

KESETARAAN KECEPATAN GELOMBANG KEJUT SEMBURAN RADIO MATAHARI TIPE II DAN LONTARAN MASSA KORONA

Suratno, Santl Sullstlanl, Gunawan A., dan Johan Muhamad
Peneliti Bidang Matahari dan Antariksa, LAPAN
e-mail : suratno@bdg.lapan.go.id

ABSTRACT

We investigate the association among type II solar radio burst, coronal mass ejection (CME) and flare. We found that shock wave speeds which are determined from frequency drift of type II radio burst have a good correlation with CME speed. It is shown that the high velocity shock wave will pass through the corona region in relatively short time and conversely, which can be found from the correlation between CME speed with radio bursts duration in 30 MHz – 20 MHz range, and can be expressed using the relation ΔT_{II} (min.) = $8.284 e^{-0.0008V_{cme}}$ and the correlation coefficient of these two parameters is 0.66. We got also the linear correlation between the CME speed and shock speed (V_s) as V_{cme} (km/s) = $0.581V_s + 229.4$, and the correlation coefficient is 0.64 for $V_s \geq 362$ km/sec. Since the location of flare are close to the source of shock wave, the correlation of the intensity of SXR and shock wave speed is better than that with CME speed.

ABSTRAK

Penelitian tentang keterkaitan semburan radio tipe II, lontaran massa korona (CME) dan ledakan matahari, dihasilkan bahwa kecepatan gelombang kejut yang diturunkan dari pergeseran frekuensi semburan radio matahari tipe II menunjukkan kesesuaian yang cukup baik dengan kecepatan CME. Kecepatan gelombang kejut yang tinggi akan melewati tebal lapisan korona dalam waktu yang pendek dan sebaliknya, dibuktikan dari hubungan antara kecepatan CME dan durasi semburan radio pada rentang frekuensi tertentu (30 MHz – 20 MHz) berbentuk hubungan eksponensial ΔT_{II} (menit) = $8.284e^{-0.0008V_{cme}}$ dengan koefisien korelasi sebesar 0.66. Korelasi linier antara kecepatan gelombang kejut (V_s) dan kecepatan CME berbentuk V_{cme} (km/s) = $0.581V_s + 229.4$, dengan koefisien korelasi 0.64 dan hanya berlaku bila $V_s \geq 362$ km/s. Di samping itu diperoleh juga bahwa korelasi intensitas SXR terhadap kecepatan gelombang kejut lebih baik bila dibandingkan dengan korelasi terhadap kecepatan CME disebabkan lokasi ledakan yang dekat dengan sumber gelombang kejut.

Kata kunci: Ledakan matahari, Semburan radio matahari tipe II, Lontaran massa korona

1 PENDAHULUAN

Lontaran massa korona atau *Coronal Mass Ejection* (CME) merupakan material yang dilepaskan di korona matahari berupa plasma terutama terdiri dari elektron-elektron dan proton (ada sebagian kecil ion yang lebih berat seperti helium, oksigen dan zat-zat besi) dan mengandung pula medan magnet. Tidak seperti angin surya, CME terkait dengan fenomena ledakan matahari (*solar flare*) yang bersumber di daerah dimana medan magnet kuat dan berskala besar, tertutup dan terjadi rekoneksi sehingga mengakibatkan terlemparnya massa plasma yang cukup besar dan kuat. CME mengandung dan atau membawa garis gaya medan magnet menjalar keluar korona matahari dengan kecepatan pada rentang dari <50 sampai ~2000 km/s. Dalam penjalaran ke atmosfer bumi, CME yang juga merupakan gerakan gelombang kejut (*shock wave*) dan mengandung garis gaya magnet dengan medan magnet yang kuat dan disertai dengan partikel energi tinggi akan memiliki implikasi timbulnya badai magnet bumi (*geomagnetic storm*) yang besar. Dampak CME ke atmosfer bumi ini sangat terkait dengan komponen medan magnet yang tegak lurus dengan bidang ekliptika (komponen B_z) yang kuat dan mengarah ke selatan bumi dan dapat berlangsung selama beberapa jam. Meskipun demikian CME tidak dapat secara signifikan mengakibatkan badai geomagnet bila arah selatan B_z sangat kecil, bila B_z menuju arah utara atau bila sumber CME di matahari jauh dari *Central Meridian* (McKenna-Lawlor et al., 2002).

Semburan radio matahari (*solar radio burst*) merupakan wujud aktivitas matahari yang diamati pada gelombang radio. Dari hasil pengamatan dengan radiospektrograf dihasilkan spektra dinamik frekuensi versus waktu. Semburan radio dibedakan menjadi 5 (lima) tipe : tipe I s.d tipe V. Masing-masing tipe terjadi melalui mekanisme radiasi yang berbeda, yaitu termal, radiasi plasma, dan radiasi sinkrotron (Melrose, 1980). Fenomena ini diindikasikan adanya peningkatan mendadak intensitas radiasi matahari pada seluruh spektra elektromagnet dan pancaran partikel energi tinggi sebagai akibat dari kejadian ledakan (Robinson et al., 1984; Lin et al., 1981; Newkirk, 1961).

Semburan radio yang erat terkait dengan lontaran massa korona adalah semburan radio tipe II. Tipe ini timbul di korona matahari melalui mekanisme radiasi plasma yang disebabkan oleh lewatnya muka gelombang kejut yang menyeret partikel bermuatan (didominasi elektron) yang akan merangsang osilasi plasma di korona dan meningkatkan intensitas radiasi gelombang radio (Fainberg et al., 1972; Reiner, Stone, 1986). Pada gelombang meter semburan radio dapat diamati dari landas bumi, sehingga secara langsung menjadi informasi awal tentang kemungkinan akan terjadinya badai antariksa. Oleh karena itu dapat menjadi model peringatan dini pengaruh aktivitas matahari pada atmosfer bumi.

Mengingat keterkaitan yang erat antara semburan radio matahari tipe II, CME, dan ledakan maka keterkaitan tersebut perlu diteliti. Didasarkan atas

kriteria waktu timbulnya kejadian semburan radio tipe II dan waktu awal deteksi CME oleh *Large Angle Spectroscopic Coronagraph* (LASCO) dapat dikemukakan probabilitas keterkaitannya. Kecepatan CME tercantum dari hasil deteksi dengan LASCO, sementara kecepatan muka gelombang kejut (*shock front*) diturunkan dari konversi pergeseran frekuensi ke pergeseran posisi dari spektra dinamik semburan radio tipe II melalui perhitungan dengan model kerapatan korona. Muka gelombang kejut sebagai pemicu timbulnya semburan tipe II juga mengekspresikan kecepatan CME, keduanya oleh kejadian ledakan matahari. Dalam penelitian ini, ledakan Ha dan ledakan SXR ditinjau untuk menganalisis keterkaitan kecepatan muka gelombang kejut dan CME dengan intensitas ledakan.

