

PRAKIRAAN ENERGI KINETIK LONTARAN MASSA KORONA DARI GELOMBANG KEJUT DAN DAERAH AKTIF MATAHARI

SURATNO

*Bidang Matahari dan Antariksa,
Pusat Pemanfaatan Sains Antariksa – LAPAN
e-mail: suratno@bdg.lapan.go.id*

Abstrak. Energi kinetik lontaran massa korona (*Coronal Mass Ejection/CME*) dapat diprakirakan dengan cara mengolah data semburan radio tipe II dan area daerah aktif matahari. Dengan menggunakan data kejadian CME pada rentang waktu tahun 2001 sampai dengan 2007 (Juni) antara massa (m) dan *angular width* (Ω) daerah aktif matahari, diperoleh hubungan menurut hukum pangkat berbentuk dengan koefisien korelasi sebesar 0.53. Kebenaran asosiasi tersebut didukung oleh data ketika terjadi aktivitas matahari ekstrim Oktober - Nopember 2003 yang memiliki koefisien korelasi yang menyakinkan sebesar 0.83. Hubungan antara kecepatan gelombang kejut (*shock wave/ Vs*) dan kecepatan CME (V_{cme}) memiliki koefisien korelasi sebesar 0.64. Dengan demikian dapat diprakirakan besar energi kinetik CME yang dinyatakan dalam V_s dan Ω . Kecepatan dan waktu tempuh muka gelombang kejut (*shock front*) sebagai sumber gangguan dan prakiraan besar energi kinetiknya, dapat digunakan sebagai prakiraan atau peringatan dini kemungkinan terjadinya anomali atmosfer atas bumi.

Abstract. The kinetic energy of coronal mass ejection (CME) can be estimated using the solar radio burst and solar active regions data. Masses (m) and angular widths (Ω) obtained from CMEs occurrences in the 2001-2007 (June) period are used to get the power law correlation with the coefficient correlation 0.53. This association is confirmed in the period of extreme solar activities in October-November 2003, which has significant coefficient correlation 0.83. In this period, the correlation of shock wave speed and CME speed have coefficient correlation 0.64. Therefore, we can infer the kinetic energy of CME expressed in V_s and Ω . The speed and travel time of the shock front as the source of the disturbances, and the estimation of the value of the kinetic energy can be used to make a prediction or early warning of the upper atmosphere anomaly.

Kata kunci : Solar flare, Type II solar radio bursts, shock wave, Coronal Mass Ejection (CME).

1. Pendahuluan

Fenomena flare terjadi di kromosfer matahari dipicu oleh rekoneksi garis gaya magnet, terindikasi oleh adanya peningkatan mendadak intensitas radiasi matahari pada seluruh spektra elektromagnet dan pancaran partikel energi tinggi (Robinson, et al., 1984). Peningkatan intensitas radiasi elektromagnet yang berperan pada fenomena cuaca antariksa adalah radiasi ultraviolet (UV dan EUV), radiasi sinar X-lunak dan sinar X-keras (*Soft X-ray* dan *Hard X-ray*), serta peningkatan intensitas pada spektra gelombang radio. Peningkatan intensitas pada spektra gelombang radio disebut sebagai semburan radio matahari (*solar radio bursts*). Partikel energi tinggi terlempar dari titik rekoneksi dengan kecepatan $\approx 0.15-0.7 c$ (c : kecepatan cahaya) dengan rata-rata kecepatan $\approx 0.37c$ atau sekitar $\approx 1.1 \times 10^8$ m/s (Fainberg dan Stone, 1970). Disamping partikel energi tinggi tersebut terdapat paket massa gas plasma yang terlontar dari daerah rekoneksi sebagai lontaran

massa korona (*Coronal Mass Ejection/CME*) yang bergerak bersama medan magnet yang terjat (*frozen in*) didalam plasma. *CME* terlontar keluar dari matahari dengan kelajuan sekitar 2000 km/detik, namun dalam penjalarannya akan menurun sehingga menjadi hanya beberapa ratus kilometer per detik. Pada ketinggian 10 sampai 40 jejari matahari, kelajuan muka gelombang kejut berubah dari ≈ 1200 km/detik sampai ≈ 250 km/detik, lebih spesifik dilaporkan bahwa kelajuan gelombang tersebut sebesar 834 km/detik (Robinson et al. 1984), bahkan data dari LASCO menyebutkan kelajuan *CME* dibawah 100 km/detik. Proses rekoneksi garis gaya magnet di kromosfer atau korona bawah matahari yang merupakan pemicu awal terjadinya flare juga menimbulkan adanya gelombang kejut dengan muka gelombang kejut (*shock front*) menjalar ke ruang antar planet. Terdapat dua fenomena yang mekanismenya dipicu oleh lewatnya muka gelombang kejut tersebut yaitu *CME* dan semburan (*burst*) radio tipe II. Kedua fenomena ini terdapat keterkaitan yang erat. Gopalswamy et al. (2008) juga mengemukakan bahwa semburan radio tipe II pada gelombang meter, dekameter dan hektometer menandakan adanya *shock* didekat matahari dari 0.5 sampai beberapa jejari matahari.

Semburan radio tipe II Mekanisme terjadi melalui proses plasma radiasi yaitu lewatnya partikel bermuatan (elektron) berenergi tinggi dan atau lewatnya muka gelombang kejut. Plasma lokal dengan kerapatan elektron tertentu, dirangsang oleh temperatur yang sangat tinggi dan adanya interaksi dengan paket plasma yang bergerak melewatinya, osilasi plasma dikonversikan menjadi dan dipancarkan sebagai gelombang transversal elektromagnet pada frekuensi plasma dan harmoniknya dengan hubungan $f_p = 8,98 \sqrt{n_e}$, f_p dalam Hz dan n_e dalam m^{-3} (Melrose, 1985, White, 2007). Gelombang yang dipancarkan akan terjadi pergeseran frekuensi terhadap waktu pengamatan yang menurun (*negative frequency drifting*) (Nelson dan Melrose, 1985). Newkirk, 1961, mengemukakan tentang kerapatan korona sebagai fungsi dari ketinggian (dikenal dengan model Newkirk) dan banyak digunakan sebagai referensi untuk memprakirakan ketinggian sumber emisi radio pada frekuensi yang terkait. Semburan radio ini dipicu oleh turbulensi gelombang Langmuir yang disebabkan oleh lewatnya elektron dipercepat sebagai akibat dari kejadian flare dan atau lewatnya *CME* (Melrose, 1980, Shanmugaraju et al., 2003). Aguilar-Rodriguez et al. (2005) mengemukakan tentang komponen-komponen semburan radio tipe II yaitu komponen emisi pada gelombang meter (m), dekameter-hektometer (dh) dan gelombang kilometer (km), dan hanya gelombang meter yang dapat diamati dari landas bumi sehingga secara cepat dapat menjadi informasi awal tentang kemungkinan akan terjadinya badai antariksa.

