

TELAAH MODEL NUMERIK MEKANISME TERJADINYA *FLARE* DI MATAHARI

A. Gunawan Admiranto
Peneliti Pusat Pemanfaatan Sains Antariksa, LAPAN

ABSTRACT

Flare observations are numerous, and this approach should be supported by theoretical approach especially through modelling by numerical simulation. We make an analysis of reconnection process which precedes flare through numerical simulation. This method is the best method in flare modelling because processes in flare behave non linearly so analytical method can't be used.

ABSTRAK

Pengamatan *flare* sudah cukup sering dilakukan, tetapi pendekatan pengamatan ini perlu mendapatkan pemahaman teoretis terutama melalui pemodelan menggunakan simulasi numerik. Dalam hubungan ini dibuat kajian tentang analisis secara numerik pada peristiwa *flare* terutama pada rekoneksi yang mendahului *flare* tersebut dan diduga menjadi pemicu utamanya. Dalam upaya mendapatkan pemahaman tentang mekanisme rekoneksi yang mengakibatkan *flare*, metode numerik merupakan cara yang paling baik karena proses yang berlangsung pada *flare* adalah proses-proses non linear sehingga metode analitis tidak mungkin dipakai.

Kata kunci: *Flare*, *Rekoneksi*, *Model numerik*, *Simulasi*

1 PENDAHULUAN

Peristiwa *flare* sangat banyak menarik perhatian, karena di samping menjadi peristiwa yang paling dahsyat yang terjadi di tata surya kita, *flare* ini masih cukup banyak mengandung misteri. Sampai sekarang masih belum diketahui secara pasti mekanisme yang memicu terjadinya sebuah *flare*. Dalam hubungan ini, dalam rangka mendapatkan pemahaman lebih lanjut tentang *flare* dilakukan beberapa pendekatan, mulai pendekatan empiris secara statistik, sampai pendekatan teoretis menggunakan simulasi numerik. Upaya memahami *flare* masih cukup sulit karena proses-proses yang terjadi pada sebuah *flare* itu sangat kompleks, bersifat non linear, dan melibatkan beberapa parameter sekaligus.

Dalam melakukan pendekatan teoretis, penggambaran yang paling umum dipakai adalah terjadinya pembentukan *current sheet* akibat bertemunya dua *fluks* medan magnet yang bergerak

dalam arah berlawanan (Priest, 1976). *Current sheet* ini muncul sebagai akibat gesekan dua tabung *fluks* ini dan di sini terjadilah proses rekoneksi yang memunculkan *flare* tersebut.

Akan tetapi, yang masih menjadi pertanyaan adalah bagaimana detail dari proses tersebut. Secara garis besar di sini ada dua model yang sering menjadi bahan perdebatan, yaitu model *Sweet-Parker* dan model *Petschek* (Forbes dan Malherbe, 1991). Dua model ini saling bersaing untuk memberikan gambaran tentang bagaimana persisnya proses rekoneksi yang berlangsung pada *current sheet* untuk menghasilkan *flare*.

Makalah ini akan mencoba membuat ulasan mengenai proses rekoneksi yang berlangsung di daerah *current sheet*. Di sini dilakukan analisis pada model *Petschek* untuk melihat bagaimana perilaku *current sheet* saat terjadi rekoneksi yang menghasilkan *flare*. Akan dilakukan pendekatan secara numerik dengan cara memecahkan persamaan-persamaan

magnetohidrodinamika menggunakan metode beda hingga.

Menurut Svetska (2003), *flare* terdiri atas dua jenis, yaitu *flare* eruptif dan *flare* kompak. *Flare* eruptif merupakan *flare* yang cukup menarik perhatian karena di samping energi yang dilepaskannya lebih besar daripada *flare* kompak, *flare* ini juga bisa menghasilkan CME (*coronal mass ejection*).

