

PERSAMAAN PERTAMA MAXWELL RELATIVISTIK BINTANG NEUTRON YANG BEROTASI CEPAT DIUKUR OLEH PENGAMAT ZAMO (ZERO ANGULAR MOMENTUM OBSERVERS)

ATSNAITA YASRINA

Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Malang, Jl. Semarang No. 5, Malang

E-mail: atsnaita.yasrina.fmipa@um.ac.id

ABSTRACT

Neutron star is an object in Milky Way that is studied relativistically using general relativity theory. One of the fields of study of the Neutron Star is the reduction of its magnetic field. Therefore, the equation of magnetic field dynamic is needed to show the reduction of magnetic field in the Neutron Star. The equation formula of magnetic field dynamic can be drawn from the first equation of Maxwell's relativistic. If the Neutron Star being studied is rotating, it is important to use ZAMO (Zero Angular Momentum Observers) base. The first Maxwell's relativistic on the Neutron Star rotating quickly has been formulated and was measured by ZAMO observer. The equation drawn was only limited on differential equation in radial, polar, and azimuth components.

Keywords: the first equation of Maxwell, Neutron Star, quick rotation, ZAMO

PENDAHULUAN

Akhir dari evolusi bintang menghasilkan jasad bintang yang berupa katai putih, bintang neutron, dan lubang hitam. Suatu bintang dikatakan bintang neutron adalah jika memiliki massa saat di barisan utama sebesar $M_* \gtrsim 8M_{\odot}$, diakhir evolusinya melakukan supernova tipe I, sejumlah material yang ada di dalam inti bintang runtuh, mendingin, mencapai keadaan setimbang, dan mengandung kelimpahan neutron yang terdegenerasi (Lander, 2010).

Secara umum bintang neutron memiliki massa $M_* \sim 1,4 M_{\odot}$ dengan memiliki jari-jari $R_* \approx 12$ km (Potekhin, 2011). Akan tetapi massa maksimum yang bisa dimiliki oleh bintang neutron adalah $M_* \sim 1,5 M_{\odot}$ yang memiliki jari-jari $R_* \sim 3$ km (Shapiro dkk., 2004). Sementara jari-jari bintang neutron harus lebih besar dari $R_{\min} = 7,66(M_*/M_{\odot})$ km (Potekhin, 2011). Hasil tersebut sesuai dengan persamaan keadaan, bintang neutron. Ukuran

yang berbeda bergantung pada persamaan keadaannya, sedangkan pada dasarnya bergantung kesetimbangan gaya gravitasi dengan tekanan dari neutron terdegenerasi.

Haensel, dkk dalam bukunya tahun 2007 menuliskan bahwa bintang neutron adalah bintang yang sangat rapat. Besarnya kerapatan bintang neutron adalah sebesar dua hingga tiga kalinya kerapatan normal inti atom. Sementara kerapatan normal inti atom sebesar $2,8 \times 10^{14} \text{ g cm}^{-3}$. Nilai itu menunjukkan dalam ruang 1 cm^3 terdapat massa $2,8 \times 10^{14} \text{ g}$. Sementara rapat massa dapat dikatkan dengan percepatan gravitasi. Bintang neutron dengan besar kerapatan tersebut memiliki percepatan gravitasi di permukaannya sebesar $g \sim GM/R^2 \sim 2 \times 10^{14} \text{ cm s}^{-2}$ atau 2×10^{11} kali daripada Bumi (Haensel dkk., 2007).

Bintang neutron merupakan objek yang menarik dalam kajian astrofisika, salah satunya dikarenakan bintang neutron memiliki medan magnet yang sangat besar. Potekhin dalam

artikelnya di tahun 2011 bahkan menyatakan sejauh ini, medan magnet bintang neutron adalah medan magnet terkuat yang dimiliki objek di alam semesta ini yaitu mampu mencapai sebesar 10^{18} G.