Semburan radio matahari tipe II banyak digunakan sebagai alat diagnosa guna memahami berbagai fenomena fisis lapisan kromosfer dan korona bawah dari atmosfer matahari. Pada gelombang meter, semburan radio tipe II memiliki kaitan dengan *CME* lebih kuat dibandingkan dengan pada pita gelombang dh dan km. Hanya sebagian kecil (yaitu jika terjadi peristiwa flare besar) semburan radio tipe II memiliki kaitan yang kuat baik dengan flare maupun dengan *CME* pada seluruh pita gelombang dari gelombang meter sampai kilometer (Cliver et al., 1999, Gopalswamy et al., 2005, Claßen & Aurass, 2002).

Didasarkan atas pemahaman bahwa *CME* terjadi oleh lewatnya muka gelombang kejut, maka antara kecepatan gelombang kejut (V_{shock}) dan kecepatan linier *CME* memiliki korelasi tertentu. V_{shock} diturunkan dari hasil olah data spektra dinamik semburan radio tipe II melalui konversi dari kawasan frekuensi ke kawasan posisi. Dari hasil konversi dan plotting ketinggian versus waktu dapat diturunkan kecepatan gelombang kejut. Karena

kedua fenomena ini dipicu oleh muka gelombang kejut yang sama maka dapat diduga bahwa V_{shock} akan berbanding lurus dengan kecepatan CME.

CME yang merupakan gerakan massa dan memiliki kecepatan maka karakteristik CME juga dapat dinyatakan dengan energi kinetiknya. Namun besarnya massa partikelnya pada gerakan saat melintas pada beberapa jejari matahari bertambah sehingga mencapai nilai yang hampir konstan. Ada beberapa CME yang telah memudar ketika baru mencapai ketinggian beberapa jejari matahari. Besarnya massa dan kecepatan yang linier ini yang digunakan untuk memprakirakan besar energi kinetiknya. Dalam perjalanan ke atmosfer bumi, CME menumpang pada gerakan gelombang kejut (*shock wave*) yang menyeret partikel energi tinggi dan mengandung medan magnet yang kuat. Namun, dalam penjarannya massa gas plasma yang awalnya terkungkung didalam garis gaya medan magnet dapat lepas dari jeratan magnet ketika kecepatan plasma lebih besar dari kecepatan Alfvén (Svestka, 1976, Melrose, 1980). Gopalswamy, et al. (2008), pada karya tulis ilmiahnya tentang keterkaitan antara CME dan semburan radio tipe II serta partikel energi tinggi matahari, menyatakan bahwa ukuran lebar sudut angular (*angular width*, Ω) dimana lokasi massa berada menentukan besar energi kinetik CME. Keterkaitan antara ukuran sudut dan massa menurut hubungan $\log M = 12.6 + 1.3 \log \Omega$, sehingga dengan diketahuinya kecepatan CME dapat diprakirakan besar energi kinetiknya. Sementara data dari SOHO/LASCO ditampilkan tabel tentang besar energi kinetik, *angular width* (Ω) dan kecepatan linier dari CME yang saling terkait.

Dengan adanya data pengamatan semburan radio tipe II, maka dapat diturunkan kecepatan dan waktu tempuh muka gelombang kejut sampai di atmosfer bumi. Dengan adanya prakiraan energi kinetik CME, maka dapat dijadikan informasi awal kemungkinan akan terjadinya gangguan atau anomali atmosfer atas bumi. Pada pembahasan ini akan dikemukakan prakiraan energi kinetik CME ($E_k = \frac{1}{2} mv^2$) tanpa terlebih dahulu diketahui massa dan kecepatan CMEnya itu sendiri. Besar massa (m) CME diprakirakan dengan lebar sudut angular daerah aktif yang menghasilkan CME, dan kecepatannya diambil dari kecepatan gelombang kejut (*shock*) yang dapat diturunkan dari spektra dinamik (frekuensi versus waktu) semburan radio matahari tipe II dengan cara mengkonversikannya dari kawasan frekuensi ke kawasan posisi.

2. Data Yang Digunakan

Penelusuran data CME dan semburan radio tipe II adalah dari Januari 2000 sampai dengan Juni 2007, yaitu pada periode menurun aktivitas matahari siklus ke 23. Pemilihan kedua data yang berasosiasi tersebut, Suratno et al. (2008) telah menetapkan kriteria keterkaitannya dengan meninjau kecepatan linier CME terendah 21 km/detik dan tertinggi 3387 km/detik sebagai kondisi ekstrim. Dengan meninjau sistem pengamatan *spectroscopic coronagraph* bahwa CME baru terdeteksi pada ketinggian 2 Rs ($R_s =$ jejari matahari $\approx 6.95 \times 10^5$ km) atau $\approx 1.39 \times 10^6$ km, sementara semburan tipe II sudah bisa muncul pada ketinggian 1.2 Rs (Cho et al., 2005), maka CME dikatakan berasosiasi dengan semburan tipe II bila telah terdeteksi segera atau hampir bersamaan (~ 2.74 menit) dan sekitar 7,5 jam (~ 441.27 menit) setelah waktu awal terdeteksinya semburan tipe II.

Data CME diperoleh dari kompilasi CME CDAW Data Center NASA Goddard Space Flight Center (http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list). Data ini diperoleh dari hasil

pengamatan dengan *Solar and Heliospheric Observatory* (SOHO) dengan misi *Large Angle and Spectrometric Coronagraph* (LASCO). Komponen data CME yang akan dianalisis pada penelitian ini dibatasi pada data *angular width (deg)*, *Linear Speed [km/s]*, *Mass [gram]*, dan *Kinetic Energy[erg]*. Informasi flare dan daerah aktif yang terkait diperoleh secara online dari *Solar Gephysical Data* (SGD).