Dalam hubungan ini, walaupun pemahaman mengenai mekanisme terjadinya *flare* sudah cukup baik, masih banyak terdapat masalah, terutama masalah-masalah teoretis, dalam upaya mendapatkan pemahaman yang lebih lengkap mengenai terjadinya *flare* ini. Oleh sebab itu, banyak peneliti yang mencoba melakukan berbagai pendekatan untuk memecahkan masalah ini, di antaranya adalah dengan melakukan simulasi menggunakan pendekatan numerik. Ada beberapa peneliti yang sudah mencoba melakukan pendekatan numerik dalam memahami peristiwa *flare* di Matahari, seperti Wu et. al. (2001) yang mencoba melakukan simulasi 3 dimensi pada gelombang magnetohidrodinamika, kemudian Tsiklauri et. al. (2004) membuat pemodelan hidrodinamika pada ledakan *flare* tanggal 14 Juli 2000.

Shibata (2003) menguraikan kemajuan pendekatan numerik pada peristiwa *flare* dan CME sampai sekarang, dan di situ ia menguraikan bahwa mekanisme rekoneksi magnet sudah cukup mapan secara fisis, tetapi dia masih melihat adanya beberapa masalah seperti apa yang terjadi saat terjadinya rekoneksi yang berlangsung cepat, apa mekanisme percepatan partikel yang berlangsung dalam *flare*, serta mekanisme yang memicu terjadi *flare*.

Selain dari pada itu, pemahaman tentang *flare* masih belum memadai, terutama pada dua mekanisme yang bertentangan, yaitu mekanisme *Sweet-Parker* dan mekanisme *Petschek* yang menghasilkan *current sheet*, di mana kedua mekanisme ini masing-masing berusaha menjelaskan peristiwa *flare* dengan cara

masing-masing, tetapi kedua-duanya belum cukup memuaskan.

Masalah yang dikemukakan Shibata (2003) di atas menunjukkan bahwa dalam pendekatan teoretis masih terdapat masalah yang terkait dengan mekanisme *flare*, di sini terutama yang menjadi masalah adalah mekanisme rekoneksi, proses percepatan, dan pemicu *flare* itu sendiri.

Selain itu, walaupun model rekoneksi sudah menjadi model yang paling banyak diterima dalam upaya memberikan penjelasan peristiwa *flare* secara teoretis, dalam model ini masih ada beberapa masalah yang harus dipecahkan. Dalam hal ini, yang paling utama adalah masalah bagaimana *current sheet* itu terbentuk, bagaimana *flare* itu terpicu, dan proses konversi energi yang berlangsung (Priest, 1976). Lebih lanjut, Priest juga mengatakan bahwa upaya untuk memberikan penjelasan tentang *flare* secara teoretis harus bisa memberikan gambaran lebih mendalam tentang tiga hal, yaitu (i) bagaimana energi sampai sejumlah 2×10^{32} erg bisa tersimpan di dalam kromosfer bawah dalam waktu kurang dari satu hari, (ii) bagaimana pelepasan energi sebanyak itu bisa terpicu, dan (iii) bagaimana energi itu diubah menjadi energi gerakan partikel yang bersifat acak dan yang terarah ke satu arah tertentu.

Flare eruptif biasanya terbagi dalam 3 tahap, yaitu tahap pra *flare*, tahap impulsif, dan tahap utama atau *main phase*. Dalam tahap pra *flare* berlangsung proses pancaran dalam sinar X. Tahap impulsif terjadi ketika berlangsung percepatan partikel berupa elektron yang mencapai energi 100 ke V dalam 100 detik dan diikuti dengan munculnya semburan radio tipe III, pancaran sinar X keras, dan pancaran Ha. Tahap utama terjadi ketika intensitas Ha menurun dalam waktu 500 detik.

Karena proses rekoneksi merupakan proses yang cukup penting perannya dalam terjadinya sebuah *flare*, maka di sini akan ditinjau secara lebih men-

dalam. Secara khusus akan ditinjau proses pembentukan *current sheet* dalam model Petschek dengan menggunakan metode numerik. Dalam hal ini akan ditinjau satu model yang sudah dikaji secara penuh, yaitu model yang digunakan oleh Forbes dan Malherbe (1991). Model yang mereka buat mencoba melihat sebuah *current sheet* yang memiliki kesetimbangan termal dan mekanis, tetapi sensitif terhadap ketidaksetimbangan yang bersifat menyobek *current sheet* dan pada ketidaksetimbangan kondensasi termal.