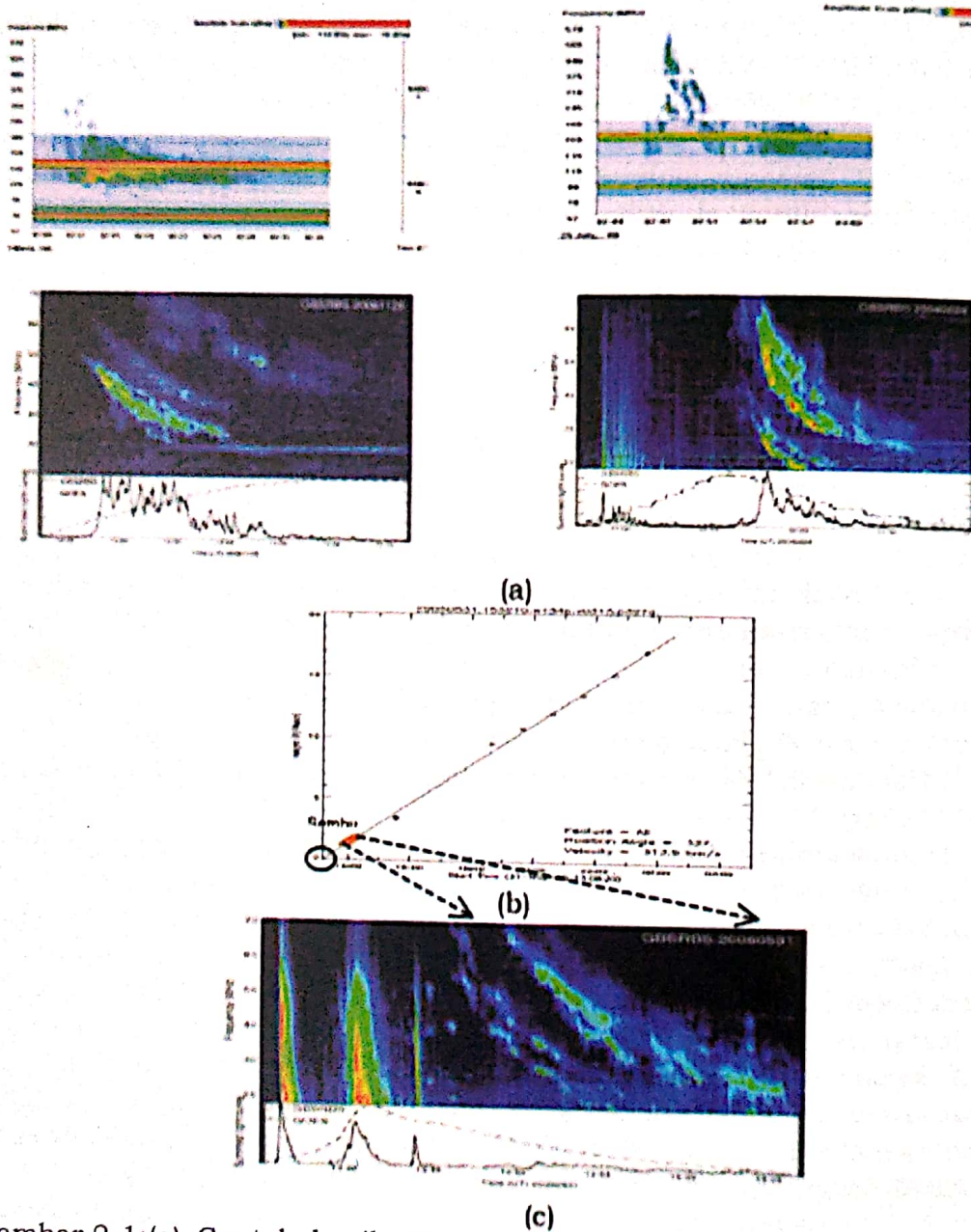
2 DATA YANG DIGUNAKAN

Data CME yang digunakan pada penelitian ini adalah data CME yang diamati oleh peralatan *Large Angle Spectroscopic Coronagraph* (LASCO) yang ditumpangkan pada satelit *Solar Heliosphere Observatory* (SOHO). LASCO adalah koronagraf yang berfungsi mengamati korona matahari secara langsung dari luar angkasa. Korona matahari dapat diamati secara langsung dari permukaan bumi pada saat terjadinya gerhana matahari dan LASCO mensiasati untuk membuat gerhana matahari buatan dari peralatan ini, sehingga dengan adanya koronagraf, maka pengamatan terhadap korona dapat dilakukan sepanjang waktu tanpa perlu menunggu datangnya gerhana matahari. Saat ini, koronagraf ditempatkan di luar angkasa, sehingga dapat menghilangkan efek penghamburan cahaya di atmosfer bumi (LASCO Handbook, 1994). Data CME dapat diperoleh dari *SOHO LASCO CME CATALOG*: http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/.

Data semburan radio tipe II secara penuh dalam bentuk tabel dapat diperoleh dari situs http://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SOLAR_RADIO/SPECTRAL. Tabel ini merupakan gabungan hasil pengamatan *Solar Radio Spectrograph* di seluruh observatorium di dunia dan dihimpun oleh *National Geophysical Data Center* (NGDC). Khususnya untuk daftar semburan radio matahari antara lain memuat informasi tentang waktu (tanggal, bulan tahun) kejadian, selang waktu pengamatan, nama observatorium, tipe semburan radio, waktu awal dan akhir kejadian. Demikian pula data ledakan Ha dan sinar-X lunak (SXR) diperoleh dari situs <http://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR/solar.html>, khusus pada bagian *Solar Flare-Associated Events*.

Untuk analisis lebih rinci keterkaitan semburan tipe II dengan CME, data semburan radio tipe II diperoleh dari hasil pengamatan *The Green Bank Solar Radio Spectrometer of National Radio Astronomy Observatory, West Virginia* (<http://gbsrbs.nrao.edu/>). Di samping itu ada 2 (dua) data yang diperoleh dari hasil pengamatan radiospektrograf yang pernah dimiliki oleh LAPAN dari Stasiun Pengamat Dirgantara Tanjungsari (yaitu data 03 Maret 2000 dan 25 Juli 2000). Rentang waktu yang ditinjau dalam penelusuran data CME dan semburan radio tipe II adalah dari bulan Januari 2000 sampai

dengan bulan Juni 2007, yaitu pada periode menurun aktivitas matahari siklus ke-23. Contoh data hasil pengamatan semburan radio tipe II dan deteksi posisi gerakan CME seperti terlihat pada Gambar 2-1.