Data semburan radio matahari tipe II diperoleh dari hasil pengamatan semburan radio pada gelombang meter dikoleksi dan dilaporkan oleh *Solar Geophysical Data* (SGD), dan dapat diperoleh dari situs web <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/SOLAR/>. Koleksi data ini merupakan gabungan hasil pengamatan *Solar Radio Spectrograph* di seluruh observatorium di dunia dan dihimpun oleh *National Geophysical Data Center* (NGDC). Khususnya untuk data semburan radio matahari, informasi datanya antara lain memuat informasi tentang waktu (tanggal, bulan, tahun) kejadian, selang waktu pengamatan, nama observatorium, tipe semburan, waktu awal (*start time*) dan akhir (*end time*) kejadian semburan. Untuk analisis lebih rinci tentang keterkaitannya dengan CME, data semburan radio tipe II banyak diperoleh dari hasil pengamatan *The Green Bank Solar Radio Spectrometer of National Radio Astronomy Observatory, West Virginia* (<http://gbsrbs.nrao.edu/>). Disamping itu ada data yang diperoleh dari hasil pengamatan stasiun Culgoora dan Learmonth - Australia (<http://www.ips.gov.au/>) dan hasil pengamatan radiospektrograf yang pernah dimiliki oleh LAPAN dari Stasiun Pengamat Dirgantara Tanjungsari. Tabel 2.1 adalah data kejadian semburan radio (*bursts*) tipe II dan CME yang saling berasosiasi, merupakan pasangan data terseleksi yang diolah dan dianalisis untuk memperoleh kecepatan *shock* (kolom 5) dan keterkaitannya dengan kecepatan CME.

Tabel 2.1. Data kejadian semburan radio (bursts) tipe II dan CME yang berasosiasi

No.	HH/BB/ TTTT Kejadian	Bursts Tipe II		CME				
		<i>Start Time</i>	<i>End Time</i>	<i>Start Time</i>	<i>Ang. Width (deg)</i>	V_{cme} linier (km/det)	Mass (gram)	Energi Kinetik (erg)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
1	03/03/2000	2:12:00	2:30:00	02:30:05	198	841	7.0e+15	2.5e+31
2	05/03/2000	22:20:00	22:33:00	23:06:06	79	673	4.4e+15	9.9e+30
3	18/03/2000	21:01:00	21:10:00	21:30:08	165	492	----	----
4	18/03/2000	21:55:00	22:01:00	23:06:05	83	559	----	----
5	27/03/2000	6:47:00	7:05:00	07:31:20	90	487	4.3e+15	5.1e+30
6	23/06/2000	4:12:00	4:38:00	05:54:06	78	535	5.1e+15	7.3e+30
7	25/07/2000	2:47:00	3:01:00	03:30:05	360	528	1.6e+15	2.3e+30
8	09/09/2000	8:37:00	8:55:00	08:56:59	180	554	7.0e+15	1.1e+31
9	12/02/2001	20:30:00	20:37:00	21:08:05	112	463	1.6e+15	1.7e+30
10	10/03/2001	4:11:00	4:19:00	04:26:05	81	819	1.7e+15	5.7e+30
11	03/01/2002	2:19:00	2:30:00	04:06:05	43	371	----	----
12	25/01/2002	2:25:00	2:45:00	03:30:05	40	273	5.2e+14	1.2e+29
13	23/01/2003	4:32:00	4:44:00	05:30:05	76	284	4.8e+14	1.3e+29
14	12/02/2003	1:51:00	2:01:00	02:30:05	118	355	5.4e+15	3.4e+30
15	02/06/2004	23:08:00	23:19:00	23:15:44	136	1102	2.6e+15	1.6e+31
16	03/06/2004	16:24:00	16:40:00	16:50:05	179	1226	----	----

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
17	20/07/2004	12:35:00	12:48:00	13:31:52	360	710	----	----
18	23/07/2004	16:00:00	16:08:00	16:06:06	360	824	----	----
19	18/08/2004	17:44:00	10:59:00	17:54:05	120	602	2.9e+15	5.2e+30
20	08/12/2004	19:45:00	20:04:00	20:26:05	360	611	----	----
21	29/12/2004	16:26:00	16:32:00	16:45:05	12	607	6.5e+14	1.2e+30
22	01/01/2005	0:29:00	0:49:00	00:54:05	360	832	----	----
23	09/01/2005	8:54:00	9:11:00	09:06:05	164	870	----	----
24	15/01/2005	14:16:54	14:30:30	14:54:05	271	498	----	----
25	20/01/2005	6:44:00	7:00:00	6:54:05	360	882	----	----
26	17/04/2005	21:01:00	21:20:00	21:26:08	108	721	4.0e+15	1.0e+31
27	19/04/2005	21:50:00	22:02:00	22:05:06	360	824	----	----
28	06/05/2005	16:47:00	16:57:00	17:28:31	360	1128	----	----
29	11/05/2005	19:39:30	19:51:30	20:13:08	360	550	----	----
30	13/05/2005	16:41:00	16:52:00	17:12:05	360	1689	----	----
31	14/05/2005	20:46:00	20:59:00	20:56:52	115	786	----	----
32	15/05/2005	22:41:00	22:51:00	23:26:06	179	379	----	----
33	31/05/2005	14:45:00	14:57:00	15:32:10	134	313	----	----
34	03/06/2005	12:05:00	12:22:00	12:32:10	360	1679	----	----
35	22/05/2006	19:59:00	20:03:00	20:54:04	118	448	3.8e+14	3.8e+29
36	19/05/2007	12:50:00	13:10:00	13:24:04	106	958	----	----
37	22/05/2007	14:36:00	14:55:00	16:09:10	108	544	----	----
38	31/12/2007	0:53:00	1:10:00	01:31:40	164	1013	----	----

Keterangan tabel :

- Kolom 1 : Nomor urut kejadian
 Kolom 2 : Hari bulan dan tahun kejadian
 Kolom 3 : Waktu awal kejadian semburan radio matahari tipe II (UT)
 Kolom 4 : Waktu akhir kejadian semburan radio matahari tipe II (UT)
 Kolom 5 : Waktu awal kejadian CME (UT)
 Kolom 6 : *Angular width* daerah kejadian CME dalam satuan derajat
 Kolom 7 : Kecepatan linier CME
 Kolom 8 : Massa CME yang terlempar
 Kolom 9 : Energi kinetik CME dihitung dari kecepatan dan massa (tanda -----, menyatakan bahwa besar massa CME tidak terhitung pada sistem LASCO).

3. Metodologi

Seperti telah dituliskan pada bab pendahuluan bahwa tujuan dari penelitian ini adalah memprakiraan besar energi kinetik CME tanpa terlebih dahulu diketahui massa dan kecepatan CMEnya itu sendiri. Langkah-langkahnya adalah dengan memprakirakan besar massa dari keterkaitannya dengan *angular width* daerah aktif yang menghasilkan CME dan memprakirakan kecepatan CME dari keterkaitannya dengan kecepatan gelombang kejut yang diturunkan dari spektra dinamik semburan radio matahari tipe II.