2 METODE

Upaya melakukan pemodelan numerik selalu diawali dengan beberapa persamaan dasar yang mengendalikan dinamika partikel yang bergerak di dalam medan magnet. Persamaan yang dimaksud adalah persamaan-persamaan magnetohidrodinamika, yaitu persamaan yang mengatur gerak partikel yang dipengaruhi medan magnet.

Persamaan-persamaan magnetohidrodinamika yang dipakai adalah (Murawski dan Tanaka, 1997).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (2-1)$$

$$\frac{\partial (\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot [(\rho v)v] = -\nabla p + \frac{1}{\mu} (\nabla \times B) \times B \quad (2-2)$$

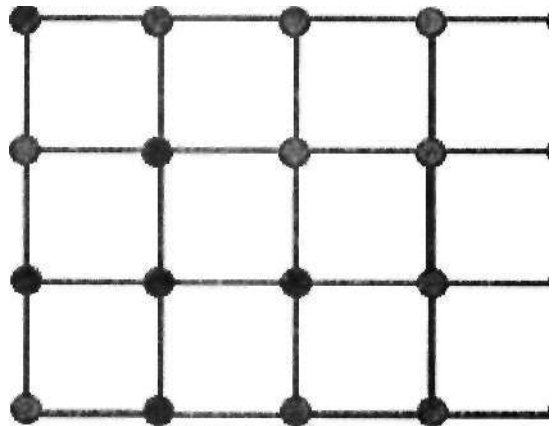
$$\frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times (v \times B) \quad (2-3)$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \nabla \cdot (eV) = -p \nabla \cdot v \quad (2-4)$$

Persamaan (2-1) adalah persamaan kontinuitas untuk partikel yang bergerak dalam lingkungan yang netral, persamaan (2-2) adalah persamaan kontinuitas untuk partikel yang bergerak dalam medan magnet, persamaan (2-3) menunjukkan hubungan antara perubahan medan magnet dalam waktu dengan kecepatan partikel, sedangkan persamaan (2-4) menunjukkan hubungan antara gradien tekanan dengan perubahan energi dalam pada fluida bermuatan yang ditinjau.

Dalam hubungan ini, parameter yang penting dalam pengertian bisa didapat datanya melalui pengamatan adalah kecepatan partikel v dan kuat medan magnet B .

Perangkat persamaan di atas adalah perangkat persamaan diferensial parsial, yang kemudian dipecahkan menggunakan metode beda hingga (*finite element method*). Dalam hubungan ini aliran plasma dianggap menempati jaringan kisi-kisi di mana tiap partikel menempati tiap titik pada kisi itu dan tiap titik pada kisi ini merepresentasikan parameter fisik yang dimiliki partikel pada suatu saat. Metode beda hingga digunakan karena dianggap cukup baik dalam mendekati dinamika partikel yang sedang bergerak. Gambar 2-1 menunjukkan kisi yang dimaksud.

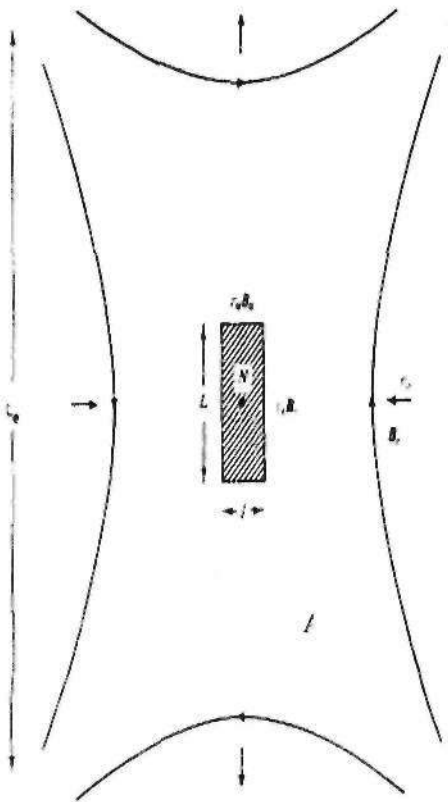


Gambar 2-1: Pola kisi yang dipakai untuk memecahkan persamaan diferensial parsial dengan metode beda hingga. Setiap titik menjadi mewakili parameter fisis (v , T , B) yang dimiliki partikel pada suatu saat