Gambar 2-1:(a) Contoh hasil pengamatan semburan radio matahari tipe II dari stasiun pengamat dirgantara Tanjung Sari-LAPAN (03 Maret dan 25 Juli 2000), *The Green Bank Solar Radio Bursts Spectrometer (GBSRBS) of National Radio Astronomy Observatory, West Virginia.* (b) CME melalui *Large Angle Spectroscopic Coronagraph/LASCO*, digabungkan dengan (c) semburan radio tipe II yang teramati oleh *GBSRBS* yang terkait dengan CME. Lingkaran yang menggambarkan matahari dan sketsa sumber semburan radio tipe II ditambahkan oleh penulis (Rtn)

Untuk menetapkan pemilihan data yang akan dianalisis, ditinjau kecepatan linier CME (yang dianggap terkait dengan semburan tipe II) terendah dan terbesar. Selama rentang waktu tahun 2000 s.d. 2007 (Juni), data CME yang tercatat adalah data kecepatan CME terendah sebesar 21 km/s dan kecepatan tertinggi sebesar 3387 km/s. Kriteria waktu ini ditetapkan sebagai kondisi ekstrim, dapat dijelaskan bahwa ketika sumber semburan tipe II muncul di ketinggian 1.2 R_s dengan kecepatan CME 21 km/s, maka sampai di ketinggian 2 R_s , diperlukan waktu 441.27 menit. Jika kecepatan CME 3387 km/s, maka sampai di ketinggian 2 R_s diperlukan waktu 2.74 menit. Dengan batasan tersebut, maka kriteria CME yang berasosiasi dengan semburan tipe II, bila CME terdeteksi segera atau hampir bersamaan dengan waktu awal dari semburan tipe II.

Kriteria lain yang digunakan adalah bahwa semburan tipe II sangat mungkin terjadi pada posisi (ketinggian) di atas posisi dimana CME telah terdeteksi oleh LASCO. Hal ini berarti deteksi CME lebih dahulu dibandingkan dengan deteksi semburan tipe II sehingga perbedaan waktu kejadian antara dua fenomena ini (waktu deteksi CME dikurangi waktu deteksi semburan tipe II) bernilai negatif. McKenna-Lawlor et al. (2002), pernah meneliti tentang keterkaitan ledakan matahari diikuti oleh semburan tipe II dan CME menemukan bahwa perbedaan waktu antara deteksi CME dan semburan radio tipe II adalah $-0:06^m$ sampai dengan $1:14^m$. Cho et al. (2005), menganalisis keterkaitan antara semburan tipe II dan CME dengan kriteria bila semburan tipe II terjadi di bawah 90 menit sebelum kejadian CME. Penelusuran datanya pada selang Februari 1997 sampai dengan Oktober 2000 memperoleh 173 data semburan tipe II dan terdapat 81% berasosiasi dengan CME.

Pada penelitian ini, dengan kriteria tersebut teridentifikasi sebanyak 42 data semburan tipe II. Dari sejumlah data tersebut, 2 (4.8%) data tidak terdapat kejadian CME, 12 (28.6%) data tanpa ledakan $H\alpha$ dan 3 (7.1%) data tanpa ledakan SXR. Kejadian semburan radio tipe II, CME dan ledakan tertentu yang terpilih ditabelkan untuk dijadikan bahan analisis. Dari hasil digitasi dan plotingnya 2 (dua) data diragukan ada keterkaitannya baik dari posisi dan beda waktu kejadiannya, sehingga dari 42 data semburan radio tipe II terdapat 4 (9.5%) data yang kemudian tidak akan disertakan dalam analisis. Tinggal 38 data yang akan dijadikan bahan analisis lebih lanjut.

3 METODOLOGI

Spektra radio dinamik yang merupakan wujud hasil pengamatan dari semburan tipe II, menggambarkan pergeseran frekuensi rata-rata terhadap waktu pengamatan (df/dt). Untuk dapat memperoleh kecepatan pergeseran muka gelombang kejut, perlu konversi pergeseran frekuensi (df/dt) spektra dinamik menjadi pergeseran posisi (dR/dt). Hal ini dapat dilakukan dengan

melibatkan frekuensi plasma dan kerapatan plasma di korona matahari berubah sebagai fungsi ketinggian $N=N(R)$.

Frekuensi osilasi plasma sebagai fungsi kerapatannya adalah (Lyman Spitzer Jr., 1956):

$$f = 8.98\sqrt{N(R)} \quad (3-1)$$

Newkirk (1961), menyampaikan model kerapatan korona yang didasarkan atas pengamatan *K-coronameter*, kerapatan plasma ini menurun sebagai fungsi ketinggian korona (R), menurut hubungan:

$$N(R) = N_0 \times 10^{4\frac{32}{R}} \quad (3-2)$$

dengan R adalah jarak dari pusat matahari dalam satuan jejari matahari (~6.95x10⁵ km). N₀ adalah konstanta yang nilainya berbeda bila matahari dalam kondisi tenang dan dalam kondisi aktif. Newkirk (1961) menetapkan nilai N₀ = 4.2x10⁴ untuk kondisi matahari tenang. Pada kondisi aktif, kerapatan plasma korona ini meningkat dengan faktor hampir 2 kali lipat. Caroubalos et al. (2004), mengemukakan konstanta N₀ sebesar 8.3x10⁴ untuk kondisi matahari aktif. Nilai tersebut didasarkan atas hasil pengamatan semburan radio tipe II dan tipe IV dengan radiospektrograf *ARTEMIS-IV* yang dioperasikan di Universitas Athena, Yunani dan dibandingkan dengan data CME ketika terjadi peristiwa ledakan (matahari aktif).

Selanjutnya, dari persamaan (3-1) dan persamaan (3-2) dan memasukkan nilai N₀= 8.3x10⁴, dapat diperoleh konversi spektra dinamik dari kawasan frekuensi (df/dt) menjadi kawasan posisi (dR/dt) melalui konversi formulasi:

$$R = 2. \frac{16}{\log\left(\frac{f}{259287}\right)} \quad (3-3)$$

Sementara Cho et al. (2005) faktor yang merupakan kelipatan kerapatan (*density multiplier*) dan menggambarkan bahwa kerapatan korona berubah terhadap tingkatan aktivitas matahari, diberikan dengan parameter α , sehingga persamaan model kerapatan korona menjadi:

$$N(R) = \alpha \times 4.2 \times 10^4 \times e^{4\frac{32}{R}} \quad (3-4 \text{ a,b})$$

atau $N(R) = \alpha \times 4.2 \times 10^4 \times e^{9\frac{947}{R}}$

Dan untuk mengekspresikan kecepatan muka gelombang kejut dari pergeseran frekuensi (df/dt), adalah:

$$\frac{df}{dt} = \frac{df}{dR} \times \frac{dR}{dt} \quad (3-5)$$

dR/dt , merupakan kecepatan pergeseran frekuensi rata-rata (V_{drift}).

Dengan menggunakan persamaan (3-5), memasukkan dan men-diferensialkan persamaan-persamaan (3-3 dan 3-4b), maka dapat diperoleh kecepatan pergeseran gelombang kejut rata-rata (V_{drift}), dan dinyatakan dalam persamaan:

$$\frac{dR}{dt} = V_{drift} = -0.201 \times R^2 \left(\frac{1}{f} \frac{df}{dt} \right) \quad (3-6)$$

V_{drift} akan menggambarkan kecepatan gelombang kejut (V_{shock} selanjutnya ditulis V_s) yang diturunkan dari spektra dinamik semburan radio tipe II. Hasil hitungan kecepatan gelombang kejut (V_s) ini kemudian digabungkan dengan kecepatan CME dari hasil pengamatan LASCO.

