 + 2gh \quad \dots(4-2)$$

dengan $V^2 = (dh/dt)^2$ maka,

$$\frac{dh}{dt} = \pm \{ V_o^2 + 2gh \}^{1/2} \quad \dots(4-3)$$

Persamaan (4-3) diintegrasikan dengan batas integrasi $h - h_0$ dan $t - t_0$, diperoleh bentuk umum persamaan polinom derajat dua (parabola) :

$$h(t) = At^2 + Bt + C \quad \dots(4-4)$$

dengan :

$$A = -(\gamma^2)$$

$$B = 2\gamma(\beta - \tau t_o)$$

$$C = -(\beta^2 - \beta\gamma t_o + \tau^2 t_o^2 - \alpha)$$

Sebuah fungsi $f(A,B,C)$ dibangun untuk menentukan besaran A, B dan C sedemikian hingga dari data diperoleh selisih penyimpangan sekecil-kecilnya terhadap $h(t)$ melalui metoda kuadrat terkecil.

4.2 Metoda Kuadrat Terkecil

Alasan pemilihan metode kuadrat terkecil berdasarkan hasil persamaan parabola yang terbentuk dari penurunan persamaan energi di atas, sehingga diperoleh besaran A, B dan C dengan syarat batas $t_0 = 0$.

Hasil analisa data dari 7 flare tepi dapat dilihat pada tabel 4.1 dan 4.2.

Pada tabel 4.2 Qsc merupakan faktor skala dan σ adalah standar deviasi.

5. KESIMPULAN

Pembagian lintasan materi flare dilakukan berdasarkan kesamaan gejala fisis yang dapat diamati dari data 7 flare tepi. Fokus pembahasan pertama ditekankan pada penentuan bentuk lintasan parabolik materi flare, di mana materi mempunyai kecepatan awal (V_0) untuk meninggalkan tabung magnetik. Semakin besar V_0 , tinggi maksimum pelontaran materi semakin tinggi. Berdasarkan hasil perhitungan, kecepatan awal minimum pelontaran materi pada saat impulsive phase adalah sekitar 60 km/detik, yang berarti kecepatan awal di bawahnya tidak akan mampu meninggalkan tabung medan magnet.

Fokus pembahasan kedua adalah munculnya bentuk tangga menurun dalam plot ketinggian materi flare terhadap waktu. Kejadian semacam ini dapat diartikan bahwa ada suatu perpindahan materi flare dari satu tabung medan magnet ke tabung lainnya. Lebih lanjut, lintasan horisontal dalam lintasan tangga memberikan indikasi materi yang terperangkap pada satu tabung magnetik tertahan beberapa saat, kemudian jatuh kembali dan masuk ke tabung lain di bawahnya. Jatuh atau lepasnya materi ini disebabkan oleh gaya gravitasi matahari atau karena tabung magnetik tidak mampu menjaga kestabilan akibat bertambahnya materi flare. Hasil di atas memberikan bukti tentang mekanisme flare, bahwa flare cenderung disertai perpecahan tabung medan magnet atau bertambahnya jumlah sunspot di sekitar daerah flare. Hal ini juga dikonfirmasi oleh Anwar et. al. (1993) yang telah menganalisa data flare satelit Yohkoh.

Melalui pendekatan hukum kekekalan energi, kita dapat melakukan perhitungan analitis persamaan gerak flare tepi. Disamping itu standar deviasi yang didapatkan dalam perhitungan cukup memberikan keyakinan bahwa asumsi fasa kedua (lintasan parabolik) adalah yang paling sesuai. Hasil ini masih perlu disempurnakan dengan mengabil besaran skala untuk mengoreksi parameter-parameter yang bersesuaian dengan kondisi asalnya yaitu atmosfer matahari.

Ucapan terima kasih.

Telaah flare tepi ini telah menggunakan data H-alpha dari Stasiun Pengamatan Matahari. Tanpa kerjasama tim yang sungguh-sungguh sulit kiranya menghasilkan data berkualitas dalam kurun waktu cukup lama. Karena itu kami mengucapkan terima kasih kepada staf Watukosek, Drs. Sudardji, Sodikin, Nuraeni dan Marlan atas partisipasi mereka.

DAFTAR PUSTAKA

1. Anwar, B. et al., 1993. *Rapid Sunspot Motions During a Major Solar Flare*. Solar Physics 147, 287.
2. Bruzek, A. and Durrant, C.J. (19..). *Illustrated Glossary for Solar and Terrestrial Physics*. D. Reidel Publishing Co., Holland, USA.
3. Colgate, S.A., 1988. *Relationship Between High Energy Physical Phenomena on the Sun and in Astrophysics*. Solar Physics, 118,1
4. Low, B.C., 1981. *Eruptive Solar Magnetic Fields*. The Astrophysical Journal, 251, 352.
5. Sakurai, T, 1989. *Magnetic Equilibria and Instabilities*. Solar Physics, 121, 347-360.