Selanjutnya, dalam memecahkan persamaan-persamaan di atas dipakai metode beda hingga yang pada prinsipnya adalah mencoba melakukan penurunan suatu fungsi pada satu titik dengan mencari nilai fungsi tersebut pada titik-titik yang berdekatan dengan titik tersebut.

Dari kalkulus didapat

$$\frac{\partial W(x, y, t)}{\partial t} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta x, y, t) - f(x, y, t)}{\Delta x} \quad (2-5)$$



Gambar 2-2: Gambaran skematis pada daerah *current sheet* tempat berlangsungnya rekoneksi yang memicu ledakan *flare*. Bagian A menunjukkan daerah rekoneksi yang merupakan ruang komputasi dalam upaya memecahkan persamaan diferensial magnetohidrodinamika.

Karena menggunakan jarak antar titik yang bersifat diskrit, yaitu turunan variable itu hanya didefinisikan di titik-titik kisi, maka turunan suatu fungsi bisa didekati dengan cara ini, dengan mengandaikan bahwa perubahan terkecil nilai x menjadi nilai fungsi dari titik-titik kisi yang berdekatan.

Sebagai contoh, kita ingin menghitung turunan dari suatu fungsi ψ pada arah x di titik (i, j) pada satu saat tertentu. Maka, yang kita lakukan adalah mencari nilai ψ pada titik yang terletak sebelah menyebelah titik (i, j) dan mencari selisihnya. Hasilnya kemudian dibagi dengan jarak antara dua titik itu, yaitu dua kali jarak kisi pada arah x .

Turunan kedua dari fungsi ini bisa diperoleh dengan mencari turunan

dari turunan pertama fungsi yang sudah diperoleh. Turunan pertama diperoleh dari nilai fungsi pada satu titik di antara dua kisi, dan turunan kedua diperoleh dengan mencari selisih nilai fungsi antara dua titik dan dibagi dengan jarak antar kedua titik itu. Dari sini dapat ditentukan turunan pertama dan kedua pada setiap titik dari fungsi yang kita gunakan.

$$\frac{\partial f(i, j)}{\partial x} \approx \frac{f(i+1, j) - f(i-1, j)}{2\Delta x} \quad (2-6)$$

Metode ini kemudian digunakan untuk melakukan pendekatan numerik pada proses fisis yang berlangsung dalam sebuah *current sheet* sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 2-2 di bawah. Dalam hal ini model Petschek dipakai, di mana rekoneksi berlangsung pada daerah yang sempit, lebih sempit dari pada daerah rekoneksi yang diusulkan oleh model Sweet-Parker.

Gambar 2-2 menunjukkan daerah *current sheet* yang menjadi tempat berlangsungnya rekoneksi yang memicu *flare*. Bagian A menjadi ruang komputasi dalam upaya memecahkan persamaan magnetohidrodinamika yang ditunjukkan oleh persamaan (2-1) sampai dengan persamaan (2-4).

Selanjutnya, dalam persamaan ini digunakan syarat-syarat batas dan awal sebagai berikut

- Syarat awal

$$B_z = \begin{cases} \sin\left(\frac{\pi x}{2w}\right), & |x| \leq w \\ \frac{x}{|x|}, & |x| \geq w \end{cases} \quad \begin{matrix} B_x=0, v_x=0, \\ v_z=0 \end{matrix}$$