4 HASIL DAN ANALISIS

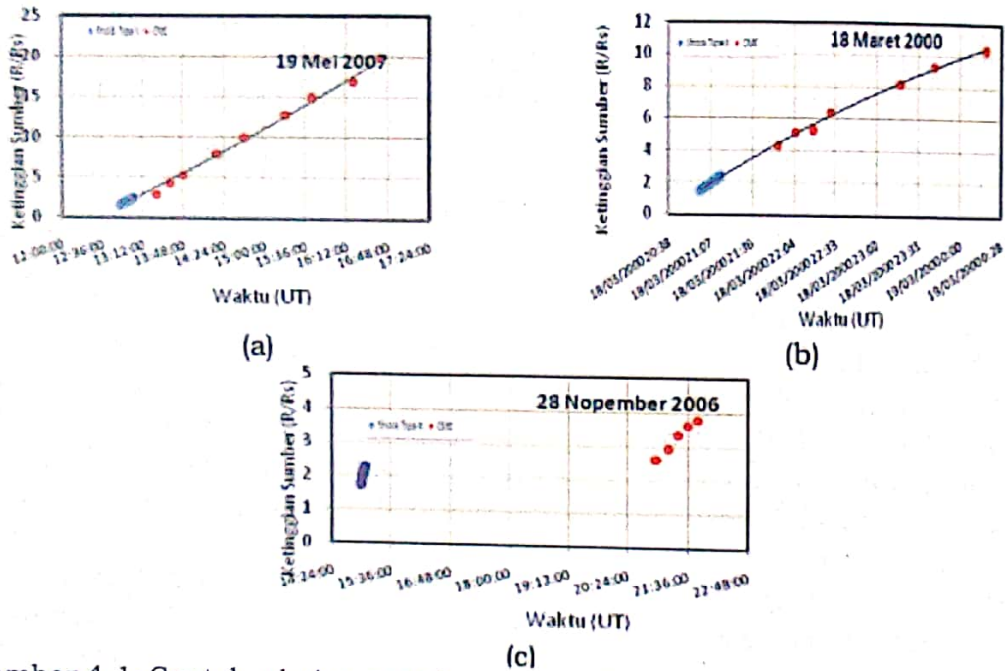
Dengan kriteria yang telah dijelaskan pada bab 2, diperoleh hasil penelusuran data semburan radio tipe II dengan kejadian CME dan ledakan $H\alpha$ dan SXR sebanyak 38 data seperti tercantum pada Tabel 4-1. Ada 9 (sembilan) atau 23.7% data semburan radio yang tidak didahului oleh kejadian ledakan $H\alpha$ dan ada 4 (empat) atau 10.5% data yang tidak didahului oleh ledakan SXR. Contoh plotting posisi versus waktu yang telah digabungkan dengan plotting posisi deteksi CME seperti Gambar 4-1, yaitu dua data dengan kesesuaian yang cukup baik (18 Maret 2000 dan 19 Mei 2007) dan satu contoh data (28 Nopember 2006) yang tidak menunjukkan adanya kemungkinan asosiasi antara semburan radio tipe II dan CME.

Dengan mengacu pada persamaan 3-3, maka dapat dilakukan plotting data sumber semburan radio tipe II terhadap posisi (ketinggian) dari permukaan matahari dengan cara melakukan konversi pergeseran frekuensi ($\Delta f/\Delta t$) ke pergeseran posisi ($\Delta R/\Delta t$). Pergeseran frekuensi dilakukan dengan cara digitasi spektra dinamik semburan radio tipe II dengan bantuan perangkat lunak Adobe Photoshop. Gambar 4-1 adalah contoh plotting posisi sumber semburan dalam satuan jejari matahari $\left(\frac{R}{R_s} \right)$ versus waktu (t) yang digabungkan dengan data posisi gerakan CME dari deteksi LASCO.

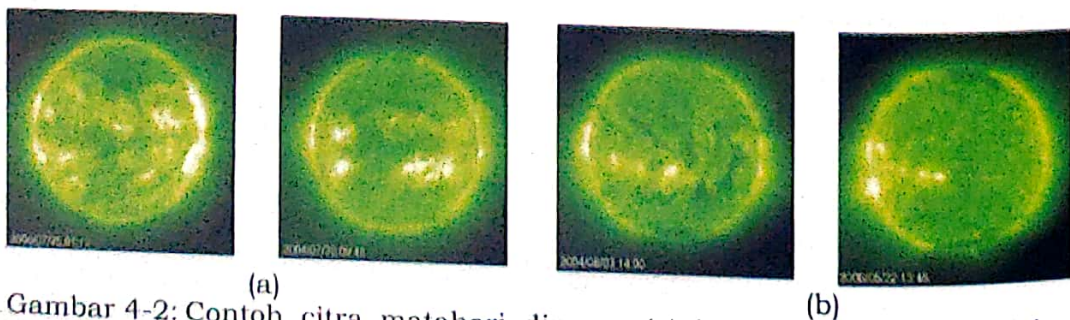
Selanjutnya dengan menggunakan formulasi pada persamaan 3-6 dapat diturunkan kecepatan muka gelombang kejut (V_s) pada setiap titik digitasi dan ditentukan rata-ratanya. Kecepatan CME diperoleh hasil deteksi LASCO adalah kecepatan linier (atau kecepatan rata-rata). Secara lengkap data kejadian semburan radio tipe II, CME dan data pendukung lainnya (ledakan $H\alpha$, ledakan X ray) tertulis pada Tabel 4-1.

Terdapat 9 (sembilan) data CME yang tercatat tidak didahului oleh kejadian ledakan $H\alpha$. Setelah ditelusuri dari citra matahari, ternyata peristiwa ledakan matahari terjadi pada bagian tepi dan berada di balik piringan matahari sehingga kejadian ledakan ini tidak dapat terdeteksi oleh

teleskop Ha. Namun karena CME terjadi jauh di atas permukaan matahari, maka sistem LASCO masih dapat mendeteksi. Gambar 4-2 adalah contoh citra matahari dengan kejadian ledakan berada di bagian cakram atau bagian muka matahari (Gambar 4-2a) yang terjadi pada 25 Juli 2000 dan 20 Juli 2004 berturut-turut dengan kelas ledakan 2B dan 3B. Gambar 4-2b adalah kejadian aktivitas matahari (03 Juni 2004 dan 22 Mei 2006) yang berada di bagian tepi dan dibalik matahari sehingga ledakan tidak dapat terdeteksi oleh teleskop Ha.