Kompilasi kejadian CME pada CDAW Data Center memuat antara lain data *angular width* (Ω), kecepatan linier (v), massa (m) dan energi kinetik ($E_k = \frac{1}{2} mv^2$) CME dalam

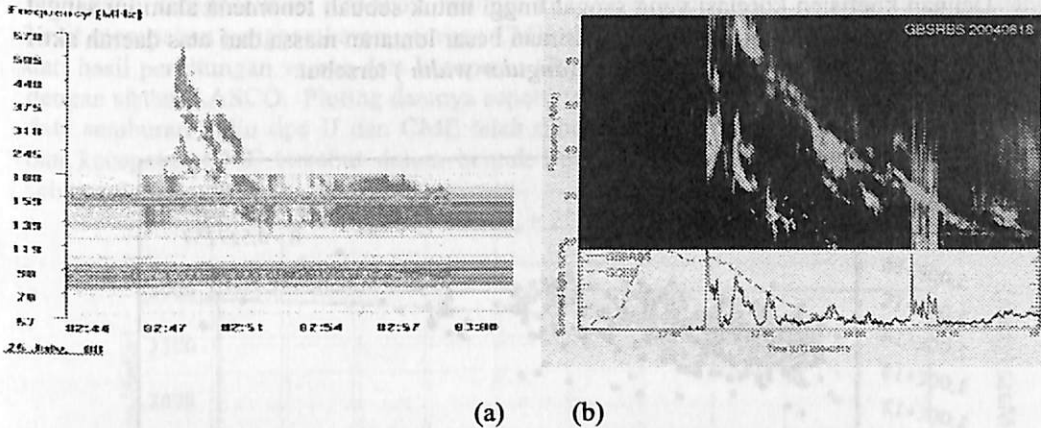
daerah aktif matahari yang terkait. Dengan data yang tersedia perlu dicari keterkaitan antara besar *angular width* dan massa untuk memprakirakan besar massa yang terlontar dari daerah aktif ketika terjadi aktivitas flare. Dengan sangat banyaknya data kejadian CME, maka dapat dilakukan formulasi keterkaitannya dengan mengambil data secara acak. Perlu adanya pembatasan data yaitu pengabaian untuk *angular width* sebesar 360° yaitu untuk CME tipe halo yang tidak terpenuhi untuk penentuan besarnya massa. Gambar 3.1. memperlihatkan *angular width* yang berbeda untuk setiap kejadian CME dan akan memberikan besaran massa yang berbeda pula.



Gambar 3.1. Contoh daerah aktif matahari yang menghasilkan kejadian semburan radio tipe II dan CME. *Angular width* (Ω) memiliki korelasi dengan besar massa CME yang terlempar dari daerah aktif (courtesy of CDAW data Center), garis sudut ditambahkan oleh penulis (rtn).

Langkah berikutnya tentang keterkaitan kecepatan muka gelombang kejut (*shock front*) dengan kecepatan CME. Gambar 3.2. adalah contoh spektra dinamik semburan radio matahari tipe II yang diperoleh dari hasil pengamatan dengan peralatan radiospektrograf. Sebagaimana disebutkan bahwa semburan radio tipe II terjadi melalui proses plasma radiasi yang dipicu oleh lewatnya *shock front*, maka pergeseran frekuensi (df/dt) pada spektra ini akan menggambarkan gerakan plasma atau paket partikel energi tinggi menuju ke ruang antar planet dan merupakan lontaran massa korona (CME). Kecepatan gelombang kejut (V_{shock} selanjutnya penulisan dipendekkan V_s) dapat diturunkan dari hasil konversi pergeseran frekuensi (df/dt) ke pergeseran posisi (dr/dt) menurut formulasi $dr/dt = V_s = -0.21x R^2(1/f df/dt)$. R menyatakan ketinggian sumber semburan radio dalam satuan jejari matahari dihitung dari pusat matahari (Newkirk, 1961, Caroubalos et al., 2004, Cho et al., 2005, Suratno et al., 2008). Pada proses ini, terlebih dahulu dilakukan digitasi data dari data spektra sehingga dapat diproses menurut formulasi tersebut. Data semburan radio tipe II diseleksi yaitu yang berasosiasi dengan kejadian CME sesuai dengan kriteria yang telah ditetapkan. Dari 38 data yang terseleksi dapat diturunkan kecepatan *shock* (V_s), selanjutnya dilakukan perbandingan dengan kecepatan CME untuk memperoleh keterkaitannya.

Dengan langkah-langkah tersebut, maka dengan menggunakan data semburan radio tipe II dan daerah aktif matahari, maka dapat diprakirakan besar energi kinetik kejadian CME yang kemungkinan akan terjadi.



Gambar 3.1. Contoh spektra dinamik kejadian semburan radio tipe II yang diperoleh dari hasil pengamatan (a) stasiun pengamat dirgantara LAPAN Tanjungsari yang terjadi pada 25 Juli 2000 dan data dari (b) The Green Bank Solar Radio Spectrometer of National Radio Astronomy Observatory, West Virginia (courtesy of GBSRBS).

4. Hasil Dan Pembahasan

Langkah pertama dari studi ini adalah melakukan prakiraan besar massa CME dengan meninjau besar *angular width* daerah aktif matahari dan mengkaitkan dengan besar massa CME. Ploting data antara *angular width* dan besar massa CME terlihat pada gambar 4.1, yaitu data kejadian CME pada rentang waktu tahun 2001 sampai dengan 2007 (Juni). Dengan massa CME (m) dinyatakan dalam satuan gram dan *angular width* (Ω) dalam derajat diperoleh hubungan menurut hukum pangkat dengan koefisien korelasi sebesar 0.53, yaitu:

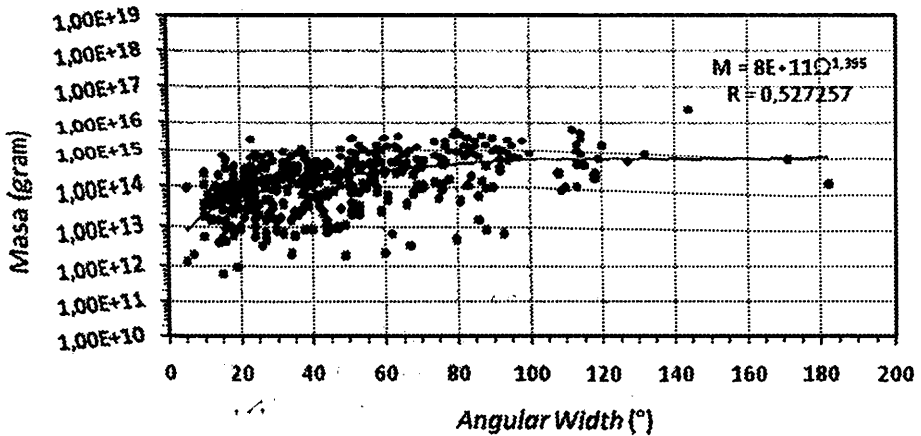
$$m = 8 \times 10^{11} \Omega^{1.395} \tag{4.1}$$

Hasil diatas adalah keterkaitan antara *angular width* dan massa CME yang data kejadiannya diambil secara acak yang merupakan kondisi global untuk setengah siklus aktivitas matahari.