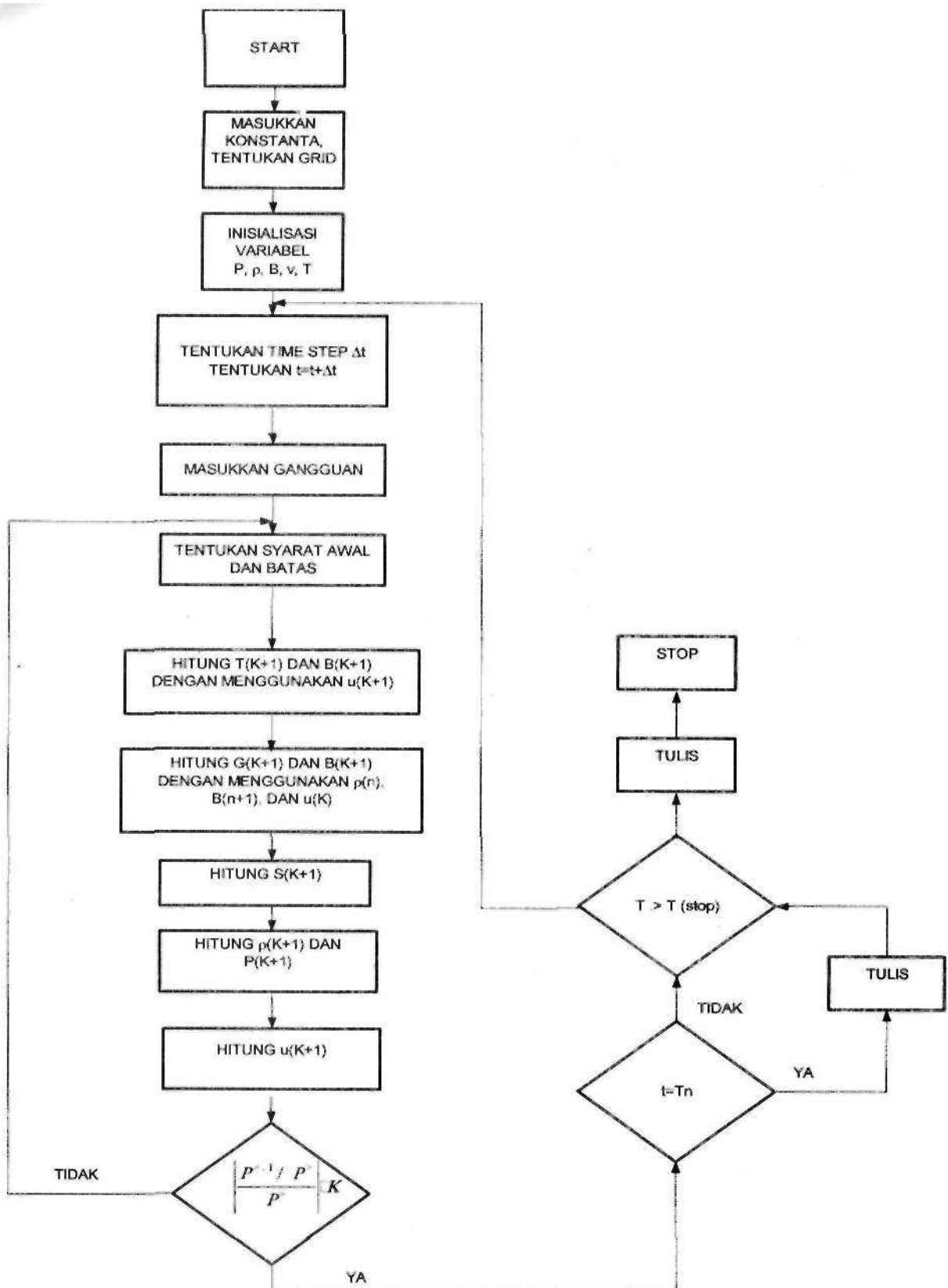
- Syarat batas

$$v_x(x, 0, t) = 0 \quad v^*(x, 0, t) = 0$$

- Masukkan konstanta fisis dan tentukan grid. Tentukan konstanta.
- Majukan satu langkah dalam waktu dan masukkan gangguan.
- Tentukan syarat awal dan batas.
- Hitung B_{k+i} dengan menggunakan harga kecepatan V_k .