6. Sturrock, P.A., 1967. *Solar Flare and Magnetic Topology*. *Solar Physics*, 193, 13-20.
7. Walker, ABC Jr, 1988. *Multispectral Observations Complementary of the Study of High Energy Solar Phenomena*. *Solar Physics*, 118, 209.
8. Zwingman, W., 1987. *Theoretical Study of onset Conditions for Solar Eruptive Process*. *Solar Physics*, 111, 309-406.

--- o0o ---

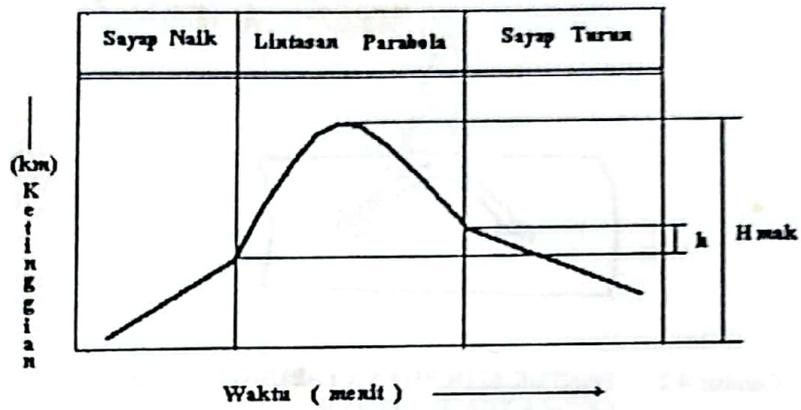
Tabel 4.1 : HASIL PERHITUNGAN KECEPATAN FLARE

Flare	V_0 (km/det)	Δh (km)	h_{mak} (km)	h_{min} (km)
17-06-91	114.8	41 760.0	90 480.0	23 200.0
24-09-91	117.5	40 600.0	81 200.0	31 900.0
10-12-91	87.4	19 140.0	46 980.0	12 760.0
04-01-92	55.6	580.0	20 880.0	10 440.0
01-03-92	68.5	5 800.0	30 000.0	18 560.0
18-07-92a	95.7	32 480.0	52 780.0	5 220.0
18-07-92b	56.7	3 480.0	23 200.0	9 280.0

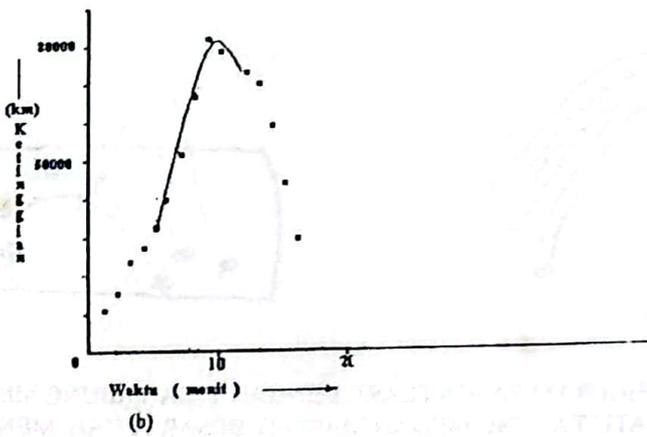
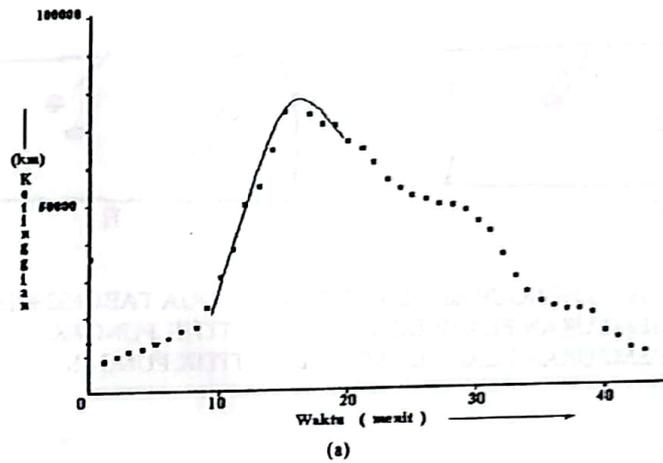
Tabel 4.2 : HASIL PERHITUNGAN DENGAN METODA KUADRAT TERKECIL

