

ANALISIS GELOMBANG EIT DAN LONTARAN MASSA KORONA PADA PERISTIWA FLARE 7 MARET 2012 [ANALYSIS OF EIT WAVE AND CORONAL MASS EJECTION OF THE FLARE EVENT ON MARCH 7, 2012]

Johan Muhamad dan Agustinus Gunawan Admiranto
Peneliti Bidang Matahari dan Antariksa, Pusat Sains Antariksa, Lapan
e-mail: johan_m@bdg.lapan.go.id

ABSTRACT

On March 7, 2012, an X5.4 flare unleashed massive energy in the NOAA active region 11429. Just after the flare started, an amazing EIT wave was dramatically detected by AIA 193 Å instrument onboard Solar Dynamics Observatory (SDO). This obvious phenomenon was followed by another EIT wave triggered by X1.3 flare about an hour later. Both of the waves showed different directions and characteristics. Moreover, the dome-shaped structure appeared in the observation of first EIT wave was spatially corresponded very well with the Coronal Mass Ejection (CME). Result of this research showed that there were coronal fast and slow mode wave in the first EIT wave, but none in the second event. The second event was also not accompanied with the occurrence of CME as its predecessor. These results indicated that EIT wave could be generated by another mechanism beside the CME-driven shock.

Keywords: *EIT wave, CME, Solar radio burst, Flare*

ABSTRAK

Pada tanggal 7 Maret 2012, sebuah *flare* kelas-X5.4 melepaskan energi yang besar pada daerah aktif NOAA 11429. Sesaat setelah *flare* dimulai, sebuah gelombang EIT terdeteksi oleh instrumen AIA 193 Å wahana *Solar Dynamics Observatory* (SDO). Gelombang ini tampak jelas menjalar yang kemudian disusul oleh gelombang EIT berikutnya yang dipicu oleh *flare* kelas X1.3 sekitar satu jam kemudian. Kedua gelombang EIT ini menunjukkan penjalaran gelombang yang memiliki perbedaan arah dan karakteristik satu sama lain. Peristiwa gelombang EIT pertama disertai dengan kemunculan struktur mirip kubah yang berkaitan erat secara spasial dengan peristiwa lontaran massa korona (CME). Hasil analisis menunjukkan adanya gelombang moda cepat dan lambat pada peristiwa pertama yang tidak tampak pada peristiwa kedua. Peristiwa kedua juga tidak disertai dengan CME sebagaimana peristiwa pertama. Hasil ini menyarankan bahwa gelombang EIT dapat dihasilkan oleh mekanisme lain selain gelombang kejut yang diakibatkan oleh CME.

Kata kunci: *Gelombang EIT - lontaran massa korona (CME) - semburan radio Matahari - flare*

1 PENDAHULUAN

Kemunculan gelombang transien di Matahari pertama kali dikemukakan oleh Moreton pada tahun 1960 (Moreton and Ramsey, 1960). Gelombang Moreton diketahui melalui pengamatan Matahari pada filter H- α dan diusulkan oleh Uchida (1968) sebagai muka gelombang kejut *Fast-Mode Magnetohydrodynamic* (MHD). Uchida bahkan memprediksi bahwa gelombang Moreton adalah gelombang pasangan akibat respon di kromosfer oleh gelombang lainnya. Namun, prediksi Uchida ini tidak pernah ditemukan karena keterbatasan peralatan pengamatan pada saat itu. Kemunculan gelombang transien korona seperti yang diprediksi oleh Uchida baru dapat dikonfirmasi pada era beroperasinya instrumen *Extreme Ultra-Violet Imaging Telescope* (EIT) pada satelit *Solar and Heliospheric Observatory* (SOHO) sejak tahun 1996. Gelombang yang teramati pada panjang gelombang Ultraviolet Ekstrem ini kemudian sering dikenal juga sebagai gelombang EIT atau gelombang EUV (Wills-Davey dan Attrill, 2009).

Gelombang EIT adalah penjarangan muka kecerlangan korona pada skala besar yang pada awalnya teramati pada panjang gelombang 195 Å oleh instrumen EIT/SOHO (Thompson et al., 1998; Zhukov et al., 2009). Gelombang ini kadang tampak hampir melingkar dan muncul di sekitar lokasi *flare* atau erupsi daerah aktif (Patsourakos et al., 2009). Karena teramati pada pengamatan di rentang panjang gelombang EUV, gelombang ini sering juga disebut sebagai “gelombang EUV”. Gelombang EIT memiliki kecepatan antara 200-400 km/s dengan rata-rata sebesar 270 km/s (Wills-Davey and Attrill, 2009; Mann et al., 1999). Kecepatan ini jauh di bawah kecepatan gelombang Moreton yang mencapai sekitar 1000 km/s (Moreton and Ramsey, 1960). Gelombang EIT selama ini diamati oleh beberapa instrumen pada beberapa satelit, seperti EIT/SOHO, *Transition Region and Coronal Explorer* (TRACE), *Extreme Ultraviolet Imager* pada wahana *Solar Terrestrial Relations Observatory* (EUVI/STEREO), dan *Atmospheric Imaging Assembly* pada wahana *Solar Dynamics Observatory* (AIA/SDO). Penelitian mengenai gelombang EIT banyak berkembang melalui analisis data EIT dan TRACE, sedangkan data dari EUVI dan AIA relatif masih cukup sedikit karena kedua instrumen ini cenderung masih belum lama beroperasi (Zhukov, 2011; Grechnev et al., 2011a).

Hingga saat ini, mekanisme kemunculan gelombang EIT dan kaitannya dengan aktivitas Matahari lainnya masih menjadi kontroversi. Bahkan, beberapa peneliti menganggap bahwa gelombang EIT bukanlah benar-benar “gelombang” seperti yang umum diketahui dalam fisika. Penjelasan awal mengenai gelombang EIT sebagai gelombang kejut diperkuat dengan terjadinya refleksi gelombang EIT akibat adanya lubang korona yang membuktikan bahwa fenomena transien EIT benar-benar sebuah fenomena gelombang (Gopalswamy et al., 2009). Hingga saat ini banyak peneliti pendukung teori ini membuktikan melalui pengamatan dan simulasi bahwa gelombang EIT adalah manifestasi dari gelombang kejut di korona (Grechnev et al., 2011a; Grechnev et al., 2011b; Afanasyev and Uralov, 2011; Zhukov, 2011).

Interpretasi lainnya akan mekanisme fisis gelombang EIT mengungkapkan bahwa gelombang ini bukanlah murni suatu gelombang melainkan suatu jejak penjarangan berskala besar yang berkaitan dengan CME. Penjarangan ini lebih sesuai jika dikatakan sebagai gelombang semu (*pseudo-wave*). Pada model ini, gelombang semu diartikan sebagai proyeksi pada piringan Matahari dari struktur arus yang meliputi tabung fluks sebuah CME (Delannée et al., 2008). Dengan menggunakan model tabung fluks MHD 3-D, Delannée et al. (2008) mengusulkan gagasan bahwa arus tersebut berkaitan dengan

disipasi ohmik yang memicu pemanasan korona. Pemanasan ini kemudian mengakibatkan peningkatan intensitas radiasi EUV dari muka gelombang (Patsourakos et al., 2009).

Model lainnya adalah model hibrida yang menggabungkan model gelombang dan gelombang semu (Chen et al., 2002). Model ini didasarkan pada erupsi tabung fluks yang kemudian menghasilkan dua jenis gelombang yaitu: gelombang super cepat (gelombang kejut super-Alfvénik) yang diidentifikasi sebagai pasangan gelombang Moreton; serta gelombang semu yang lebih lambat dan berkaitan dengan medan magnet terbuka yang muncul setelah erupsi tabung fluks. Gelombang semu inilah yang diidentifikasi sebagai gelombang EIT yang dihasilkan oleh kompresi plasma akibat ekspansi plasma. Kemungkinan lainnya dari gelombang semu ini dihasilkan oleh rekoneksi lanjutan ekspansi CME berskala luas dan struktur *loop* yang lebih kecil pada bagian Matahari yang tenang (Attrill et al., 2007). Rekoneksi ini mengakibatkan peningkatan pemanasan korona yang pada akhirnya akan meningkatkan intensitas muka kecerlangan (*bright-front*) (Patsourakos et al., 2009).