Hitung $V_{k,i}$ dengan menggunakan persamaan momentum dan variabel lain. Tentukan apakah $|(P_{k,i} - P_u)/P_k| < \epsilon$, bila tidak kembali ke langkah 2, bila

ya selesai, dan gambarkan situasi fisis yang dihasilkan.



Gambar 2-3: Diagram arus

Di sini yang pertama kali dipecahkan adalah persamaan difusi, yaitu

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times (v \times B) + \eta \nabla^2 B \quad (2-7)$$

Persamaan ini kemudian dijabarkan menjadi persamaan sebagai berikut :

$$\frac{\partial B_x}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} (v_y B_y - v_y B_y) - \frac{\partial}{\partial z} (v_z B_z - v_z B_z) + \eta \frac{\partial^2}{\partial x^2} B_x \quad (2-8)$$

$$\frac{\partial B_y}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (v_x B_x - v_x B_x) - \frac{\partial}{\partial z} (v_z B_z - v_z B_z) + \eta \frac{\partial^2}{\partial y^2} B_y \quad (2-9)$$

$$\frac{\partial B_z}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (v_x B_x - v_x B_x) - \frac{\partial}{\partial y} (v_y B_y - v_y B_y) + \eta \frac{\partial^2}{\partial z^2} B_z \quad (2-10)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{\Delta t} [B_x^n - B_x^{n+1}]_y &= \frac{1}{\Delta x} \left[v_y^{i,j+1/2} \{ (B_x^{i,j} + B_x^{i,j+1}) \} - v_y^{i,j-1/2} \{ (B_x^{i,j} + B_x^{i,j-1}) \} \right] \\ &+ \frac{1}{\Delta y} \left[v_y^{i,j-1/2} \{ (B_x^{i,j} + B_x^{i,j-1}) \} - v_y^{i,j+1/2} \{ (B_x^{i,j} + B_x^{i,j+1}) \} \right] + \frac{\eta}{(\Delta x)^2} [B_x^{i+1,j} - 2B_x^{i,j} + B_x^{i-1,j}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{\Delta t} [B_y^n - B_y^{n+1}]_x &= \frac{1}{\Delta x} \left[v_y^{i,j+1/2} \{ (B_y^{i,j} + B_y^{i,j+1}) \} - v_y^{i,j-1/2} \{ (B_y^{i,j} + B_y^{i,j-1}) \} \right] \\ &+ \frac{1}{\Delta x} \left[v_x^{i,j-1/2} \{ (B_y^{i,j} + B_y^{i,j-1}) \} - v_x^{i,j+1/2} \{ (B_y^{i,j} + B_y^{i,j+1}) \} \right] + \frac{\eta}{(\Delta y)^2} [B_y^{i+1,j} - 2B_y^{i,j} + B_y^{i-1,j}] \end{aligned}$$

3 KAJIAN HASIL MODEL NUMERIK

Upaya memecahkan persamaan-persamaan magnetohidrodinamika sebagaimana tersebut di atas adalah salah satu upaya untuk mendapatkan pemahaman lebih mendalam tentang proses-proses fisis yang berlangsung menjelang terjadinya sebuah *flare*. Meskipun demikian, di sini masih diperlukan waktu lebih banyak lagi dalam mendapatkan pemecahan persamaan magnetohidrodinamika sehingga hasil seperti yang diperoleh oleh Forbes dan Malherbe (1991) bisa didapat.

Dalam pada itu, sebagaimana ditunjukkan dalam persamaan (2-1) sampai dengan persamaan (2-4), persamaan difusi sebenarnya bukan satu-satunya persamaan yang harus dipecahkan. Dalam hal ini yang perlu dipecahkan adalah persamaan kontinuitas untuk partikel yang bergerak dalam medan magnet, persamaan yang menunjukkan hubungan antara perubahan medan magnet dalam

Persamaan difusi ini sebenarnya hanyalah salah satu dari seperangkat persamaan diferensial magnetohidrodinamika yang harus dipecahkan dan untuk bisa mendapatkan pemecahannya, maka persamaan-persamaan lain persamaan (2-1) sampai persamaan (2-4) juga harus dipecahkan juga. Untuk itu, persamaan-persamaan lain juga perlu dipecahkan dengan menggunakan algoritma yang sama, dan disesuaikan dengan persamaan yang akan dipecahkan.