Flare	Posisi	No Klas sunspot	A	B	C	Q_{sc}	σ
17-06-91	87W 14S	0500D	-0.169	5.649	-34.207	1.489	3×10^{-2}
24-09-91	88W 12S	0931D	-0.236	5.237	-15.418	1.455	13×10^{-2}
10-12-91	87W 08S	1227C	-0.095	2.627	-10.695	1.053	4×10^{-2}
04-01-92	85W 15S	1336E	-0.066	1.150	-1.644	1.808	2×10^{-2}
01-03-92	82W 03S	0262H	-0.229	2.582	-2.618	1.958	5×10^{-2}
18-07-92a	86W 13S	1457F	-0.094	2.451	-6.984	1.370	3×10^{-2}
18-07-92b	90W12S	1457F	-0.081	1.386	-2.792	1.395	5×10^{-2}

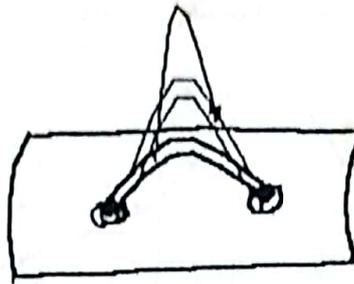
Keterangan : Q_{sc} = faktor skala
 σ = faktor deviasi.



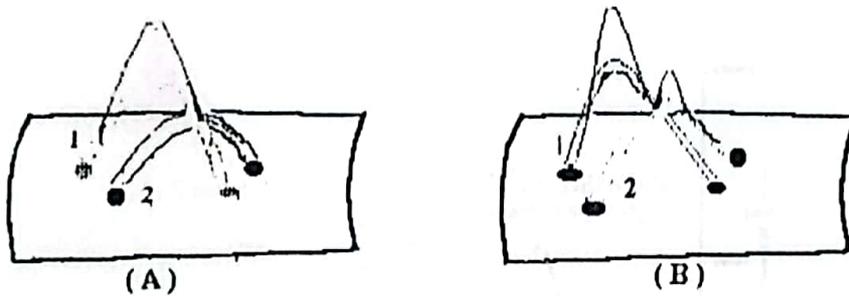
Gambar 3.1 : LINTASAN PLASMA FLARE TERHADAP WAKTU DALAM TIGA FASA



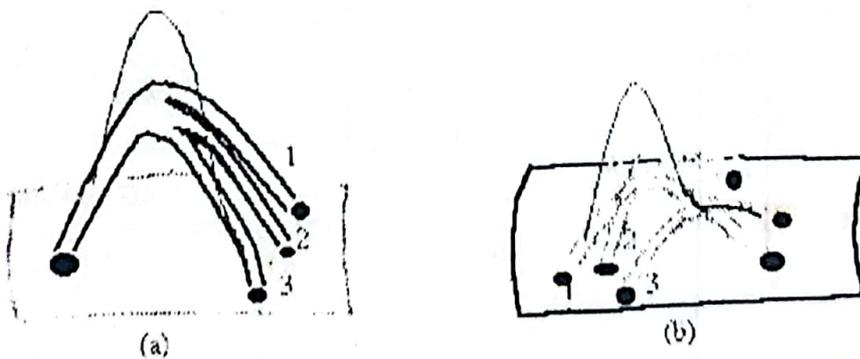
Gambar 4.1 : (a). LINTASAN FLARE PADA TANGGAL 17 JUNI 1991
 (b). LINTASAN FLARE PADA TANGGAL 24 SEPTEMBER 1991



Gambar 4.2 : BENTUK SEDERHANA TABUNG MAGNETIK KETIKA TERJADI FLARE



Gambar 4.3 : ASUMSI KONFIGURASI FLARE DENGAN DUA TABUNG MEDAN MAGNET
 (A) SEMBURAN FLARE DENGAN SATU TITIK PUNCAK.
 (B) SEMBURAN FLARE DENGAN DUA TITIK PUNCAK.



Gambar 4.4 : KONFIGURASI PASCA FLARE DENGAN TIGA TABUNG MEDAN MAGNET
 (A) SATU TABUNG MEDAN MAGNET BESAR PECAH MENJADI BEBERAPA TABUNG MEDAN MAGNET KECIL.
 (B) BEBERAPA TABUNG MEDAN MAGNET TELAH ADA SEBELUM TERJADI FLARE, ATAU MUNCUL TABUNG MEDAN MAGNET BARU SETELAH TERJADI FLARE.