Sejauh ini belum terdapat kesepakatan tentang pembangkitan atau sumber medan magnet di bintang neutron ini dari mana dan bagaimana prosesnya. Berbagai hipotesa salah satunya, medan bintang neutron dilahirkan dengan mempunyai medan magnet yang kuat, dikarenakan konduktivitas listrik yang tinggi dan dengan proses peluruhan Ohmic. Medan magnet dapat dihasilkan dari sisa-sisa bintang sebelumnya yang mempunyai inti proton superkonduktor. Medan magnet mungkin dibangkitkan setelah pembentukan bintang neutron itu sendiri (Konar dkk., 1999). Akan tetapi besarnya medan magnet ini dipengaruhi oleh medan magnet awal bintang dan kelajuan rotasi bintang.

Kajian medan magnet bintang neutron menarik tidak hanya karena besarnya medan magnet ini, tetapi juga karena ada fenomena penurunan besarnya medan magnet bintang neutron. Sebagai contoh Zhang dalam artikelnya pada tahun 2007 menuliskan bahwa medan magnet bintang neutron dapat menurun yang awalnya $\sim 10^{12}$ G menjadi $\sim 10^8$ G dalam skala waktu 5×10^5 tahun. Zhang menyatakan bahwa penurunan besarnya medan magnet ini terjadi karena proses disipasi Ohmic. Akan tetapi banyak astrofisikawan mengkaji penurunan medan magnet ini ditemukan untuk bintang neutron dalam sistem ganda seperti yang ditulis Batacharya pada tahun 2002. Sistem ganda menunjukkan bahwa bintang neutron mengakresi bintang pasangannya. Akresi yang dianggap salah satu penyebab penurunan medan magnet ini juga dikuatkan oleh astrofisikawan lain menyatakan evolusi medan magnet salah satunya dipengaruhi oleh bintang neutron yang mengakresi (Anzer dkk., 1979, Konar dkk., 1996; Cumming dkk., 2001; Melatos dkk., 2001; Choudhuri dkk., 2002; Lovelace dkk., 2005; Ho, 2011).

Kajian teoretik tentang penurunan medan magnet di bintang neutron adalah menyusun persamaan matematis yang menunjukkan bahwa bintang neutron besarnya menurun karena bintang neutron mengakresi. Persamaan ini pernah disusun oleh Cumming, dkk dalam artikelnya tahun 2001. Dalam artikel tersebut bintang neutron dikaji tidak dengan relativistik.

Sementara bintang neutron adalah objek relativistik.

Suatu bintang haruslah dikaji dengan teori relativitas umum ditentukan oleh parameter kekompakan (x_g) yang besarnya adalah

$$x_g = r_g/R, \quad (1)$$

dengan

$$r_g = 2GM/c^2 \approx 2,95 M_*/M_\odot, \quad (2)$$

dengan r_g adalah jari-jari Schwarzschild, G konstanta gravitasi, dan c adalah kecepatan cahaya. Sementara massa dan jari-jari bintang neutron $M_* \sim 1,4 M_\odot$, $R_* \approx 12$ km, sehingga jika dimasukkan ke persamaan (1) dan (2) diperoleh $x_g = 0,3$.

Persamaan yang menunjukkan penurunan medan magnet bintang neutron membutuhkan persamaan dinamika medan magnet, atau kajian elektromagnetik di bintang neutron. Karena bintang neutron membutuhkan kajian secara relativistik, pada tahun 1970 Anderson dan Cohen memulai kajian elektromagnetik dari bintang yang relativistik dengan mengkaji medan elektromagnet yang stasioner di ruang waktu Schwarzschild. Sementara Sengupta (1995) menunjukkan medan listrik dengan latar belakang Schwarzschild di bintang neutron tetapi hasilnya bukan solusi persamaan Maxwell. Sengupta melanjutkan artikelnya pada tahun 1997. Sengupta menjelaskan kecepatan peluruhan Ohmic di ruang waktu Schwarzschild. Geppert, Page, dan Zannias (2000) dalam artikelnya menunjukkan adanya waktunya penyusutan medan magnet lebih singkat dibanding jika dikaji dalam ruang waktu yang datar.