Gambar 4-1: Contoh plotting posisi versus waktu yang digabungkan dengan posisi deteksi CME. Dua plotting pertama dan kedua (a) dan (b) adalah contoh yang menunjukkan adanya asosiasi antara semburan radio tipe II dan CME, dan plotting ketiga (c) yang tidak menunjukkan adanya asosiasi (data ini tidak termasuk dalam analisis selanjutnya)



Gambar 4-2: Contoh citra matahari dimana (a) kejadian ledakan matahari terjadi dibagian cakram sehingga dapat terdeteksi dengan baik, dan (b) ledakan terjadi dibagian tepi dan dibalik matahari sehingga kejadian ledakan tidak dapat terdeteksi oleh teleskop Ha. (Citra matahari diunduh dari SOHO LASCO CME Catalog, http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/)

Tabel 4-1: DATA SEMBURAN RADIO TIPE II YANG BERBASISASI DENGAN CME DAN LEDAKAN (Ha DAN SXR)

No.	Tanggal hh/mm/yy	Semburan Tipe II		V _s (km/s)	CME			V _{obs}	Ha			K. Ray			Beda Waktu Awal (month)							
		Waktu Awal	Waktu Akhir		Lebar sudut	CPA	Lebar sudut		Y _{max} (10^3)	Perc. (%)	Waktu Awal	Waktu Bakh.	Radius	Lokasi	Waktu Awal	Waktu Maks.	Kelas	Tempo TI	TSUR TI	The (MAX) TI		
1	03/03/2000	2:12:00	2:30:00	362,31	7	8	98	23,05	233	0,41	-1	0,4300728	2,11:00	2,13:00	10	S15W60	10	10	20	21	22	23
2	05/03/2000	22:20:00	23:00:00	370,97	7,4	7,6	673	23,06	774	6,8	-6,8	0,50013486	23,11:00	23,26:00	SF	S11E36	—	46,10	51	—	—	60
3	18/03/2000	21:01:00	21:10:00	762,81	21,30:06	275	165	492	-32,1	1,55042209	20,52:00	20,57:00	IF	S10W64	20,47:00	21,02:00	M2.1	20,13	9	-14	—	—
4	18/03/2000	21:55:00	22:01:00	677,71	23,06:05	178	83	559	3,5	1,2128267	21,54:00	21,56:00	IF	S10W14	21,50:00	21,54:00	C4.5	21,06	3	6	1	—
5	27/03/2000	6:47:00	7:05:00	751,84	7,31:20	179	90	407	-9,3	1,54301173	5,19:00	5,19:00	10	S10W62	5,12:00	5,18:00	M1.0	44,33	93	95	98	99
6	23/05/2000	4:12:00	4:36:00	362,71	5,54:06	311	78	535	-18,4	0,67790325	4,02:00	4,06:00	20	N10W30	4,00:00	4,07:00	M2.0	102,10	-10	-12	6	—
7	25/07/2000	2:47:00	3:01:00	601,35	3,30:05	146	360	528	-5,8	1,13891354	2,47:00	2,52:00	20	N10W08	2,41:00	2,40:00	M2.0	43,06	0	6	6	1
8	09/09/2000	8:37:00	8:55:00	443,77	8,56:59	271	100	564	-13,7	0,80102709	8,36:00	8,36:00	10	N07W07	8,28:00	8,40:00	M1.0	10,08	-7	9	—	—
9	12/02/2001	20:30:00	20:37:00	815,26	21,06:05	278	112	403	2,7	1,76026481	20,26:00	20,27:00	SF	N12W60	20,21:00	20,37:00	C4.2	30,06	4	9	-3	—
10	10/03/2001	4:11:00	4:19:00	643,37	4,20:05	297	81	819	-23,2	1,02735397	4,01:12	4,05:00	20	N27W42	4,00:00	4,05:00	M0.7	15,08	9,8	-11	6	—
11	03/01/2002	2:19:00	2:30:00	777,97	4,06:05	250	43	371	1,9	1,96218254	2,18:00	2,20:00	IF	S11E12	2,14:00	2,20:00	C3.9	107,06	5	5	1	—
12	25/01/2002	2:25:00	2:45:00	442,07	3,30:05	42	40	213	9,7	2,0754957	2,18:00	2,25:00	SN	N13E10	2,18:00	2,25:00	C0.6	65,06	-7	7	0	—
13	23/01/2003	4:32:00	4:44:00	437,61	5,30:05	112	76	234	-12,4	1,87013173	4,00:00	4,47:00	10	S27E21	4,42:00	4,40:00	M1.0	98,00	-12	10	15	16
14	12/02/2003	1:51:00	2:01:00	606,05	2,30:05	267	116	355	-1	1,70719563	1,45:00	1,57:00	10	S09W43	1,42:00	1,51:00	C8.7	30,08	6	0	0	0
15	02/06/2004	23:08:00	23:19:00	1796,35	23,15:44	207	136	1102	-9,7	1,16726681	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
16	03/06/2004	16:24:00	16:40:00	1560,02	16,50:05	303	179	1226	-17,4	1,29026579	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
17	20/07/2004	12:35:00	12:48:00	1260,35	13,31:52	146	360	710	16,6	1,8117546	12,26:00	12,31:00	30	N10E35	12,22:00	12,32:00	M0.8	56,87	9	-13	4	-3
18	23/07/2004	16:00:00	16:08:00	600,40	16,08:08	146	360	624	-43,9	0,7392781	17,23:00	17,25:00	SF	N14W14	16,03:00	16,09:00	M2.2	6,10	83	3	15	9
19	18/08/2004	17:44:00	17:59:00	724,48	17,54:05	258	170	602	0,5	1,20546186	17,46:00	17,46:00	SF	S14W90	17,29:00	17,40:00	M1.0	10,00	-8	-15	2	-4
20	08/12/2004	18:45:00	19:45:00	443,00	20,28:05	146	360	611	-87,2	0,73635271	19,42:00	19,44:00	SF	N01W07	19,34:00	19,59:00	C2.5	41,06	-3	-11	-1	14
21	29/12/2004	18:26:00	18:32:00	750,19	18,45:05	239	12	607	-15,2	1,23590651	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
22	01/01/2005	0:29:00	0:49:00	554,72	0,54:05	146	360	832	-5,5	0,6661262	0:00:00	0:00:00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
23	09/01/2005	8:54:00	9:11:00	303,60	9,06:05	94	164	870	-4,4	0,440922	8:26:00	8:45:00	10	S08E09	8:25:00	8:51:00	M2.4	12,08	-20	-29	-9	-3
24	15/01/2005	14:16:54	14:30:30	649,71	14,54:05	222	271	468	-0,6	1,78023534	14:21:00	14:21:00	IF	S09W12	14:06:00	14:23:00	M3.2	37,16	4,1	-8,9	—	6,1
25	20/01/2005	8:44:00	7:00:00	854,47	6,54:05	108	108	171	-3,3	0,65600311	6:41:00	6:46:00	20	N14W61	6:36:00	7:01:00	M1.0	10,00	-3	-8	2	17
26	17/04/2005	21:01:00	21:20:00	817,18	21,26:08	146	360	662	16,0	0,98970001	20:59:00	21:08:00	SF	S12E76	20:46:00	21:07:00	C4.0	25,13	-2	-15	7	6
27	19/04/2005	16:47:00	16:57:00	1387,85	17,26:31	146	360	1128	-30,1	1,68001772	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
28	06/05/2005	16:47:00	16:57:00	965,55	17,26:31	146	360	1128	-30,1	1,68001772	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
29	11/05/2005	19:39:30	19:51:30	892,28	19,13:08	146	360	1080	-6,8	1,18338068	18:31:00	18:31:00	20	N12E11	18:03:00	19:30:00	M1.1	33,63	-10,5	-17,5	-0,5	-1,5
30	13/05/2005	20:46:00	20:50:00	1998,74	20,13:08	146	360	1080	-6,8	1,18338068	18:31:00	18:31:00	20	N12E11	18:03:00	19:30:00	M1.0	31,08	-10	-20	0	16
31	14/05/2005	20:46:00	20:50:00	847,68	20,56:52	261	115	780	21,4	1,07847764	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
32	15/05/2005	22:41:00	22:51:00	1044,82	22,26:08	125	179	370	1,0	2,15617904	20:41:00	20:45:00	SF	S16E15	20:16:00	20:59:00	C2.8	45,10	-190	-143	-116	-103
33	31/05/2005	14:45:00	14:57:00	582,25	15,32:10	280	134	313	-2,9	1,86023355	14:39:00	14:43:00	SF	N12W23	14:33:00	14:42:00	C2.4	47,17	-6	-12	-2	-3
34	03/06/2005	12:05:00	12:22:00	1254,10	12,32:10	146	360	1678	-45,3	0,74693435	12:23:00	12:26:00	10	S17E22	11:51:00	12:26:00	M1.0	27,17	18	-14	21	21
35	22/05/2006	19:59:00	20:03:00	770,05	20,54:04	104	118	448	5,4	1,7180642	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
36	19/05/2007	12:50:00	13:10:00	1252,59	13,24:04	260	106	658	-13,4	1,30750989	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
37	22/05/2007	14:36:00	14:55:00	1203,23	16,08:10	276	108	544	7,9	2,21102574	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
38	31/12/2007	0:53:00	1:10:00	866,97	1,31:40	92	164	1013	-21,2	0,85584403	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Keterangan :