Penyelidikan mutakhir dengan menggunakan data STEREO dan SDO menunjukkan bahwa pada gelombang EIT terdapat fitur cepat dan lambat. Fitur gelombang cepat pada penalaran gelombang EIT diidentifikasi sebagai “gelombang asli”, sedangkan fitur lambat merupakan “gelombang semu”. Gelombang EIT cepat merupakan gelombang MHD moda cepat yang bersesuaian dengan gelombang Moreton di kromosfer. Sementara itu, gelombang EIT lambat merupakan fenomena yang kemudian dikenal sebagai gelombang EIT pada era SOHO (Asai et al., 2012; Kumar et al., 2012, Chen dan Wu, 2011; Liu et al., 2010). Beberapa pengamatan juga mengungkap adanya struktur berbentuk kubah saat gelombang EIT terjadi. Struktur ini sangat berkaitan dengan peristiwa CME dan dapat dijelaskan melalui simulasi pemodelan (Patsourakos dan Vourlidas, 2012).

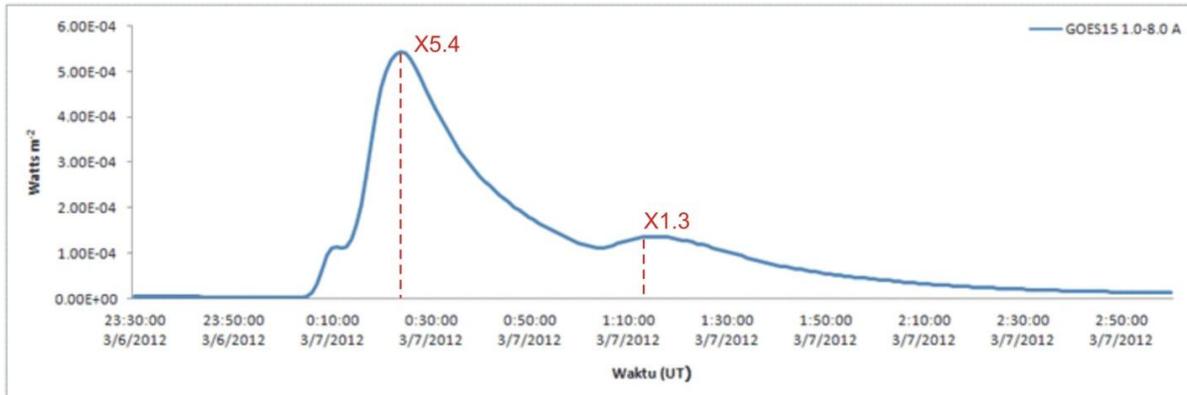
Peristiwa *flare* kelas X5.4 dan X1.3 yang terjadi pada tanggal 7 Maret 2012 menjadi salah satu fenomena yang sangat penting untuk dikaji secara mendalam oleh peneliti fisika Matahari. Selain menjadi salah satu *flare* terbesar sepanjang siklus 24, pada peristiwa ini muncul juga gelombang EIT dan semburan radio. Kemunculan jenis manifestasi gelombang kejut berbeda pada waktu yang sama ini dapat sangat berharga karena dapat membantu peneliti dalam memahami bagaimana keterkaitan peristiwa ini secara fisis. Dengan pengamatan gelombang EIT melalui instrumen AIA pada wahana SDO yang memiliki resolusi spasial dan temporal yang sangat baik, fenomena gelombang EIT dapat dikaji secara lebih akurat. Pada penelitian ini, peristiwa gelombang EIT yang muncul secara beruntun pada tanggal 7 Maret 2012 akan dianalisis secara seksama dan akan dibandingkan dengan pengamatan CME. Dari penelitian ini, diharapkan dapat diperoleh gambaran bagaimana mekanisme gelombang EIT dapat terjadi secara berbeda antara satu peristiwa dan peristiwa yang lain.

2 DATA

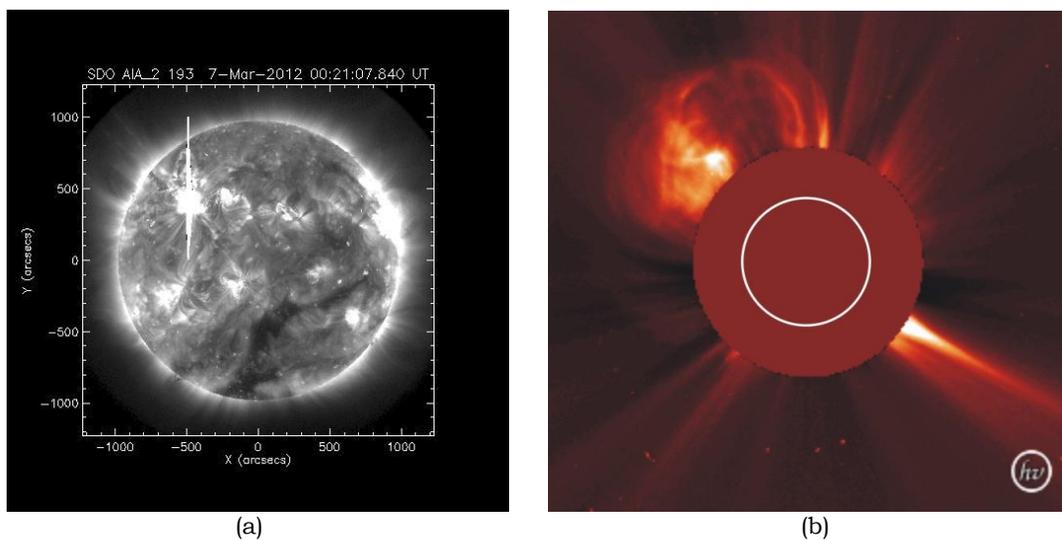
Data fluks sinar-X dari Matahari diperoleh dari hasil pengamatan satelit GOES 15 yang disediakan oleh NOAA/SWPC dan diunduh melalui SWENET (<http://www.esa-spaceweather.net/swenet/>). Dari pengamatan satelit GOES 15, terekam adanya peristiwa pelepasan energi dari Matahari dalam panjang gelombang sinar-X dua kali secara beruntun (Gambar 2-1). Pengamatan Matahari dari instrumen AIA pada wahana SDO menunjukkan bahwa *flare* tersebut berasal dari daerah aktif 11429 pada katalog NOAA yang terletak di belahan timur Matahari pada koordinat (N18E31). Peningkatan pertama

terjadi mulai pukul 00:02 UT dan mencapai puncak fluks $5.43 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$ pada pukul 00:24 UT. Pelepasan energi sebesar ini menandai terjadinya *flare* kelas X5.4. *Flare* ini menjadi salah satu *flare* terbesar sepanjang siklus 24. Saat fluks sinar-X mulai menurun pasca mencapai puncaknya, tidak lama berselang terjadi peningkatan fluks pada pukul 01:05 UT dan mencapai puncaknya hingga $1.37 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$ pada pukul 01:14 UT. Kenaikan fluks ini menandai terjadinya *flare* kelas X1.3.