Kajian bintang neutron yang berotasi tetapi secara relativistik dikaji oleh Muslimov dan Tsygan (1992). Kajian Muslimov dan Tsygan bintang neutron berotasi lambat (Muslimov, 1992). Artikel dalam tahun 2004 yang ditulis Rezolla, Ahmedov, dan Miller adalah solusi persamaan Maxwell di ruang waktu bintang neutron berotasi lambat dengan di sekitar bintang neutron tidak terdapat materi atau bintang neutron tidak mengakresi. Artikel tersebut juga menuliskan tensor medan elektromagnetik bintang neutron berotasi lambat yang diukur oleh pengamat ZAMO (*Zero Angular Momentum Observers*). Kajian bintang yang berotasi atau

menggunakan metrik untuk bintang berotasi membutuhkan kajian dengan ZAMO (Rezzolla dkk, 2004) (Camenzind, 2007). Telah dihasilkan persamaan dinamika medan magnet untuk bintang neutron berotasi lambat dan terdapat materi di sekitar bintang neutron, yang disampaikan Atsnaita Yasrina dan M.F. Rosyid dalam seminar HFI Jogja Jawa tengah tahun 2013.

Kajian persamaan dinamika medan magnet di bintang neutron yang berotasi cepat dimulai dengan merumuskan tensor kovarian elektromagnet bintang neutron berotasi cepat, yang telah disampaikan dalam Seminar Fisika dan pembelajarannya tahun 2015 di Universitas Negeri Malang oleh Atsnaita Yasrina. Sementara untuk tensor kovariannya telah disampaikan dalam Seminar Nasional MIPA 2015 di Universitas Negeri Semarang. Tensor kovarian dan kontravarian elektromagnetik relativistik ini

$$ds^2 = -e^{2\phi} dt^2 + e^{2\lambda} r^2 \sin^2 \theta (d\varphi - \omega dt)^2 + e^{2\alpha} (dr^2 + r^2 d\theta^2), \quad (3)$$

dengan $\omega(r)$ adalah kecepatan angular dari kerangka acuan inersia. Fungsi metrik $\phi, \lambda, \omega, \alpha$ bergantung pada r dan θ (Gregory, dkk., 1994). Komponen metrik bintang neutron berotasi cepat adalah

$$g_{\mu\nu} = \begin{bmatrix} -(e^{2\phi} - e^{2\lambda} r^2 \sin^2 \theta \omega^2) & 0 & 0 & -e^{2\lambda} r^2 \sin^2 \theta \omega \\ 0 & e^{2\alpha} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{2\alpha} r^2 & 0 \\ -e^{2\lambda} r^2 \sin^2 \theta \omega & 0 & 0 & e^{2\lambda} r^2 \sin^2 \theta \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Persamaan tensor kovarian elektromagnetik relativistik adalah

$$F_{\mu\nu} \equiv 2u_{[\mu} E_{\nu]} + \eta_{\mu\nu\sigma\delta} u^\sigma B^\delta, \quad (5)$$

dengan $\eta_{\mu\nu\sigma\delta}$ adalah *pseudo-tensorial* yang digambarkan oleh simbol Levi-Civita $\varepsilon_{\mu\nu\sigma\delta}$, yaitu

$$\eta_{\mu\nu\sigma\delta} = \sqrt{-g} \varepsilon_{\mu\nu\sigma\delta}; \quad \eta^{\mu\nu\sigma\delta} = -\frac{1}{\sqrt{-g}} \varepsilon^{\mu\nu\sigma\delta}. \quad (6)$$

(dalam Rezzolla *et al*, 2004). Persamaan (4) menghasilkan besarnya g adalah

$$V^2 = e^{2\phi} \left[e^{2\lambda} r^2 \sin^2 \theta (\Omega - \omega)^2 + e^{2\alpha} (v^r)^2 + e^{2\alpha} r^2 (v^\theta)^2 \right] \quad (9)$$

(Yasrina, 2015a). Persamaan (6) sampai (10) disubsitusikan ke persamaan (5) diperoleh tensor kovarian elektromagnetik bintang neutron berotasi cepat

$$F_{00} = F_{11} = F_{22} = F_{33} = 0,$$

dapat digunakan untuk menyusun persamaan Maxwell. Persamaan Maxwell relativistik dapat digunakan untuk merumuskan persamaan medan magnet di bintang neutron yang berotasi cepat, yang menjadi bagian dari persamaan penurunan medan magnet.