Akibatnya persamaan difusi berubah menjadi

waktu dengan kecepatan partikel, dan persamaan yang menunjukkan hubungan antara *gradien* tekanan dengan perubahan energi.

4 KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Forbes dan Malherbe (1991), tampak baliwa gangguan pada daerah *current sheet* bisa mengakibatkan adanya ketidak-stabilan yang kemudian mengakibatkan *flare*. Dalam simulasi yang mereka lakukan mereka mendapatkan bahwa kompresi plasma yang diakibatkan oleh rekoneksi sangat berpengaruh pada proses kondensasi. Mereka juga mendapatkan bahwa upaya melakukan simulasi *flare*, terutama pembentukan *post flare loops*, cukup sulit. Hal ini karena proses-proses rekoneksi, penguapan, dan kondensasi cukup rumit, selain itu juga rentang parameter yang tepat untuk berlangsungnya proses ini sulit untuk disimulasikan dalam 2 atau 3

dimensi. Rentang parameter yang tepat ini perlu ditentukan secara akurat karena bisa memberikan gambaran secara kualitatif mengenai proses fisis yang sebenarnya berlangsung. Hal ini juga terutama karena proses-proses pada saat berlangsungnya rekoneksi ini adalah proses yang non linear sehingga pendekatan analitis tidak mungkin dilakukan.

Selanjutnya, Shibata (2003) mengatakan bahwa mekanisme rekoneksi magnet sudah cukup mapan dalam memberikan penjelasan mengenai proses terjadinya *flare* di matahari. Akan tetapi, masih ada beberapa pertanyaan yang muncul, terutama yang terkait dengan upaya memberikan penjelasan secara kuantitatif. Pertanyaan-pertanyaan itu antara lain:

- Apa yang terjadi saat berlangsungnya rekoneksi cepat ?
- Di mana kah persisnya tempat berlangsungnya *shock* yang berlangsung lambat dan yang berlangsung cepat ?
- Apa mekanisme percepatan partikel yang berlangsung di flare dan CME ?
- Apa mekanisme penumpukan energi dan pemicu terjadinya *flare* ?

Shibata juga mengatakan bahwa untuk mendapatkan jawaban dari pertanyaan-pertanyaan tersebut di atas, diperlukan data pengamatan yang lebih akurat, serta simulasi baik dalam 2

maupun dalam 3 dimensi yang melibatkan rekoneksi, konduksi panas dan penguapan.

Dari pembahasan di atas tampak bahwa upaya memahami proses terjadinya *flare* tidak cukup hanya dengan semakin canggihnya upaya melakukan pemodelan (baik dalam 2 dimensi maupun dalam 3 dimensi), tetapi juga memerlukan peralatan pengumpul data yang semakin akurat, terutama yang memiliki resolusi tinggi baik secara spasial maupun temporal.

DAFTAR RUJUKAN

- Forbes, T.G., dan Malherbe, J.M., 1991. *Solar Physics* 135, 361.
- Murawski, K. Tanaka, T., 1997. *Astrophys. Spc. Sci.*, 254, 187.
- Priest, E.R., 1976. *Solar Physics*, 47, 41.
- Shibata, K., 2003. *ASP Conf Series*, vol. nnn.
- Svetska, Z. dalam Dwivedi, B.N. 2003. (ed.) *Dynamic Sun*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Tsiklauri, D., Aschwanden, M.J., Nakriakov, V.M., Arber, T.D., 2004. *Astronomy and Astrophysics*, 1149.
- Wu, S.T., Zheng, Huinan, Wang, S., Thompson, B.J., Plunkett, S.P., Zhao, X.P., Dryer, M., 2001. *Journal of Geophysical Research* vol. 106, No. A11, 25089.