Sementara itu, data pengamatan Matahari berupa citra diperoleh dari instrumen AIA pada wahana SDO yang diperoleh dari *Virtual Solar Observatory (VSO) directory* melalui *SolarSoftWare routine (SSW)*. Data yang diperoleh berupa data level 1 AIA (4096 x 4096 piksel) pada panjang gelombang 193 Å. Penggunaan data dari panjang gelombang ini umum digunakan untuk analisis gelombang EIT karena gelombang ini pada awalnya ditemukan dari citra pengamatan Matahari pada panjang gelombang 191 Å oleh instrumen EIT wahana SOHO (Thompson et al., 1998). Pada penelitian ini digunakan data citra dengan jeda antar pengamatan (*cadence*) dua menit. Pada peristiwa *flare* pertama digunakan data antara pukul 00:01-01:01 UT sebanyak 31 citra, dan pada peristiwa *flare* kedua digunakan data Antara pukul 01:03-02:01 UT sebanyak 30 citra.



Gambar 2-1: Fluks sinar-X dari satelit GOES 15 pada tanggal 6 dan 7 Maret 2012. Terlihat puncak *flare* X5.4 terjadi pada pukul 00:24 UT disusul *flare* X1.3 pada pukul 01:14 UT

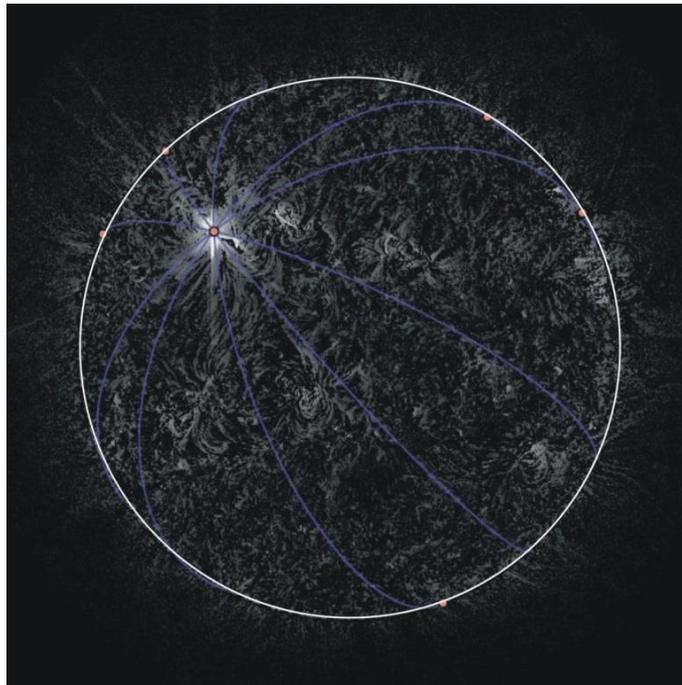


Gambar 2-2: (a) Peristiwa *flare* X5.4 terekam oleh instrumen AIA/SDO pada panjang gelombang 193 Å. (b) Peristiwa ini diikuti oleh CME yang teramati oleh kamera C2 LASCO/SOHO (helioviewer.org)

Sementara itu, data lontaran massa korona (CME) diperoleh dari citra instrumen *Large Angle and Spectrometric Coronagraph* (LASCO) pada wahana SOHO yang tersedia di CDAW Data Center, NASA (<http://cdaw.gsfc.nasa.gov/>). Data CME ini berupa data citra diam dan gambar bergerak, serta data ketinggian terhadap waktu dari CME. Untuk data *quick-look* kejadian CME pada saat berlangsungnya diperoleh dari heliowiewer (heliowiewer.org).

3 METODOLOGI

Dalam analisis fenomena gelombang EIT, data citra AIA dalam format fits dari VSO diolah dengan menggunakan SSW dengan melakukan persiapan data yang terdiri dari proses translasi, rotasi, dan *scaling* citra (Brown et al., 2011). Setelah citra untuk setiap pengambilan waktu siap, langkah berikutnya adalah membuat gambar diferensial dari satu citra ke citra lain. Pembuatan gambar diferensial dilakukan agar fitur gelombang EIT dapat tampak dengan jelas. Gambar diferensial dibuat dengan mengurangi gambar satu dengan gambar yang lainnya. Dalam penelitian ini, pembuatan gambar diferensial dilakukan dengan mengurangi gambar di suatu waktu dengan gambar pertama (basis) yang dikenal sebagai *based/fixed difference image*. Koreksi terhadap rotasi diferensial Matahari tidak dilakukan karena waktu kejadian yang relatif singkat (1 jam) sehingga efek rotasi dapat diabaikan. Untuk kemunculan gelombang EIT pertama, digunakan citra pukul 00:01 UT sebagai referensi (*base image*), sedangkan untuk gelombang EIT kedua digunakan citra pukul 01:01 UT.



Gambar 3-1: Titik polar buatan yang berpusat di lokasi *flare* pada citra diferensial sebagai alat bantu analisis penjalaran gelombang EIT untuk mengeliminasi efek geometri

Untuk memperkecil subjektivitas, dilakukan proses analisis dengan mengikuti sistematika Podladchikova dan Berghmans (2005) seperti yang dilakukan oleh Liu et al. (2010). Caranya adalah dengan menjadikan titik pusat *flare* sebagai pusat polar yang baru dengan garis-garis bujur dari pusat polar baru menandakan jalur lintasan gelombang

pada suatu garis. Teknik ini dapat mengeliminasi efek proyeksi sferis Matahari dalam pengambilan lintasan (Gambar 3-1). Dengan cara mengiris satu lintasan dari setiap citra yang berurutan dan menyajarkannya pada satu sumbu waktu, maka akan diperoleh profil irisan-waktu (*time-slice*). Irisan-waktu dapat mempermudah pengenalan akan perubahan gerak yang terjadi pada suatu lintasan dari waktu ke waktu. Melalui teknik ini, keberadaan gelombang EIT dapat diidentifikasi sebagai garis diagonal dengan kemiringan garis menandakan kecepatannya.

Analisis penjalaran gelombang EIT dari citra AIA/SDO dibandingkan dengan lontaran massa korona (CME) yang diperoleh dari citra LASCO. Citra LASCO diperlukan untuk menentukan adanya CME dan pada arah mana CME tersebut terlontar. Analisis citra LASCO juga sangat diperlukan untuk mengetahui keterkaitan spasial antara penjalaran gelombang EIT dan CME saling terkait satu sama lain. Analisis keterkaitan CME dan gelombang EIT juga ditinjau dari kecepatannya. Dengan meninjau kecepatan kedua peristiwa, diharapkan dapat diketahui apakah kedua peristiwa ini saling terkait atau tidak.