METODE PENELITIAN

Penelitian yang dilakukan merupakan suatu telaah teoretis-matematis secara analitik. Oleh karena itu metode penelitian ini merupakan tinjauan terhadap beberapa pustaka mengenai perhitungan-perhitungan yang telah dilakukan dan dikembangkan sebelumnya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kajian bintang neutron berotasi cepat secara relativistik menggunakan metrik dalam sistem koordinat bola (ct, r, θ, φ) yaitu

$$g = -(e^\phi e^{2\alpha} e^{\lambda} r^2 \sin \theta)^2 \quad (7)$$

(Yasrina, 2015a). Kecepatan vektor-4 adalah

$$u^\mu = \frac{e^{-\phi}}{\sqrt{1-V^2}} (1, 0, 0, \omega);$$

$$u_\mu = -\frac{e^\phi}{\sqrt{1-V^2}} (1, 0, 0, 0), \quad (8)$$

dengan

$$\begin{aligned}
 F_{01} = -F_{10} &= -\frac{1}{\sqrt{1-V^2}}(e^\phi E_r - e^{2\alpha} e^{\lambda r^2} \sin \theta \omega B^\theta), \\
 F_{02} = -F_{20} &= \frac{1}{\sqrt{1-V^2}}(-e^\phi E_\theta + e^{2\alpha} e^{\lambda r^2} \sin \theta \omega B^r), \\
 F_{03} = -F_{30} &= -\frac{e^\phi E_\varphi}{\sqrt{1-V^2}}, \\
 F_{12} = -F_{21} &= -\frac{1}{\sqrt{1-V^2}} e^{2\alpha} e^{\lambda r^2} \sin \theta B^\varphi, \\
 F_{13} = -F_{31} &= -\frac{1}{\sqrt{1-V^2}} e^{2\alpha} e^{\lambda r^2} \sin \theta B^\theta, \\
 F_{23} = -F_{32} &= -\frac{1}{\sqrt{1-V^2}} e^{2\alpha} e^{\lambda r^2} \sin \theta B^r. \tag{10}
 \end{aligned}$$

(Yasrina, 2015). Sementara tensor kovarian elektromagnetik bintang neutron yang berotasi cepat diukur oleh pengamat ZAMO, dihasilkan menggunakan basis dan form-1 dalam kerangka ZAMO. Basis $\{e_{\hat{\mu}}\} = (e_{\hat{0}}, e_{\hat{r}}, e_{\hat{\theta}}, e_{\hat{\varphi}})$ dan form-1 $\{w^{\hat{\mu}}\} = (w^{\hat{0}}, w^{\hat{r}}, w^{\hat{\theta}}, w^{\hat{\varphi}})$ dalam kerangka ZAMO secara berturut-turut adalah

$$\begin{aligned}
 w_{\hat{0}} &= (e^{2\phi} - e^{2\lambda r^2} \sin^2 \theta \omega^2)^{\frac{1}{2}}(1,0,0,0), \\
 w_{\hat{r}} &= e^\alpha(0,1,0,0), \\
 w_{\hat{\theta}} &= e^\alpha r(0,0,1,0), \\
 w_{\hat{\varphi}} &= e^\lambda r \sin \theta (-\omega, 0, 0, 1). \tag{12}
 \end{aligned}$$

(Yasrina, 2015a).

Persamaan (11) dan (12) disubstitusikan ke persamaan (10) diperoleh tensor kovarian medan elektromagnetik di bintang neutron yang berotasi cepat diukur oleh pengamat ZAMO yaitu

$$e_{\hat{\varphi}}^v = \frac{-e^{2\phi} + e^{2\lambda r^2} \sin^2 \theta \omega^2}{e^\phi e^{\lambda r} \sin \theta} e^{-\phi}(0,0,0,1). \tag{11} \qquad F_{00} = F_{11} = F_{22} = F_{33} = 0,$$

$$\begin{aligned}
 F_{01} = -F_{10} &= -\frac{1}{\sqrt{1-V^2}}(e^\phi e^\alpha E^{\hat{r}} - e^\alpha e^{\lambda r^2} \sin \theta \omega B^{\hat{\theta}}), \\
 F_{02} = -F_{20} &= \frac{1}{\sqrt{1-V^2}}(-e^\phi E^{\hat{\theta}} + e^\alpha e^{\lambda r^2} \sin \theta \omega B^{\hat{r}}), \\
 F_{03} = -F_{30} &= -\frac{e^\lambda r \sin \theta}{\sqrt{1-V^2}}(-e^{2\phi} + e^{2\lambda r^2} \sin^2 \theta \omega^2)^{1/2} E^{\hat{\theta}}, \\
 F_{12} = -F_{21} &= -\frac{1}{\sqrt{1-V^2}} e^{2\alpha-\phi}(-e^{2\phi} + e^{2\lambda r^2} \sin^2 \theta \omega^2)^{1/2} B^{\hat{\varphi}},
 \end{aligned}$$