- Kolom 1 : nomor urut kejadian semburan radio tipe II dan kejadian CME dan ledakan matahari terkait.
- Kolom 2 : tanggal, bulan dan tahun kejadian.
- Kolom 3 dan 4 : waktu awal dan akhir (UT) kejadian semburan radio tipe II.
- Kolom 5 : kecepatan gelombang kejut (V_s) diturunkan dari spektra dinamik semburan radio tipe II.
- Kolom 6, 7, 8, 9 dan 10: kejadian CME berturut-turut waktu awal, Central Passage Angle (CPA), lebar sudut daerah CME, kecepatan linier, dan akselerasi CME.
- Kolom 11 : perbandingan kecepatan gelombang kejut dengan kecepatan CME.
- Kolom 12, 13, 14, dan 15: kejadian ledakan Ha berturut-turut waktu awal, waktu intensitas maksimum (UT), tanda U menyatakan sedikit lebih dari waktu awal), kelas dan lokasi ledakan.
- Kolom 16, 17, dan 18 : kejadian ledakan SXR berturut-turut waktu awal, waktu intensitas maksimum (UT) dan kelas ledakan.
- Kolom 19, 20, 21, 22, dan 23 : beda waktu antara waktu awal CME, ledakan Ha dan SXR, serta beda waktu intensitas maksimum ledakan Ha dan SXR dengan waktu awal semburan radio tipe II.
- tanda — mencerminkan tidak ada kejadian ledakan Ha dan atau SXR.

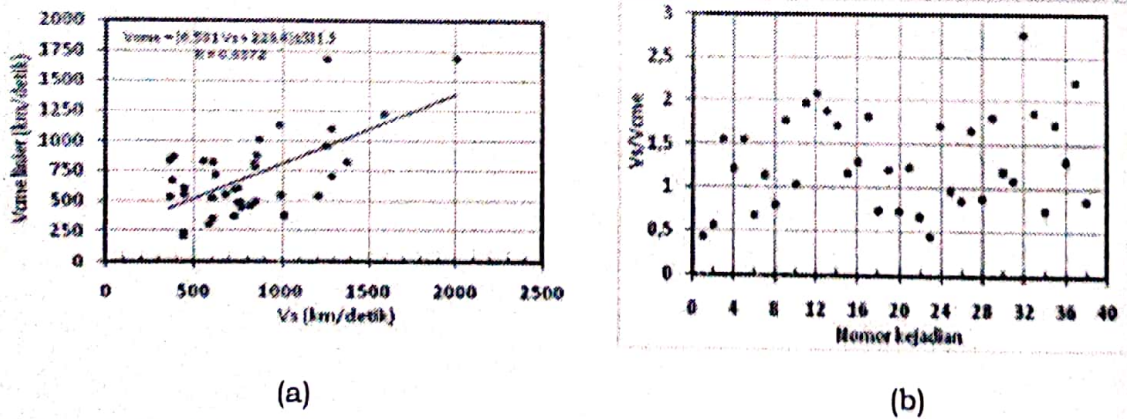
a. Gelombang Kejut dan CME

Didasarkan atas pemahaman bahwa CME terjadi oleh lewatnya muka gelombang kejut, maka antara kecepatan gelombang kejut (V_s) dan kecepatan linier CME memiliki korelasi tertentu. V_s diturunkan dari hasil olah data spektra dinamik semburan radio tipe II melalui konversi dari kawasan frekuensi ke kawasan posisi. Karena kedua fenomena ini dipicu oleh muka gelombang kejut yang sama, maka dapat diduga bahwa V_s akan berbanding lurus dengan kecepatan CME.

Hasil penelitian kali ini ditunjukkan pada gambar 4.2 (a) menyatakan korelasi antara V_s dan kecepatan CME. Korelasinya dapat dinyatakan secara linier meski hanya memiliki koefisien sebesar $R = 0.64$, dengan hubungan sebagai berikut:

$$V_{cme} = [0.581 V_s + 229.4] \pm 311.5 \text{ km/s} \quad (4-1)$$

Gambar plotting ini (dan data pada Tabel 4-1) juga memperlihatkan semburan tipe II akan berasosiasi dengan CME bila kecepatan gelombang kejut sebesar $V_s \geq 362 \text{ km/s}$. Kondisi ini didukung penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa pada ketinggian di atas $1.5 R_s$ kecepatan pemandu dari gelombang kejut sekitar 500 km/s (Robinson et al., 1984) dan atau lebih besar dari 400 km/s (Caroubalos et al., 2004). Gambar 4-2b adalah perbandingan V_s/V_{cme} yang menunjukkan plotting dengan pola yang mendatar dengan rentang $0.43 - 2.75$. Caroubalos et al. (2004), juga telah meneliti dengan menggunakan data 1998-2000 dan menyatakan perbandingan antara kecepatan muka gelombang kejut dan kecepatan CME pada rentang $0.5 - 2$.