4 HASIL DAN PEMBAHASAN

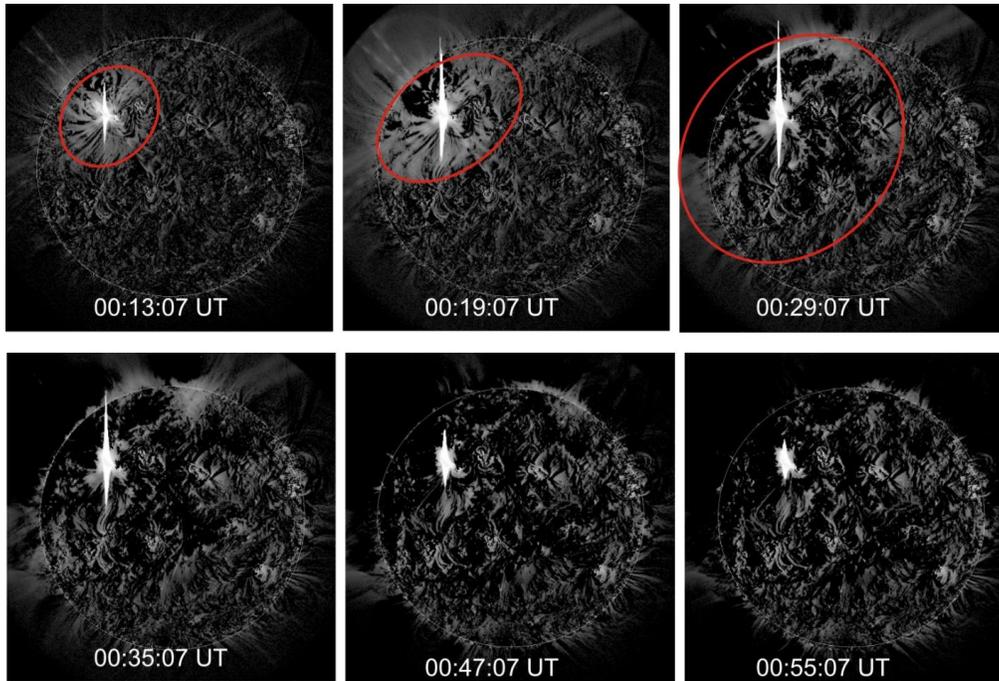
4.1 Flare X5.4 Waktu 00.00-01.00 UT

Pada peristiwa *flare* pertama yang mulai terjadi pada pukul 00:02 UT, gelombang EIT teramati pertama kali pada citra diferensial pukul 00:05 UT. Dalam beberapa citra berikutnya, tampak gelombang EIT menjalar ke semua arah yang ditandai dengan penjalaran muka kecerlangan putih di permukaan Matahari dan ekspansinya ke arah tegak lurus daerah aktif mendekati pengamat. Penjalaran muka gelombang EIT ke segala arah ini ditandai dengan lingkaran merah pada Gambar 4-1. Pada citra setelah pukul 00:31 UT, batas muka gelombang EIT menjadi semakin sulit untuk ditentukan karena kecerlangan muka gelombang sudah semakin memburur dengan kecerlangan latar belakang. Akibatnya, pada citra berikutnya sangat sulit untuk melakukan analisis penjalaran gelombang EIT secara akurat. Dari rangkaian citra diferensial dapat diketahui bahwa gelombang EIT terdeteksi beberapa saat setelah *flare* terdeteksi dan masih berlangsung hingga puncak *flare* terjadi.

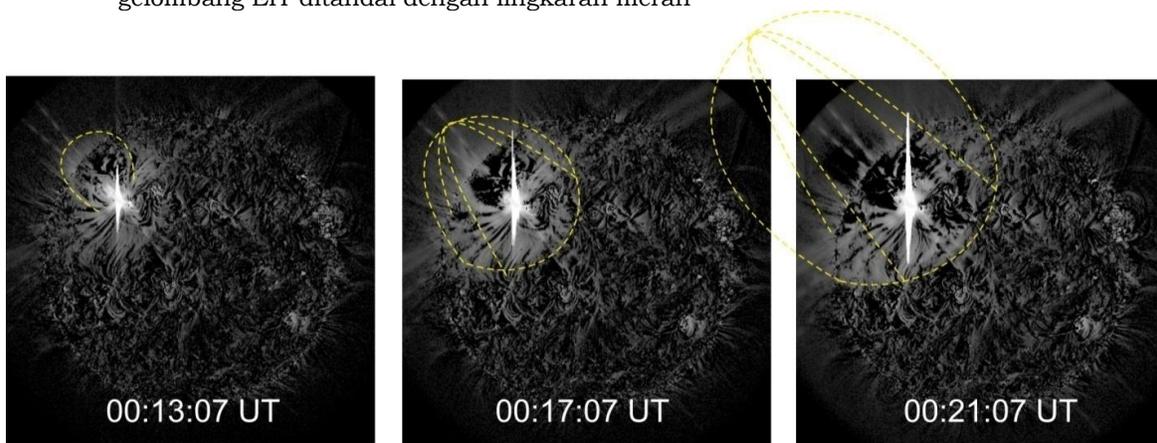
Pengamatan gelombang EIT berdasarkan analisis citra diferensial untuk kejadian *flare* mengindikasikan adanya struktur berbentuk kubah di atas daerah aktif tempat kejadian *flare*. Struktur ini tampak jelas teramati dari citra diferensial, khususnya pada citra pada pukul 00:09 UT hingga 00:25 UT, sampai akhirnya tidak teramati dengan jelas karena ekspansi kubah sudah terlalu jauh dari medan pandang kamera AIA. Struktur kubah yang teramati dari citra diferensial ditandai pada beberapa sampel rangkaian citra diferensial Matahari dengan garis putus-putus kuning pada Gambar 4-2.

Dengan berjalannya waktu, struktur berbentuk kubah tersebut tampak mengembang atau berevolusi menjadi semakin besar. Tampak bahwa pertemuan kaki kubah dengan permukaan Matahari bersesuaian dengan muka gelombang EIT. Dengan menghitung kecepatan ekspansi puncak kubah dalam arah radial pada arah tegak lurus lokasi *flare* dan mempertimbangkan efek geometri pada citra, kecepatan ekspansi kubah diperkirakan bernilai antara 870-900 km/s pada awal kejadian gelombang EIT. Jarak puncak kubah diperoleh dengan membandingkan panjang garis dari pusat bola Matahari ke puncak kubah dengan jarak pusat *flare* ke pusat bola Matahari yang diasumsikan proporsional dengan radius Matahari. Kecepatan ini meningkat dengan percepatan sekitar

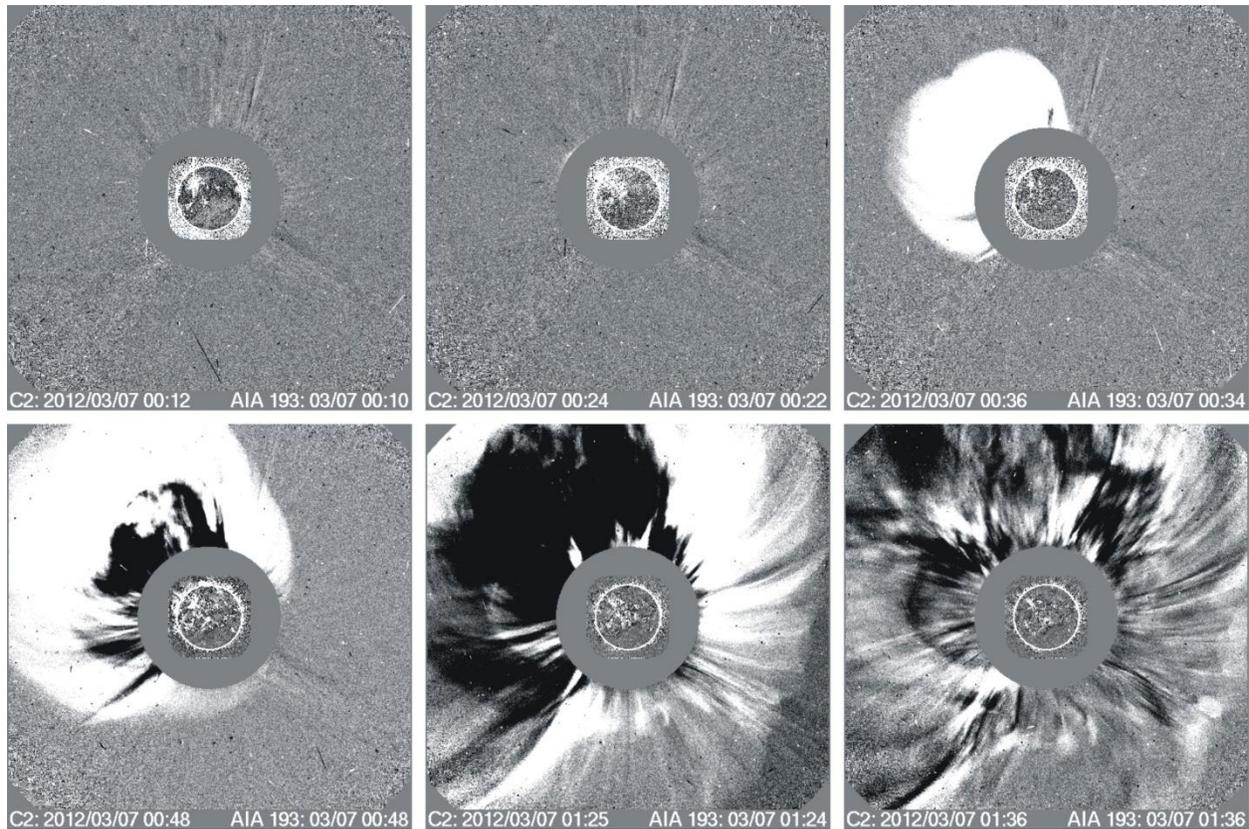
14 km/s² pada rangkaian citra berikutnya hingga struktur kubah tidak teramati. Kemungkinan keterkaitan ekspansi struktur kubah ini dengan kejadian lontaran massa korona (CME) dapat dilihat dari Gambar 4-3. Pada Gambar 4-3, citra diferensial dari AIA 193 A disuperposisi dengan citra diferensial pengamatan LASCO C2 pada waktu yang sama. Perhitungan dari CDAW memberikan kecepatan rata-rata CME tersebut sebesar 2684.4 km/s. Berdasarkan gambar ini pula, dapat dilihat bahwa lontaran massa korona terlontar dari Matahari beberapa saat setelah struktur atas kubah keluar dari medan pandang AIA. Kesesuaian antara ketinggian CME dan ketinggian struktur kubah mengindikasikan bahwa CME yang tampak pada LASCO merupakan manifestasi yang sama dengan struktur kubah pada AIA.