$$F_{13} = -F_{31} = -\frac{1}{\sqrt{1-V^2}} e^\alpha e^{\lambda r} \sin \theta B^{\hat{\theta}},$$

$$F_{23} = -F_{32} = -\frac{1}{\sqrt{1-V^2}} e^\alpha e^{\lambda r^2} \sin \theta B^{\hat{r}} \quad (13)$$

(Yasrina, 2015a). Persamaan (10) dan (13) dapat menghasilkan tensor kontravarian medan elektromagnetik di bintang neutron yang berotasi cepat dalam kerangka pengamat ZAMO yaitu

$$F^{00} = F^{11} = F^{22} = F^{33} = 0,$$

$$F^{01} = -F^{10} = (-Y^{-1} e^{-\alpha} B^r) = -e^{-\phi-\alpha} \sqrt{1-V^2} B^{\hat{r}},$$

$$F^{02} = -F^{20} = (Y^{-1} B^\theta) = e^{-\phi-\alpha} r^{-1} \sqrt{1-V^2} B^{\hat{\theta}},$$

$$F^{03} = -F^{30} = -(Y^{-1} B^\varphi) = \frac{(-e^{2\phi} + e^{2\lambda r^2} \sin^2 \theta \omega^2)^{1/2}}{e^{2\phi+\lambda r} \sin \theta} \sqrt{1-V^2} B^{\hat{\varphi}},$$

$$F^{12} = -F^{21} = -(X^{-1} E_\varphi) = -\frac{(-e^{2\phi} + e^{2\lambda r^2} \sin^2 \theta \omega^2)^{1/2}}{e^{2\alpha+\phi r}} \sqrt{1-V^2} E^{\hat{\varphi}},$$

$$F^{13} = -F^{31} = -(X^{-1} E_\theta - Y^{-1} \omega B^r) = -\left[\frac{E^{\hat{\theta}}}{e^{\alpha+\lambda r} \sin \theta} - \frac{\omega}{e^{\phi+\alpha}} B^{\hat{r}} \right] \sqrt{1-V^2},$$

$$F^{23} = -F^{32} = -(X^{-1} E_r - Y^{-1} \omega B^\theta) = -\left[\frac{E^{\hat{r}}}{e^{\alpha+\lambda r^2} \sin \theta} - \frac{\omega}{e^{\phi+\alpha r}} B^{\hat{\theta}} \right] \sqrt{1-V^2} \quad (14)$$

(Yasrina, 2015b). Persamaan (13) dapat digunakan untuk menyusun persamaan pertama Maxwell relativistik di bintang neutron berotasi cepat. Persamaan pertama Maxwell relativistik adalah

$$3! F_{[\alpha\beta,\gamma]} = 2(F_{\alpha\beta,\gamma} + F_{\gamma\alpha,\beta} + F_{\beta\gamma,\alpha}) = 0. \quad (15)$$

Sesuai persamaan (13), maka persamaan pertama Maxwell tidak lenyap jika $\alpha \neq \beta \neq \gamma$. Persamaan pertama Maxwell relativistik untuk $\alpha = 0; \beta = 1; \gamma = 2$ adalah