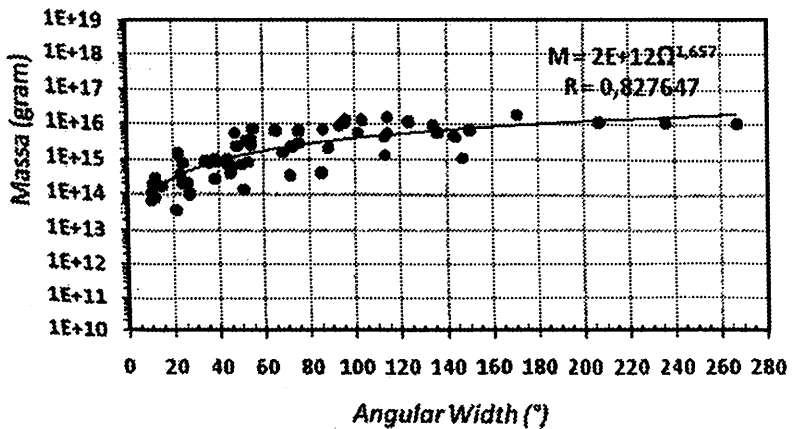
Untuk membandingkannya dengan kondisi ekstrim, pada studi ini akan ditampilkan keterkaitan antara *angular width* dan massa CME untuk kejadian CME pada pertengahan Oktober sampai dengan pertengahan Nopember 2003. Pada perioda ini banyak terjadi aktivitas matahari ekstrim yaitu kejadian-kejadian flare baik flare X ray, $H\alpha$ maupun semburan radio (khususnya semburan radio tipe II) yang mengakibatkan terjadinya badai geomagnet dan badai ionosfer (Gopalswamy et al., 2007). Dalam rentang waktu 18 Oktober 2003 sampai dengan 8 Nopember 2003 terdapat sebanyak 80 data kejadian CME. Gambar 4.2 adalah ploting data keterkaitan antara kedua parameter tersebut dan juga memiliki hubungan menurut hukum pangkat dengan koefisien korelasi yang cukup meyakinkan yaitu sebesar 0.83. Hubungannya menurut formula :

$$m = 2 \times 10^{12} \Omega^{1.657} \quad (4.2)$$

Dengan koefisien korelasi yang sangat tinggi untuk sebuah fenomena alam ini sangat mendukung sebuah pemikiran tentang prakiraan besar lontaran massa dari atas daerah aktif matahari yang didasarkan atas lebar sudut (*angular width*) tersebut.



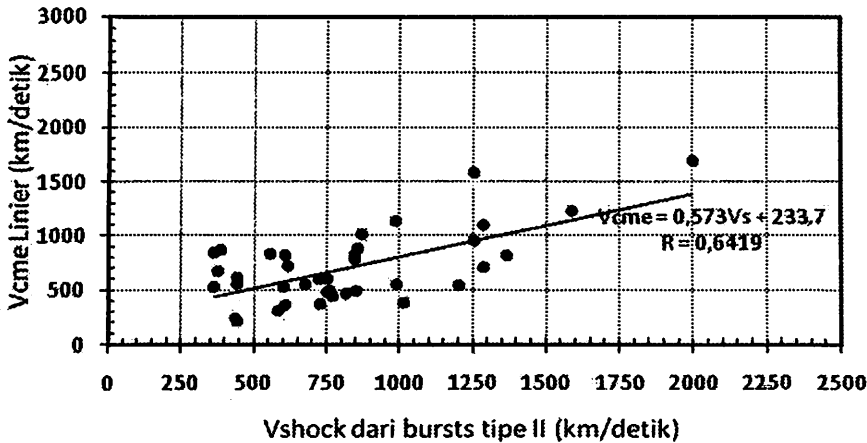
Gambar 4.1. Hubungan antara *angular width* (Ω) dan massa CME dari data yang diambil secara acak kejadian CME selama setengah siklus ke 23 aktivitas matahari dari tahun 2001 sampai dengan Juni 2007.



Gambar 4.2. Hubungan antara *angular width* (Ω) dan massa CME dari data pada kejadian matahari ekstrim Oktober – Nopember 2003.

Langkah berikutnya yaitu olah data spektra dinamik semburan radio tipe II untuk memperoleh informasi tentang penalaran muka gelombang kejut (*shock*). Proses digitasi spektra dan konversi pergeseran frekuensi ke pergeseran posisi menurut formulasi yang ditetapkan menghasilkan informasi tentang kecepatan *shock* (V_s). Gerakan gelombang kejut merupakan penggambaran gerakan CME sehingga dapat diplot kecepatan *shock* (V_s) dari hasil perhitungan versus data kecepatan CME (V_{cme}) yang diperoleh dari hasil deteksi dengan sistem LASCO. Plotting datanya seperti terlihat pada gambar 4.3. Dari 38 pasangan data semburan radio tipe II dan CME telah diperoleh keterkaitan antara kecepatan *shock* dan kecepatan CME tersebut dalam bentuk hubungan linier dengan koefisien korelasi sebesar 0.64, yaitu :

$$V_{cme} = (0.573 V_s + 223.7) \text{ km/detik} \tag{4.3}$$



Gambar 4.3. Hubungan antara kecepatan *shock* dan kecepatan CME dengan koefisien korelasi 0.64.