Gambar 4-1: Evolusi penjaralan gelombang EIT dari waktu ke waktu pada peristiwa *flare* X5.4. Muka gelombang EIT ditandai dengan lingkaran merah



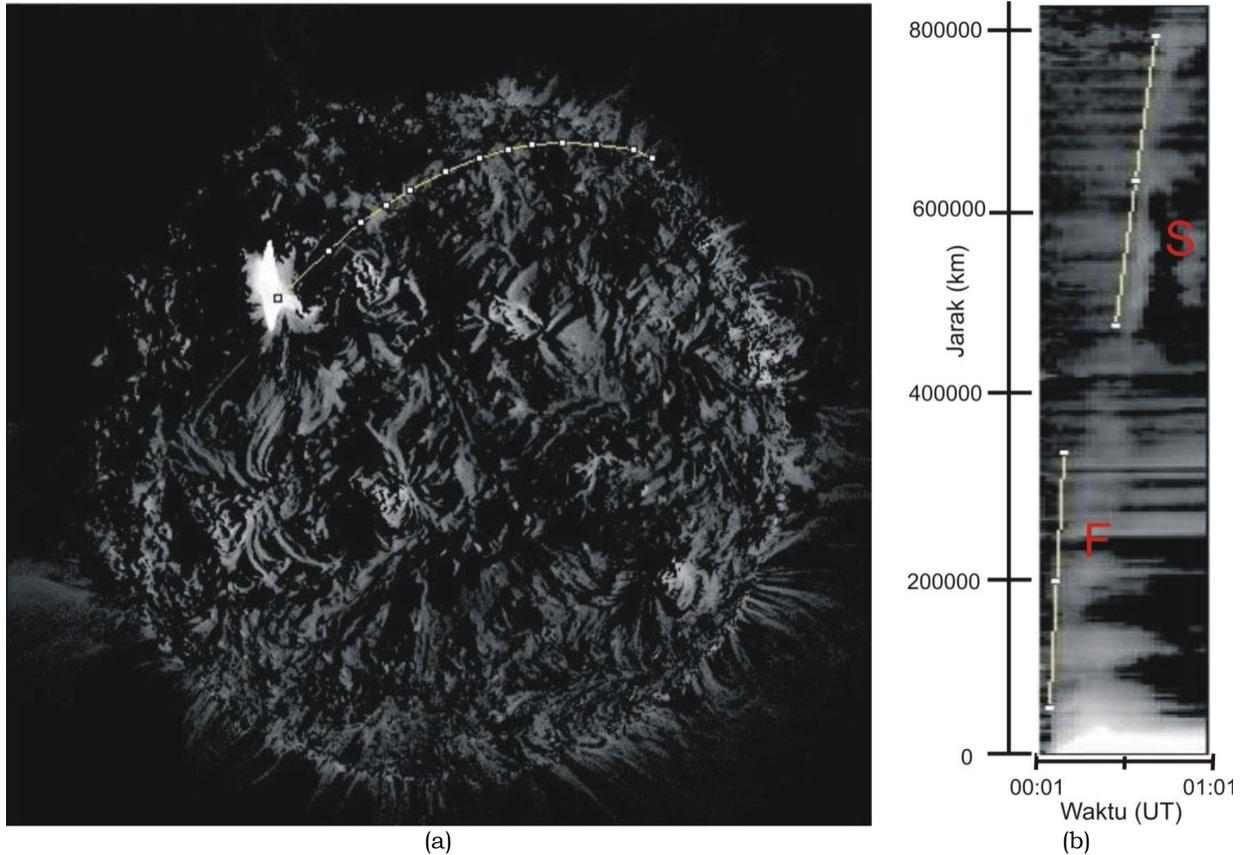
Gambar 4-2: Kemunculan struktur kubah yang bersesuaian dengan gelombang EIT pada peristiwa *flare* X5.4 dan CME ditampilkan dengan garis putus-putus kuning. Struktur bagian atas kubah pada pukul 00:21:07 UT dibuat dengan melakukan ekstrapolasi atas struktur bawah kubah yang masih teramati di dalam medan pandang AIA



Gambar 4-3: Citra diferensial peristiwa CME yang menyertai *flare* X5.4 terekam oleh kamera C2 LASCO/SOHO yang disuperposisi dengan gambar Matahari di dalam koronagraf dari AIA/SDO 193 Å

Kemungkinan arah gerak radial struktur kubah dan CME yang sama-sama mengarah ke arah timur laut pada bidang gambar juga mengindikasikan bahwa struktur kubah dan CME bisa jadi merupakan fenomena yang sama. Analisis dari CDAW menunjukkan bahwa CME memiliki arah sudut posisi (*position angle*) sebesar 56 derajat. Dari Gambar 4-3 tampak bahwa CME ini pada mulanya terlontar dengan lebar sudut (*angular width*) tertentu yang kemudian menjadi semakin besar dan pada akhirnya mengarah ke seluruh penjuru sehingga tampak sebagai CME halo.

Untuk menghitung kecepatan gelombang EIT yang menyisir piringan Matahari, dilakukan analisis irisan-waktu (*time-slice*). Irisan-waktu dibuat dari pusat *flare* ke arah penjalaran gelombang EIT yang tampak jelas. Arah irisan pada piringan Matahari yang digunakan sebagai acuan analisis ditunjukkan oleh garis pada Gambar 4-4 (a). Hasil irisan lintasan selama satu jam, sejak pukul 00:01 UT hingga 01:01 UT, ditunjukkan pada Gambar 4-4 (b). Dengan analisis ini dapat diidentifikasi kemunculan dua gelombang yang bergerak dengan kecepatan berbeda. Hal ini ditunjukkan dengan kemunculan dua garis dengan kemiringan (*gradien*) yang berbeda. Pada awal kemunculan gelombang EIT, tampak adanya gelombang dengan kecepatan tinggi (F). Sementara pada sekitar pertengahan kedua tampak gelombang dengan kecepatan yang lebih lambat (S).