Gambar 4-2:(a) Hubungan antara kecepatan muka gelombang kejut (V_s) dan kecepatan CME (km/s). Terlihat kecenderungan bahwa dengan kecepatan gelombang naik maka kecepatan CME juga akan naik. (b) Perbandingan antara kecepatan muka gelombang kejut (V_s) dan kecepatan CME untuk 38 kejadian yang ditinjau berada pada rentang 0.43 sampai dengan 2.75

b. Gelombang Kejut dan Durasi Semburan Tipe II pada Rentang Frekuensi Tertentu

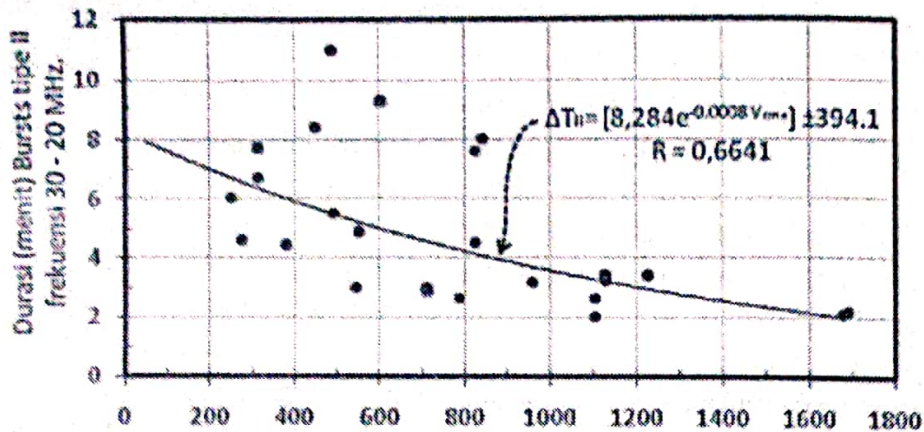
Semburan radio matahari tipe II dipicu oleh lewatnya muka gelombang kejut yang juga menyatakan adanya lontaran massa korona, maka antara kecepatan CME dan kejadian semburan radio matahari tipe II akan memiliki keterkaitan tertentu. Dugaan awal bahwa bila kecepatan CME tinggi, maka waktu yang diperlukan oleh muka gelombang kejut atau CME dalam penjarannya di korona matahari hanya memerlukan waktu yang singkat. Korona merupakan lapisan plasma sebagai sumber semburan radio tipe II, dengan kecepatan gelombang kejut yang tinggi maka durasi semburan menjadi singkat. Sehingga antara kecepatan CME dan durasi semburan tipe II memiliki hubungan yang berbanding terbalik. Suratno (2008) telah meneliti tentang probabilitas keterkaitan semburan radio matahari tipe II dengan lontaran massa korona yang terdeteksi dengan LASCO menyatakan bahwa durasi semburan radio tipe II dan kecepatan CME berbanding lurus dan memiliki kecenderungan bila kecepatan CME tinggi durasi kejadian semburan semakin panjang. Fenomena ini dapat dijelaskan bahwa bila kecepatan CME tinggi berarti memiliki energi yang tinggi pula, sehingga CME dapat menembus korona lebih jauh dan menghasilkan semburan radio dalam rentang frekuensi dan durasi waktu yang panjang.

Dugaan tentang hubungan antara kecepatan CME dan durasi semburan radio tipe II akan berbanding terbalik apabila semburan radio tipe II ditetapkan pada rentang frekuensi tertentu atau rentang frekuensi yang sama untuk setiap kejadian yang ditinjau. Penelitian ini akan mencoba membuktikannya.

Dengan mempertimbangkan rentang frekuensi pada setiap kejadian tidak sama dan tidak merata, maka untuk memperoleh data yang cukup banyak perlu ditetapkan rentang frekuensi yang lebih pendek yaitu antara 30 MHz dan 20 MHz. Data yang berhasil ditelusuri diperoleh sebanyak 26 pasangan data kecepatan CME (V_{cme}) dan durasi semburan radio tipe II (ΔT_{II}) pada rentang frekuensi 30–20 MHz. Hasilnya seperti terlihat pada Gambar 4-3 yang memiliki hubungan linier:

$$\Delta T_{II} = [8.28e^{-0.0008V_{cme}}] \pm 394,1 \quad (4-2)$$

dengan koefisien korelasi sebesar $R=0.66$, dengan pangkat eksponensialnya yang relatif sangat kecil yaitu 0.0008. Namun faktor pangkat ini akan sangat berarti bila dikalikan dengan kecepatan CME (V_{cme}).



Gambar 4-3: Hubungan antara durasi (menit) semburan radio tipe II pada rentang frekuensi tetap (30 s.d. 20 MHz) versus kecepatan CME (km/s). Terlihat kecenderungan bahwa dengan kecepatan CME yang tinggi durasi kejadian semburan semakin menurun

c. Gelombang Kejut, CME dan Intensitas Ledakan Matahari

Kejadian semburan radio tipe II maupun kejadian CME sama-sama dipicu oleh adanya gangguan struktur magnet dengan proses rekoneksi daerah aktif matahari (Magara et al., 2000, Melrose, 1985, Nelson & Melrose, 1985, Svestka, 1976, Wang et al., 2005). Semburan radio tipe II disebabkan lewatnya gelombang kejut pada plasma dan CME oleh lepasnya plasma dari kungkungan (*frozen in*) medan magnet di korona ke ruang antar planet (Caroubalos et al., 2004). Gangguan struktur magnet tersebut juga sebagai pemicu kejadian ledakan matahari yang dapat diamati pada gelombang H α dan SXR. Oleh karena itu semburan radio dan CME akan memiliki keterkaitan dengan kejadian ledakan dan dugaan logis bahwa semakin besar tingkat intensitas ledakan semakin besar pula kemungkinan terjadinya peristiwa semburan tipe II dan CME.

Pada penelitian ini akan ditinjau bagaimana keterkaitan semburan radio tipe II dan CME dengan ledakan matahari. Karena semburan radio tipe II menggambarkan kecepatan gelombang kejut maka parameter gelombang kejut digunakan kecepatannya. Demikian pula untuk peristiwa CME. Parameter ledakan digunakan intensitas dari SXR.

Lokasi sumber semburan radio tipe II pada gelombang meter berada pada ketinggian di bawah dua jejari matahari sesuai dengan kerapatan plasma korona (Caroubalos et al., 2004; Magara et al., 2000; Newkirk, 1961), sementara CME terdeteksi oleh LASCO pada ketinggian di atas dua jejari matahari (Cho et al., 2005). Sehingga dapat diduga bahwa keterkaitan antara intensitas ledakan SXR dan kecepatan gelombang kejut akan lebih baik bila dibandingkan dengan keterkaitan antara intensitas ledakan SXR dan kecepatan CME.

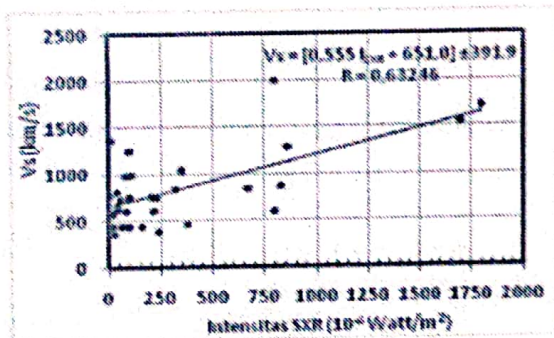
Gambar 4-4a, b adalah plotting korelasinya dimana antara kecepatan gelombang kejut (V_s) dan intensitas SXR (I_{SXR}) memiliki koefisien $R=0.63$, berbentuk hubungan:

$$V_s = [0.555 I_{SXR} + 651] \pm 391.9 \text{ km/s} \quad (4-3)$$

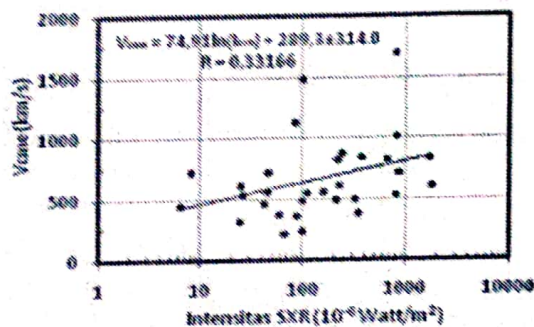
Sementara, korelasi antara kecepatan CME (V_{cme}) dan intensitas SXR (I_{SXR}) hanya memiliki koefisien $R=0.33$, dengan hubungan eksponensial dalam skala logaritmik berbentuk:

$$V_{cme} = [74.91 \ln(I_{SXR}) + 289.3] \pm 314.0 \text{ km/s} \quad (4-4)$$

Kedua hubungan tersebut satuan V_s dan V_{cme} dinyatakan dalam km/s dan intensitas SXR dalam 10^{-6} Watt/m². Caroubalos et al. (2004) juga telah meneliti keterkaitan antara kecepatan CME (V_{cme}) dan intensitas SXR (I_{SXR}) terintegrasi atau total fluks selama semburan berlangsung. Korelasinya berbentuk $V_{cme}=150 \ln(I_{SXR})+1384$ (satuan intensitas SXR dinyatakan dalam Joule/m²).



(a)



(b)

Gambar 4-4:(a) Ploting dan korelasi linier antara V_s versus I_{SXR} dan (b) korelasi logaritmik V_{cme} versus I_{SXR} . Koefisien korelasi V_s lebih besar bila dibandingkan dengan V_{cme} terhadap intensitas SXR berturut-turut 0.63 dan 0.33, menunjukkan akan peran dari lokasi ledakan yang lebih dekat dengan sumber semburan radio

5 KESIMPULAN

Kecepatan gelombang kejut (V_s) yang diturunkan dari pergeseran frekuensi semburan radio matahari tipe II menunjukkan kesesuaian yang cukup baik dengan kecepatan CME hasil pengamatan dengan koronagraf LASCO. Kesesuaian yang cukup baik tersebut ditunjukkan oleh penggabungan plotting posisi versus waktu dari gerakan gelombang kejut dan CME.

Kecepatan gelombang kejut (V_s) yang diturunkan dari spektra dinamik semburan tipe II dihasilkan korelasi linier terhadap kecepatan CME berbentuk $V_{cme}=0.581V_s+229.4$ km/s dengan koefisien korelasi 0.64. Kedua

fenomena tersebut akan berasosiasi bila kecepatan gelombang kejut sebesar $V_s \geq 362$ km/s. Hal tersebut sesuai dengan mekanismenya, yaitu bahwa baik semburan radio maupun CME dipicu oleh lewatnya gelombang kejut.

Hubungan antara kecepatan CME dan durasi semburan radio yang diambil pada rentang frekuensi tertentu (30 MHz-20 MHz) terdapat kecenderungan bahwa bila kecepatan CME meningkat, durasi kejadian semburan menurun dan memiliki hubungan eksponensial $\Delta T_{II} = 8.284 e^{-0.0008V_{cme}}$ menit, dengan koefisien korelasi sebesar 0.66. Hal ini mendukung hipotesis bahwa dengan durasi spektra semburan tipe II yang pendek menunjukkan kecepatan gelombang kejut tinggi dan melewati tebal lapisan korona dalam waktu yang pendek atau sebaliknya.

Korelasi intensitas SXR terhadap kecepatan gelombang kejut yang lebih baik bila dibandingkan dengan korelasi terhadap CME terdeteksi menunjukkan peranan dari lokasi ledakan matahari yang relatif lebih dekat dengan lokasi semburan radio bila dibandingkan dengan lokasi CME terdeteksi.

DAFTAR RUJUKAN

- Caroubalos, C.; Hillaris A.; Bouratzis C.; Alisandrakis C.E.; Preka-papadema P.; Polygiannkis J.; Tsitsipis P.; Kontogeorgos A.; Moussas X.; Bougeret J.L.; Dumas G.; and Perche C., 2004. *Solar type II and type IV radio burts observed during 1998-2000 with the ARTEMIS-IV radio spectrograph*, *Astron. & Astrophys.* 413, 1125-1133.
- Cho, K. S.; Moon Y.J.; Dryer M.; Shanmugaraju A.; Fry C.D.; Kim Y.H.; Bong S.C.; & Park Y. D., 2005. *Examination of Type II Origin with SOHO/LASCO Observations*, *J. Geophys. Res.* 110(A12), A12101.
- Fainberg J.; Evans L.G.; Stone R.G., 1972. *Radio Tracking of Solar Energetic Particles through Interplanetary Space*, *Science* 178, 743.
- LASCO Handbook for Scientific Investigators version 1.0 November 1994 (<http://lasco-www.nrl.navy.mil>).
- Lin R.P.; Potter D.W.; Gurnett D. A.; Scarf F.L., 1981. *Energetic Electrons and Plasma Wave Associated with a Solar Type III Radio Bursts*, *Astrophys. J.* 251, 364 -373.
- Lyman Spitzer, Jr., 1956. *Physics of Fully Ionized Gases*, Interscience Publishers, Inc., New York, Interscience Publisher Ltd., London, 47-55.
- Magara T.; Chen P.; Shibata K.; and Yokoyama T., 2000. *A Unified Model of Coronal Mass Ejection-related Tipe II Radio Bursts* , *Astrophys. J.* 538, L175-L178.
- McKenna-Lawlor S.M.P.; Driyer M.; Smith Z.; Kecskemety K.; Fry C.D.; Sun W.; Deehr C.S.; Berdichevsky D.; Kudela K.; and Zastenker G., 2002. *Arrival times of Flare/Halo CME associated shocks at the Earth: comparison of the predictions of three numerical models with these observations*, *Annales Geophys.* 20, 917-935.

- Melrose D.B., 1985. *Plasma emission mechanism*, Solar Radio Physics, ed. McLean & Labrum, Cambridge Univ. Press. 177-206.
- Nelson G.J.; Melrose D.B., 1985. *Tipe 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.
- Reiner M.J.; Stone R.G., 1986. *Multi-Wavelength Observations of CMEs and Associated Phenomena*, Solar Phys. 104, 92.
- Robinson R.D.; Stewart R.T.; Cane H.V., 1984. *Properties of Metre-Wavelength Solar Radio Bursts Associated with Interplanetary Tipe II Emission*. Solar Phys. 91, 159.
- Suratno, 2008. *Probabilitas Keterkaitan Semburan Radio Matahari tipe II dengan Lontaran Massa Korona*, Majalah Sains dan Teknologi Dirgantara LAPAN, 3(2), 83-89.
- Svestka Z., 1976. *Non Thermal Phenomena, Solar Flares*, D. Reidel Publ. Co., 143-215.
- Wang S.J.; Yan Y.; Fu Q.; Liu Y.; and Chen Z., 2005. *Multi-Wavelength Radio Features Associated with Large CMEs on Oct. 26-28, 2003*, Proceedings IAU Symposium No. 226.