Langkah akhir dari studi ini adalah penetapan prakiraan besar energi kinetik CME yang kemungkinan akan muncul bila didahului dengan peningkatan daerah aktif dan bila ada kejadian semburan radio tipe II. Pada langkah pertama pada studi ini terdapat hubungan antara massa CME dan *angular width* (persamaan 4.1 dan 4.2), yaitu yang diperoleh dari data global selama setengah perioda aktivitas matahari pada siklus 23 dan data khusus pada kejadian aktivitas matahari ekstrim Oktober Nopember 2003. Pada studi ini digunakan data global yang ditetapkan keterkaitannya dengan pengambilan data secara acak dan dianggap dapat mewakili kondisi secara umum. Dalam hubungan energi kinetik, massa dan kecepatan dengan formulasi $E_k = \frac{1}{2} mv^2$, maka dengan memasukkan persamaan 4.1 dan 4.3 kedalam formulasi ini akan diperoleh prakiraan energi kinetik CME menurut hubungan :

$$E_k = \frac{1}{2} \times 8 \times 10^{11} \Omega^{1.395} \times ((0.573 V_s + 233.7) \times 10^5)^2,$$

atau: $E_k = (1,313316 V_s^2 + 1071.2808 V_s + 218462,76) \times 10^{21} \Omega^{1.395} \text{ erg} \tag{4.4}$
 dengan V_s : kecepatan *shock* (km/detik) dan Ω : *angular width* (°).

Prakiraan besar energi kinetik tersebut adalah perhitungan ketika muka gelombang kejut masih berada di ketinggian korona bawah pada ketinggian 0.5 – 1 R_s (R_s : jejari

matahari). Dalam perjalanannya muka gelombang kejut tersebut dapat mengalami perubahan kecepatan karena percepatan atau perlambatan. Dengan menggunakan formulasi (4.4) ini, dapat diterapkan untuk memprakirakan besar energi kinetik CME yang terjadi di atas daerah aktif yang telah tersedia data besar *angular width* (Ω) dan ada keterkaitan dengan data semburan radio tipe II. Contoh hasil perhitungan (E_{pra}) dibanding kan dengan energi kinetik hasil pengamatan (E_{png}) seperti tertera pada tabel 4.1. Energi kinetik CME pada sistem LASCO dihitung secara rata-rata sampai pada ketinggian 20 jejari matahari (R_s).

Hasil perbandingan antara energi kinetik CME pengamatan (E_{png}) dan energi kinetik prakiraan (E_{pra}) bervariasi dari terendah 0.27 sampai dengan tertinggi 21.47 kali. Terlihat bahwa terdapat 3 angka perbandingan yang lebih dari 10 kali, 1 angka mendekati 10 kali, yang lainnya berada dibawah nilai 10 kali dan 3 angka dibawah dilai kurang dari 0.5 kali. Jika diambil mediannya diperoleh energi pengamatan kira-kira 4 kali lebih besar dari energi

kinetik prakiraan. Faktor yang memungkinkan perbedaan ini adalah adanya perubahan kecepatan karena adanya percepatan atau perlambatan CME ketika telah bergerak melalui korona atau ruang antar planet dan kemungkinan penentuan lebar angular width dalam penghitungan besar massa CME. Perbedaan contoh hasil tersebut menjadi koreksi dalam prakiraan besar energi kinetik CME yang kemungkinan timbul ketika terjadi fenomena aktivitas matahari.

Terkait dengan area daerah aktif matahari yang menghasilkan fenomena flare, gerakan dan laju CME yang terjadi, Gopalswamy (2005) membahasnya dengan mengkaitkan antara luas area daerah aktif dan intensitas flare X ray, dan antara luas area daerah aktif dan kecepatan CME. Pada penelitiannya mengungkapkan bahwa dari 55 kejadian flare

Tabel 4.1. Perbandingan antara energi kinetik CME hasil pengamatan sistem LASCO dan hasil prakiraan

No.	Energi kinetik (E_{png}) CME LASCO (erg)	Energi kinetik Prakiraan (E_{pra}) (erg)	E_{png}/E_{pra}
1	2,5E+31	1,25E+30	20,07
2	9,9E+30	5,63E+29	17,60
3	5,1E+30	9,40E+29	5,42
4	7,3E+30	3,4E+29	21,47
5	2,3E+30	4,92E+30	0,47
6	1,1E+31	1,33E+30	8,25
7	1,7E+30	1,42E+30	1,20
8	5,7E+30	9,45E+29	6,03
9	1,2E+29	1,63E+29	0,74
10	1,3E+29	3,95E+29	0,33
11	3,4E+30	1,05E+30	3,24
12	1,6E+31	3,57E+30	4,48
13	5,2E+30	1,34E+30	3,88
14	1,2E+29	5,64E+28	2,13
15	1E+31	9,47E+29	10,56
16	3,8E+29	1,42E+30	0,27

diperoleh hubungan antara intensitas flare (X) dan luas (A) area daerah aktif (dalam satuan *milion hemisphere*) memenuhi : $\log X = -8.34 + 1.50 \log A$, dengan koefisien korelasi 0.64. Antara kecepatan CME (v) dan luas area daerah aktif memenuhi hubungan : $\log v = 2.54 + 0.22 \log A$, dengan koefisien korelasi 0.37. Keterkaitan ini memberikan dukungan

tentang pentingnya peran luas daerah aktif dalam memprakirakan puncak intensitas flare X ray atau energi yang terjadi dan keterkaitannya terhadap kecepatan CME yang juga menggambarkan energi kinetiknya.

CME merupakan pelepasan massa gas yang berlangsung secara mendadak didalamnya terjatoh medan magnet dan secara bersamaan bergerak menuju ke ruang antar planet. Fenomena ini didahului dengan kejadian flare yang nampak jelas bila diamati baik pada gelombang $H\alpha$ ($\lambda=6263 \text{ \AA}$) dan $X\text{-ray}$ ($\lambda=1 - 8 \text{ \AA}$) maupun semburan radio matahari. Semburan radio yang erat terkait fenomena tersebut adalah semburan tipe II, terjadi melalui proses plasma radiasi yang dipicu oleh lewatnya gelombang kejut. Radiasi elektromagnet dari peristiwa flare baik yang dideteksi dengan citra *white light*, $H\alpha$ dan $X\text{ ray}$ maupun radiasi gelombang radio dapat dideteksi segera (~ 8.3 menit) setelah kejadian flare. Muka gelombang kejut (*shock front*) akan mendorong dan atau menyeret paket elektron dan berinteraksi dengan plasma setempat di korona. Pada umumnya adanya flare kuat akan diikuti oleh semburan tipe II dan CME (Wang, et al., 2005). Semburan radio matahari tipe II merupakan indikasi adanya bentuk gerakan magnetohidrodinamik (*mode Magnetohydrodynamic shock*) adalah gerakan plasma yang mengandung medan magnet di korona matahari dan media antar planet. Emisi radio terjadi sebagai hasil dari proses plasma dengan energi rendah ($\sim 10 \text{ keV}$) elektron yang dipercepat pada muka gelombang kejut (*shock front*). Asosiasi yang erat antara tipe II dan CME merupakan indikasi bahwa CME mengontrol *shock front* oleh gerakan super Alfvénic nya di korona dan media antar planet. Beberapa *shock* tersebut memiliki area yang panjang di *heliosphere* dan dapat dideteksi secara langsung oleh instrumen *spacecraft* seperti LASCO (Gopalswamy et al. 2005, Cliver et al. 2004). Kepekaan yang tinggi dan data yang baik dan seragam dari SOHO/LASCO menghasilkan lebih dari 8000 data CME sejak diluncurkan sampai akhir tahun 2003. Dari 8000 data tersebut hanya 25 yang memiliki kecepatan $>2000 \text{ km/s}$ dan tidak ada kecepatan yang $>3000 \text{ km/s}$. Ini berarti bahwa maksimum kecepatan CME tidak akan lebih dari 3000 km/s . Selanjutnya, Gopalswamy et al. (2005) juga menjelaskan bahwa CME memiliki daya oleh energi magnet yang dibangun di daerah aktif dan batas kecepatan CME tertinggi menyatakan energi bebas maksimum yang dapat dikeluarkan oleh daerah aktif. Energi bebas dalam medan magnet perlu diestimasi dari distribusi arus di daerah aktif korona. Untuk mengestimasi besar energinya, salah satunya dapat diandaikan bahwa energi bebas adalah bagian energi di medan potensial. Energi di dalam medan potensial tergantung pada luas dan kuat medan magnet daerah aktif. Pengukuran yang baik dari luas daerah aktif tersebut adalah area yang dilaporkan di SGD.