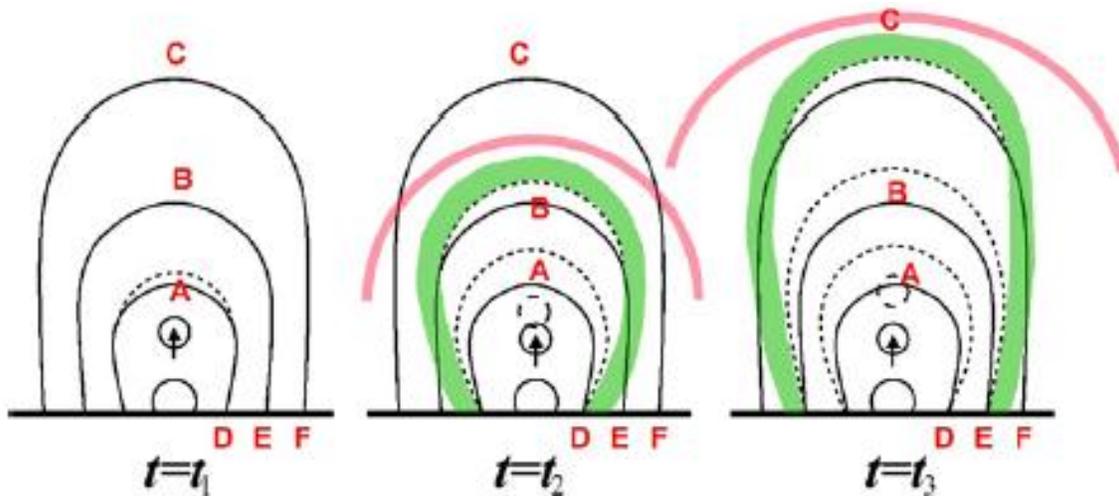


Gambar 4-4: Garis lingkaran besar (*great circle*) yang digunakan untuk menganalisis penjarangan gelombang EIT pada peristiwa *flare* kelas X5.4 (a). Irisan-waktu dari citra sepanjang lingkaran besar antara pukul 00.01 UT hingga 01.01 UT (b). Tampak hasil identifikasi pola penjarangan gelombang EIT ditandai dengan huruf F (*fast*) untuk muka gelombang yang cepat, dan S (*slow*) untuk yang lambat

Perhitungan kecepatan muka gelombang EIT berdasarkan analisis gradien garis pada Gambar 4-4 (b) menghasilkan besar kecepatan gelombang EIT cepat (F) sebesar $V_f = 771$ km/s. Sementara itu, kecepatan gelombang EIT pada moda yang lambat (S) dihitung sebesar $V_s = 377$ km/s. Dari hasil ini dapat diketahui bahwa kecepatan gelombang moda cepat (F) sedikit lebih rendah dari kecepatan ekspansi radial struktur kubah pada waktu-waktu awal kubah teramati. Ini dapat berarti bahwa struktur kubah yang mewakili penjarangan gelombang kejut dari Matahari berasosiasi dengan gelombang moda cepat (F). Sedangkan gelombang moda lambat (S) yang bernilai kurang dari setengah gelombang moda cepat (F) berasosiasi dengan terminologi gelombang EIT yang biasa digunakan, yakni penjarangan gelombang pada pengamatan EUV yang nilainya sekitar sepertiga dari gelombang Moreton. Temuan ini konsisten dengan hasil yang diperoleh oleh Chen (2009) dan Asai et al. (2012). Adapun nilai kecepatan gelombang EIT yang sekira sepertiga dari gelombang Moreton telah lama diketahui berdasarkan analisis statistika kedua jenis kejadian tersebut (Okamoto et al., 2004; Zhang et al., 2011).

Dengan menggunakan teori *Successive Field-Line Stretching* (SFLS) (Chen, 2009), kemunculan struktur kubah, dan dua moda gelombang dapat dijelaskan (Gambar 4-5). Pertama, muka CME yang terdorong akan menyebabkan gangguan ke segala arah sehingga menyebabkan gelombang kejut melalui mekanisme *piston-driven* (garis merah

muda). Tekanan dari ledakan CME menyebabkan garis medan magnet terdorong dan merentang satu per satu ke arah luar. Perentangan ini bermula dari sebelah atas, titik A, kemudian bergerak dalam arah radial dengan kecepatan gelombang MHD moda cepat. Perentangan menjalar ke bagian bawah kaki struktur (titik D) dengan kecepatan gelombang Alfvén. Peristiwa ini kemudian berlanjut pada titik B dan seterusnya ke E, dan berlanjut ke titik-titik berikutnya sehingga menjalar menjauhi pusat (kernel) dari erupsi CME. Untuk lebih jelasnya, mekanisme model ini dapat dilihat pada makalah Chen (2009).

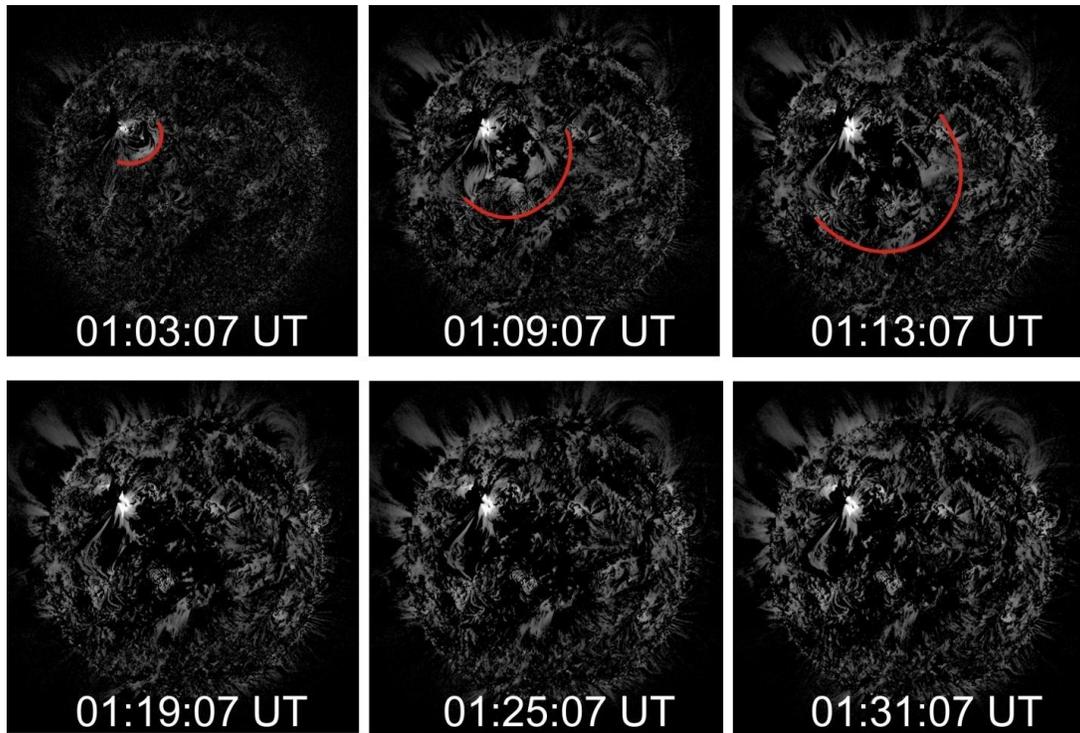


Gambar 4-5: Pembentukan dan penjalaran gelombang kejut dan gelombang EIT akibat terjadinya CME berdasarkan model *successive field-line stretching* (Chen, 2009)

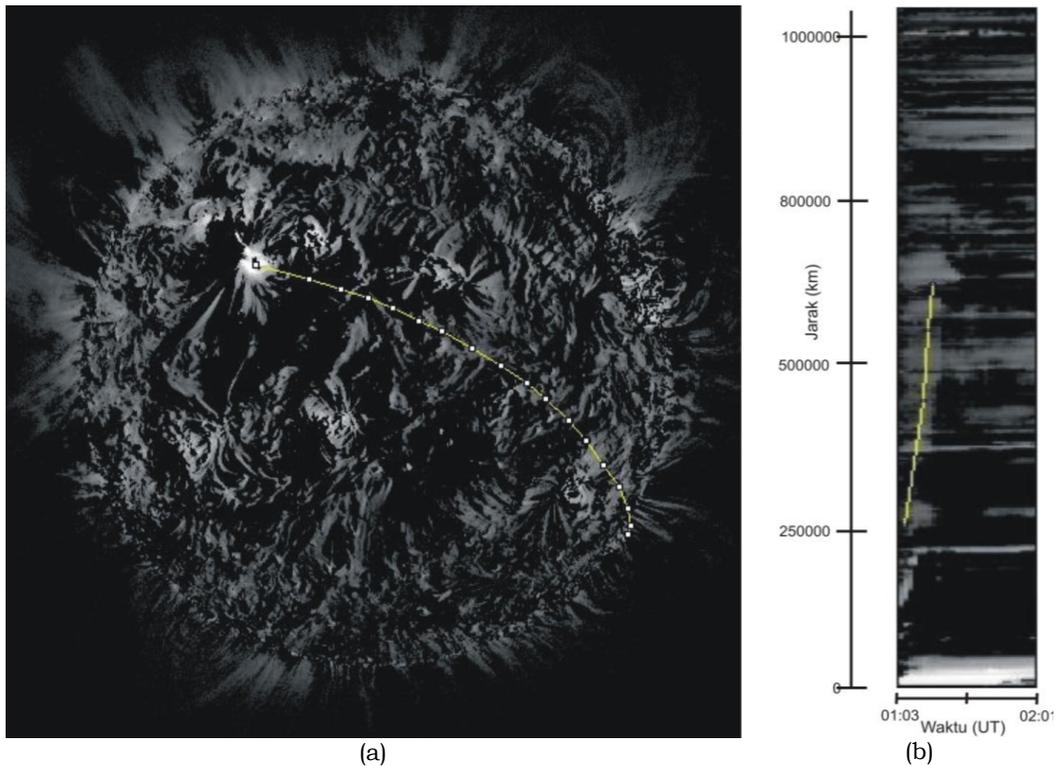
Model SFLS mampu menjelaskan kaitan gelombang EIT dengan lontaran massa korona (CME). Model ini juga dapat menjelaskan terbentuknya struktur kubah yang lebih cepat berekspansi ke arah radial dibandingkan arah horizontal. Dengan menggunakan model ini, maka munculnya gelombang EIT moda cepat (F) dapat ditafsirkan sebagai gelombang kejut yang menjalar dengan kecepatan gelombang MHD moda cepat (garis merah muda), dan gelombang EIT moda lambat (S) sebagai gelombang EIT pada arah lateral (garis hijau) di titik-titik D, E, dan F. Gelombang ini kemungkinan akan termanifestasi sebagai gelombang Moreton pada pengamatan H- α , tetapi sayangnya kami tidak memiliki data pengamatan H- α untuk kejadian tersebut.

4.2 Flare X1.3 Waktu 01.00-02.00 UT

Peristiwa gelombang EIT kedua teramati sekitar satu jam setelah peristiwa pertama yang terkait dengan *flare* X1.3. Meskipun tidak sejelas peristiwa pertama, penjalaran gelombang EIT tampak muncul pada arah barat daya. Penjalaran ini tidak tampak jelas dalam waktu yang lama karena setelah belasan menit, muka gelombang EIT membaaur dengan gangguan latar belakang di piringan Matahari. Muka gelombang EIT ditandai dengan garis merah (Gambar 4-6). Gelombang EIT ini berbeda dengan peristiwa pertama, dengan arah penjalaran yang tidak melingkar ke segala arah. Peristiwa ini juga tidak ditandai dengan kemunculan CME. Selain itu, tidak tampak struktur kubah pada citra AIA sebagaimana yang tampak pada peristiwa pertama.



Gambar 4-6: Citra diferensial evolusi penjaralan gelombang EIT pada peristiwa flare homolog kedua kelas X1.3. Tampak gelombang EIT hanya mengarah ke arah barat daya



Gambar 4-7: Lingkaran besar (*great circle*) yang digunakan untuk menganalisis penjaralan gelombang EIT pada peristiwa flare kelas X1.3 (a). Irisan-waktu dari citra sepanjang lingkaran besar antara pukul 01.03UT hingga 02.01 UT (b). Tampak hasil identifikasi pola penjaralan gelombang EIT ditandai dengan garis kuning

Pada analisis kecepatan gelombang EIT pada peristiwa ini, dilakukan juga teknik analisis irisan waktu seperti halnya pada peristiwa pertama. Pada analisis ini, arah lintasan irisan diambil ke arah barat daya sebagaimana arah gelombang EIT yang tampak sebagai garis pada Gambar 4-7a. Dari analisis irisan waktu (Gambar 4-7b), tampak hanya ada satu jenis gelombang yang muncul yang ditandai dengan hanya ditemukan satu gradien garis. Dari perhitungan kemiringan garis diketahui bahwa kecepatan gelombang EIT tersebut sebesar 576 km/s. Nilai ini lebih rendah daripada kecepatan gelombang moda cepat (F) pada peristiwa pertama, tetapi masih lebih cepat daripada kecepatan gelombang moda lambat (S). Namun, untuk mengetahui apakah ini merupakan penjarangan gelombang MHD moda cepat atau bukan sangat sulit karena tidak adanya fenomena CME yang teramati.

Tidak adanya peristiwa CME yang teramati pada peristiwa kedua dan penjarangan gelombang EIT yang hanya tampak parsial ke arah tertentu menjadikan analisis lebih lanjut sulit dilakukan. Terjadinya peristiwa gelombang EIT pada peristiwa kedua yang hanya berselang beberapa saat setelah peristiwa pertama diduga menjadi sebab sulit teramatinya penjarangan gelombang EIT dan CME. Struktur medan magnet lokal daerah aktif dan global di Matahari yang belum sepenuhnya stabil menyebabkan mekanisme kemunculan gangguan akibat dorongan peregangan garis gaya magnet tidak teramati secara jelas. Masih belum stabilnya kondisi plasma di korona akibat peristiwa CME pada peristiwa pertama juga kemungkinan menyebabkan kondisi latar belakang tidak cukup konduktif untuk menghasilkan muka kecerlangan gelombang EIT. Namun, jika memang tidak ada CME pada peristiwa kedua, berarti terdapat mekanisme lain yang menyebabkan gelombang EIT hanya tampak ke arah barat daya. Penyebab tersebut belum dapat sepenuhnya dipahami.

5 KESIMPULAN

Telah terjadi dua peristiwa gelombang EIT pada tanggal 7 Maret 2012 yang berkaitan dengan *flare* X5.8 dan X1.3. Kedua peristiwa ini memiliki karakteristik yang berbeda dan menjadi studi kasus yang sangat baik dalam menguji model kemunculan gelombang EIT yang saat ini telah banyak diusulkan. Pada kasus pertama, gelombang EIT tampak menjalar secara sferis ke segala arah dalam arah lateral piringan Matahari dan juga memunculkan struktur kubah dalam arah vertikal. Hasil analisis diferensial citra Matahari menunjukkan bahwa struktur kubah memiliki keterkaitan erat dengan CME secara spasial maupun temporal. Hasil ini mengindikasikan bahwa struktur kubah yang teramati pada citra diferensial EIT merupakan struktur yang sama dengan CME saat fase paling awal yang tidak teramati oleh LASCO. Hasil analisis juga menunjukkan bahwa bagian kaki struktur kubah bersesuaian dengan gelombang EIT moda cepat.

Mekanisme kejadian gelombang EIT pertama dapat dijelaskan dengan baik melalui model *successive field-line stretching*. Dengan menggunakan model ini, bagian atas struktur kubah dapat diinterpretasikan sebagai muka CME yang berkaitan dengan gelombang kejut akibat mekanisme *piston-driven*. Gelombang kejut ini menjalar dengan kecepatan gelombang MHD moda cepat dan berasosiasi dengan gelombang EIT moda cepat (F) di arah horizontal. Sementara itu, gelombang EIT moda lambat muncul kemudian sebagai akibat dari peregangan garis-garis gaya magnet yang terjadi secara berurutan (*successive*).