Dalam perjalanan ke atmosfer Bumi, CME yang kuat (berenergi tinggi) dan bila didukung dengan arah medan magnet interplanet yaitu bila memiliki arah selatan atau berlawanan dengan medan magnet bumi (B_z negatif) akan berakibat terhadap kemungkinan timbulnya badai magnet bumi (*geomagnetic storm*). Badai magnet ini ditandai dengan penurunan indeks Dst (negatif) besar dan dapat berakibat terjadinya badai ionosfer. Lebih lanjut bisa terjadi gangguan pada lapisan atas ionosfer (foF_2) yang akan berdampak negatif pada komunikasi radio HF (Pohjolainen dan Lehtinen, 2006, Suratno dan Buldan Muslim, 2008).

Secara fisik dapat diungkapkan kaitan antara semburan radio tipe II dengan gejala-gejala lain di angkasa matahari seperti peristiwa CME dan ledakan flare, misalnya mencari selisih waktu antara semburan tipe II dengan peristiwa CME dan flare, kaitan kecepatan CME dan kecepatan *shock* (McKenna-Lawlor et al. 2002, Suratno, et al., 2008) dan pada

karya ilmiah ini tentang energi kinetik lontaran massa korona. Juga waktu penjalaran muka gelombang kejut atau CME dari korona matahari sampai atmosfer bumi. Pada penelusuran data CME dari tahun 2000 sampai dengan bulan Juni 2007, Suratno et al.(2008) mengungkapkan dari 9980 kejadian CME hanya satu data kejadian yang memiliki kecepatan diatas 3000 km/detik (tepatnya 3387 km/detik) yang terjadi pada 10 Nopember 2004 pukul 2:26:05 dengan tipe halo.

Waktu tempuh muka gelombang kejut atau CME yang mengemudi *shock* dalam arah matahari bumi dapat diturunkan dari kecepatan dan jarak dengan menganggap jarak matahari bumi 150.000.000 kilometer. Dari 38 data kejadian semburan radio tipe II dapat diturunkan kecepatan *shock* bervariasi dari 362 km/detik sampai dengan 1998 km/detik. Dengan demikian gelombang kejut yang juga identik dengan CME ini dapat mencapai atmosfer bumi dalam waktu 20.8 jam sampai 115 jam (atau 0.9 – 4.8 hari). Sementara, jika diturunkan dari kecepatan CME linier hasil pengamatan LASCO diperoleh waktu mencapai bumi dalam rentang waktu 1- 6 hari dari waktu awal terdeteksinya (*onset*) CME. Hasil ini tidak jauh berbeda dengan hasil studi oleh Gopalswamy, et al. (2007) yang melaporkan tentang geoeffective menyangkut asosiasi CME tipe halo. Disebutkan bahwa dari sebanyak 378 data (1996-2005) waktu tempuh terjadi dalam selang waktu 1–5 hari sesudah *onset* CME.

Terkait dengan penelitian ini, waktu tempuh muka gelombang kejut yang dapat mencapai orde waktu 0.9 hari sampai 4.8 hari tersebut sangat penting untuk prakiraan kemungkinan akan terjadinya gangguan atmosfer atas bumi khususnya kemungkinan akan terjadinya badai magnet bumi, dalam rangka peringatan dini pada sistem komunikasi radio dan navigasi.

5. Kesimpulan

Energi kinetik CME ($E_k = \frac{1}{2} mv^2$) dapat diprakirakan dengan cara mengolah data semburan radio matahari tipe II dan lebar sudut angular (*angular width*) daerah aktif. Tahapannya adalah mencari hubungan antara *angular width* dengan massa, menentukan kecepatan *shock* dari spektra dinamik semburan radio tipe II, diakhiri dengan menghitung prakiraan besar energi kinetiknya.

Secara global, dengan menggunakan data kejadian CME pada rentang waktu tahun 2001 sampai dengan 2007 (Juni) antara massa dan *angular width* diperoleh hubungan menurut hukum pangkat berbentuk $m = 8 \times 10^{11} \Omega^{1.395}$ dengan koefisien korelasi sebesar 0.53. Adanya asosiasi ini didukung kebenarannya apabila diterapkan pada rentang waktu 18 Oktober 2003 sampai dengan 8 Nopember 2003 ketika terjadi aktivitas matahari ekstrim. Untuk kejadian ekstrim ini hubungan antara massa dan *angular width* menurut formulasi $m = 2 \times 10^{12} \Omega^{1.657}$ dengan koefisien korelasi yang cukup menyakinkan yaitu sebesar 0.83. Gerakan gelombang kejut (*shock*) yang merupakan penggambaran gerakan CME diperoleh keterkaitan antara kecepatan *shock* (V_s) dan kecepatan CME (V_{cme}) dalam bentuk hubungan linier dengan koefisien korelasi sebesar 0.64, yaitu $V_{cme} = (0.573 V_s + 223.7)$ km/detik. Dengan demikian dapat diprakirakan besar energi kinetik CME dengan memasukkan massa dan kecepatan dalam formulasi $E_k = \frac{1}{2} mv^2$, diperoleh hubungan :

$$E_k = (1.313316 V_s^2 + 1071.2808 V_s + 218462.76) \times 10^{21} \Omega^{1.395} \text{ erg, dengan } V_s :$$
 kecepatan *shock* dalam km/detik, dan Ω : *angular width* dalam derajat.