Pada peristiwa kedua, gelombang EIT hanya tampak parsial pada arah tertentu dan tidak tampak ke segala arah. Pada peristiwa kedua juga tidak tampak adanya struktur kubah. Pengamatan LASCO juga menunjukkan tidak tampaknya CME yang bersesuaian dengan *flare* X1.3. Adanya kejadian CME dan gelombang EIT pada peristiwa pertama yang menyebabkan struktur medan magnet dan plasma di kromosfer dan korona Matahari menjadi tidak stabil diduga menjadi sebab keadaan di korona tidak isotropis sehingga gelombang EIT tidak muncul ke segala arah. Namun, tidak adanya CME pada peristiwa kedua menghadirkan pertanyaan mengenai mekanisme terjadinya gelombang EIT yang tidak dapat dijelaskan oleh model SFLS yang sangat menekankan perlunya keberadaan CME dalam menginisiasi kemunculan gelombang EIT. Tampaknya terdapat mekanisme lain yang juga dapat menyebabkan terjadinya gelombang EIT selain gelombang kejut akibat CME. Studi mengenai mekanisme-mekanisme lain untuk menjelaskan kemunculan gelombang EIT pada peristiwa kedua sangat prospektif untuk dilakukan.

DAFTAR RUJUKAN

- Afanasyev, An. N., dan Uralov, A. M., 2011. *Coronal Shock Waves, EIT Waves, and Their Relations to CMEs II. Modeling MHD Shock Wave Propagation Along the Solar Surface by Using Non-linear Geometrical Acoustics*, Solar Physics DOI: 10.1007/s11207-011-9730-9.
- Asai, A., Ishii, T. T., Isobe, H., Kitai, R., Ichimoto, K., Ueno, S., Nagata, S., Morita, S., Nishida, K., Shiota, D., Oi, A., Akioka, M., Shibata, K., 2012. *First Simultaneous Observation of an Ha Moreton Wave, EUV wave, and Filament/Prominence Oscillations*, The Astrophysical Journal Letters, 745: L18 (6pp).
- Attrill, G. D. R., Harra, L. K., van Driel-Gesztelyi, L., Demoulin, P., 2007. *Coronal "Wave": Magnetic Footprint of a Coronal Mass Ejection?*, The Astrophysical Journal, vol. 656, L101.
- Brown, D., Regnier, S., Marsh, M., Bewsher, D., 2012. *Working with Data from the Solar Dynamics Observatory version 1.2*, University of Central Lancashire.
- Chen, P. F., 2009. *The Relation Between EIT Waves and Coronal Mass Ejections*, The Astrophysical Journal, 698: L112-L115.
- Chen, P. F., dan Wu, Y., 2011. *First Evidence of Coexisting EIT Wave and Coronal Moreton Wave from SDO/AIA Observation*, The Astrophysical Journal Letters, 732: L20 (5pp).
- Chen, P. F., Wu, S. T., Shibata, K., Fang, C., 2002. *Evidence of EIT and Moreton Waves in Numerical Simulation*, The Astrophysical Journal, Vol. 572, L99-L102.
- Delannée, C., Torok, T., Aulanier, G., Hochedez, J.-F., 2008. *A New Model for Propagating Parts of EIT Waves: A Current Shell in a CME*, Solar Physics, 247: 123-150.
- Gopalswamy, N., Yashiro, S., Temmer, M., Davila, J., Thompson, W. T., Jones, S., McAteer, R. T. J., Wuesler, J.-P., Freeland, S., 2009. *EUV Wave Reflection from a Coronal Hole*, Astrophysical Journal, vol. 691 no. 2, pp. L123-L127.
- Grechnev, V. V., Afanasyev, An. N., Uralov, A. M., Chertok, I. M., Kuzmenko, I. V., Eselevich, M. V., Eselevich, V. G., Rudenko, G. V., Kubo, Y., 2011b. *Coronal Shock Waves, EIT Waves, and Their Relations to CMEs III. Shock Associated CME/EIT Wave in an Event with a Two-Component EIT Transient*, Solar Physics 10.1007/s11207-011-9781-y.
- Grechnev, V. V., Uralov, A. M., Chertok, I. M., Kuzmenko, I. V., Afanasyev, An. N., Meshalkina, N. S., Kalashnikov, S. S., Kubo, Y., 2011a. *Coronal Shock Waves, EIT*

- Waves, and Their Relations to CMEs I. Reconciliation of “EIT Waves”, Type II Radio Bursts, and Leading Edges of CMEs*, Solar Physics DOI: 10.1007/s11207-011-9780-z.
- Kumar, P., Cho, K.-S., Chen, P.-F., Bong, S.-C., Park, S.-H., 2013. *Multiwavelength Study of a Solar Eruption from AR NOAA 11112: II. Large-Scale Coronal Wave and Loop Oscillation*, Solar Physics, 282:523-541.
- Liu, W., Nitta, N. V., Schrijver, C. J., Title, A.M., Tarbell, T. D., 2010. *First SDO AIA Observations of a Global Coronal EUV “Wave”: Multiple Components and “Ripples”*, The Astrophysical Journal Letters, 723: L53-L59.
- Mann, G., Aurass, H., Klassen, A., Estel, C., Thompson, B. J., 1999. *Coronal Transient Waves and Coronal Shock Waves*, Proc. 8th SOHO Workshops, Paris, June 1999.
- Moreton, G. E., Ramsey, H. E., 1960. *Recent Observations of Dynamical Phenomena Associated With Solar Flares*, Pub. Astron. Soc. Pac. 72, 357.
- Okamoto, T. J., Nakai, H., Keiyama, A., 2004. *Filament Oscillations and Moreton Waves Associated with EIT Waves*, The Astrophysical Journal, 608: 1124-1132.
- Patsourakos, S., Vourlidas, A., 2012. *On the Nature and Genesis of EUV Waves: A Synthesis of Observations from SOHO, STEREO, SDO, and Hinode (Invited Review)*, Solar Physics (281) p. 187-222.
- Patsourakos, S., Vourlidas, A., Wang, Y. M., Stenborg, G., Thernisien, A., 2009. *What is the Nature of EUV Waves? First STEREO 3D Observations and Comparison with Theoretical Model*, Solar Physics, 25: 49-71.
- Podladchikova, O., Berghmans, D., 2005. *Automated Detection of EIT Waves and Dimmings*, Solar Physics (228) p. 265-284.
- Thompson, B. J., Plunkett, S. P., Gurman, J. B., Newmark, J. S., St. Cyr, O. C., Michels, D. J., 1998. *SOHO/EIT Observations of an Earth-directed Coronal Mass Ejection on May 12, 1997*, Geophysical Research Letters, Vol. 25 No. 14, p. 2465-2468.
- Uchida, Y., 1968, 1968. *Propagation of Hydromagnetic Disturbances in the Solar Corona and Moreton’s Wave Phenomena*, Solar Physics 4, 30.
- Wills-Davey, M. J., Attrill, G. D. R., 2009. *EIT Waves: A Changing Understanding over a Solar Cycle*, Space Science Reviews Vol. 149 No. 1-4, 325-353.
- Zhang, Y., Kitai, R., Narukage, N., Matsumoto, T., Ueno, S., Shibata, K., Wang, J., 2011. *Propagation of Moreton Waves*, Publ. Astron. Soc. Japan 63, 685-696.
- Zhukov, A. N., 2011. *EIT Wave Observations and Modeling in the STEREO Era*, Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics, vol. 73 issue 10.
- Zhukov, A. N., Rodriguez, L., de Patoul, J., 2009. *STEREO/SECCHI Observations on 8 December 2007: Evidence Against the Wave Hypothesis of the EIT Wave Origin*, Solar Physics, 259, 73-85.