Kejadian semburan radio tipe II dalam bentuk spektra dinamik dapat dideteksi segera setelah munculnya kejadian flare, sementara area daerah aktif matahari diketahui dari pengamatan secara optis pada citra sinar tampak (*white light*) dan atau pada gelombang *hydrogen alpha* (*H α*). Dengan mengetahui kecepatan dan waktu tempuh muka gelombang kejut sebagai sumber gangguan yang diturunkan dari spektra dinamik semburan radio tipe II dan prakiraan besar energi kinetik dari area daerah aktif, maka dapat digunakan sebagai prakiraan atau sistem peringatan dini kemungkinan akan terjadinya gangguan dan atau anomali atmosfer atas bumi.

Daftar Pustaka :

- Aguilar-Rodriguez E., N. Gopalswamy, R. MacDowall, S. Yashiro, and M. L. Kaiser, 2005, *A Universal Characteristic of Type II Radio Bursts*, *Journal of Geophysical Research*, **110**, A12S08, doi:10.1029/2005JA011171.
- Caroubalos, C., A. Hillaris, C. Bouratzis, C.E. Alisandrakis, P. Preka-papadema, J. Polygiannakis, P. Tsitsipis, A. Kontogeorgos, X. Moussas, J.L. Bougeret, G. Dumas, and C. Perche, 2004, *Solar Type II and Type IV radio Bursts Observed during 1998-2000 with the ARTEMIS-IV Radiospectrograph*, *Astronomy & Astrophysics* **413**, 1125-1133.
- Cho K. S., Y.J. Moon, M. Dryer, A. Shanmugaraju, C.D. Fry, Y.H. Kim, S.C. Bong, and Y. D. Park, 2005, *Examination of Type II Origin with SOHO/LASCO Observations*, *Journal of Geophysical Research*, **110**, ISSN 0148-0227.
- Cliver E.W., D.F. Webb, R.A. Howard, 1999, *On the Origin of Solar Metric Type II Bursts*, *Solar Physics*, **187**, 89-114.
- Fainberg J. and R.G. Stone, 1970, *Type II Solar Radio Burst Storm observed at Low Frequencies*, *Solar Physics*, **15**, 433-445.
- Glaßen, H.T & H. Aurass, 2002, *On the association between type II radio burts and CMEs*, *Astronomy & Astrophysics* **384**, 1098-1106
- Gopalswamy N., S. Yashiro, and S. Akiyama, 2007, *Geoeffectiveness of Halo Coronal Mass Ejections*, *Journal of Geophysical Research*, **112**, A06112, doi:10.1029/2006JA012149.
- Gopalswamy N., S. Yashiro, S. Akiyama, P. Makela, H. Xie, M. L. Kaiser, R. A. Howard, and J.L. Bougeret, 2008, *Coronal Mass Ejections, Type II Bursts, and Solar Energetic Particle Events in the SOHO Era*, *Annales Geophysicae* **26**, 1-15.
- Gopalswamy N., S. Yashiro, Y. Liu, G. Michalek, A. Vourlidas, M. L. Kaiser, and R. A. Howard, 2005, *Coronal Mass Ejections and Other Extreme Characteristics of the 2003 October–November Solar Eruptions*, *Journal of Geophysical Research*, **110**, A09S15, doi:10.1029/2004JA010958.
- McKenna-Lawlor S.M.P., M. Dryer, Z. Smith, K. Kecskemety, C.D. Fry, W. Sun, C.S. Deehr, D. Berdichevsky, K. Kudela, and G. Zastenker, 2002, *Arrival Times of Flare/Halo CME Associated Shocks at the Earth : Comparison of the Predictions of Three Numerical Models with These Observations*, *Annales Geophysicae* **20**, 917-935.
- Melrose D.B., 1980, *Plasma Astrophysics*, Gordon and Breach Science Publ., 9-17.

- Melrose D.B., 1985, *Plasma Emission Mechanism*, Solar Radio Physics, ed. D.J. McLean & Labrum, Cambridge Univ. Press. 177-206.
- Nelson G.J. & Melrose D.B., 1985, *Type II Bursts*, Solar Radio Physics, ed. D.J. Mc Lean & Labrum, Cambridge Univ. Press. 333-359.
- Newkirk, G.Jr., 1961, *The Solar Corona in Active Regions and the Thermal Origin of the Slowly Varying Component of Solar Radio Radiation*. Astrophys. J., 133, 983
- Pohjolainen S. and Lehtinen N., 2006, *Slow Halo CMEs with Shock Signatures*, Astronomy & Astrophysics, 449, 359-367.
- Robinson R.D., Stewart R.T., Cane H.V., 1984, *Properties of Metre-wavelength Solar Radio Bursts Associated with Interplanetary Type II Emission*. Solar Physics, 91, 159.
- Shanmugaraju, A., Y.J. Moon, M.Dryer and S.Umapathy, 2003, *An Investigation of Solar Maximum Metric Type II Radio Bursts : Do Two Kinds of Coronal Shock Source Exist?*, Solar Physics 215, 161-2003.
- Suratno dan Buldan Muslim, 2008, *Pengaruh Lontaran Massa Korona pada Ionosfer*, Buku Ilmiah LAPAN, Sains Atmosfer & Iklim, Sains Antariksa serta Pemanfaatannya, ISBN: 978-979-1458-11-5, hal.112-119.
- Suratno, Santi Sulistiani, Gunawan A., dan Johan Muhamad, 2008, *Kesetaraan Gelombang Kejut Dari Semburan Radio Matahari Tipe II dan Lontaran Massa Korona*, Jurnal Sains Dirgantara LAPAN, submitted.
- Svestka Z. 1976. *Non Thermal Phenomena, Solar Flares*, D.Reidel Publ. Co., 143-215.
- Wang S.J., Y.Yan, Q.Fu, Y.Liu, and Z.Chen, 2005, *Multi-Wavelength Radio Features Associated with Large CMEs on Oct. 26-28, 2003*, Proceedings IAU Symposium No. 226.
- White, S. M., 2007, *Solar Radio Bursts and Space Weather*, Asian Journal of Physics, [//www.nrao.edu/astrores/gbsrbs/Pubs/AJP_07.pdf](http://www.nrao.edu/astrores/gbsrbs/Pubs/AJP_07.pdf).