$$\begin{aligned} \frac{\partial B^{\hat{\varphi}}}{\partial t} &= \frac{e^\phi}{e^{2\alpha}} [-e^{2\phi} + e^{2\alpha r^2} \omega^2 \sin^2 \theta]^{-\frac{1}{2}} \sqrt{1-V^2} \left\{ (-\sqrt{1-V^2})_{,t} B^{\hat{\varphi}} \right. \\ &+ \left[\left(\frac{1}{\sqrt{1-V^2}} \right)_{,\theta} (e^\phi e^\alpha E^{\hat{r}} + e^\alpha e^\lambda \omega \sin \theta B^{\hat{\theta}}) \right] + (-e^\phi e^\alpha E^{\hat{r}})_{,\theta} + (e^\alpha e^\lambda \omega \sin \theta B^{\hat{\theta}})_{,\theta r} \\ &+ \left[\left(\frac{1}{\sqrt{1-V^2}} \right)_{,r} (-e^\phi e^\alpha r E^{\hat{\theta}} + e^\alpha e^\lambda r^2 \omega \sin \theta B^{\hat{r}}) \right] \\ &\left. - (e^\phi e^\alpha r E^{\hat{\theta}})_{,r} + (e^\alpha e^\lambda r^2 \omega B^{\hat{r}})_{,r} \sin \theta \right\}. \end{aligned} \quad (16)$$

Persamaan pertama Maxwell relativistik untuk $\alpha = 0; \beta = 1; \gamma = 3$ adalah

$$\frac{\partial B^{\hat{\theta}}}{\partial t} = (e^\alpha e^{\lambda r} \sin \theta)^{-1} \sqrt{1-V^2} \left\{ -(\sqrt{1-V^2})_{,t} B^{\hat{\theta}} + e^\phi e^\alpha \left(\frac{E^{\hat{r}}}{\sqrt{1-V^2}} \right)_{,\varphi} \right\}$$

$$\begin{aligned}
 &+ e^\alpha e^\lambda r \omega \sin \theta \left(\frac{B^{\hat{\theta}}}{\sqrt{1-V^2}} \right)_{,\varphi} - \left(\frac{e^{2\alpha} r}{\sqrt{1-V^2}} [-e^{2\phi} + e^{2\alpha} r^2 \omega^2 \sin^2 \theta]^{\frac{1}{2}} \right)_{,r} \sin \theta E^{\hat{\phi}} \\
 &+ \left(e^{2\alpha} r \sin \theta [-e^{2\phi} + e^{2\alpha} r^2 \omega^2 \sin^2 \theta]^{\frac{1}{2}} \right) (E^{\hat{\phi}})_{,r} \}. \tag{17}
 \end{aligned}$$

Persamaan pertama Maxwell relativistik untuk $\alpha = 0; \beta = 2; \gamma = 3$ adalah

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial B^{\hat{r}}}{\partial t} &= (e^\alpha e^\lambda r^2 \sin \theta)^{-1} \sqrt{1-V^2} \left\{ -(\sqrt{1-V^2})_{,t} B^{\hat{r}} + e^\phi e^\alpha r \left(\frac{E^{\hat{\theta}}}{\sqrt{1-V^2}} \right)_{,\varphi} \right. \\
 &+ e^\alpha e^\lambda r^2 \omega \sin \theta \left(\frac{B^{\hat{r}}}{\sqrt{1-V^2}} \right)_{,\varphi} - \left(\frac{e^{2\alpha} \sin \theta}{\sqrt{1-V^2}} [-e^{2\phi} + e^{2\alpha} r^2 \omega^2 \sin^2 \theta]^{\frac{1}{2}} \right)_{,\theta} r E^{\hat{\phi}} \\
 &\left. + \left(e^{2\alpha} r \sin \theta [-e^{2\phi} + e^{2\alpha} r^2 \omega^2 \sin^2 \theta]^{\frac{1}{2}} \right) (E^{\hat{\phi}})_{,\theta} \right\}. \tag{18}
 \end{aligned}$$

Persamaan pertama Maxwell relativistik untuk $\alpha = 1; \beta = 2; \gamma = 3$ adalah

$$\begin{aligned}
 \frac{e^{2\alpha}}{e^\phi} [-e^{2\phi} + e^{2\alpha} r^2 \omega^2 \sin^2 \theta]^{\frac{1}{2}} \left(\frac{B^{\hat{\phi}}}{\sqrt{1-V^2}} \right)_{,\varphi} + \left(\frac{e^\alpha e^\lambda \sin \theta}{\sqrt{1-V^2}} B^{\hat{\theta}} \right)_{,\theta} r + \left(\frac{e^\alpha e^\lambda r^2}{\sqrt{1-V^2}} \right)_{,r} \sin \theta B^{\hat{r}} \\
 + \left(\frac{e^\alpha e^\lambda r^2 \sin \theta}{\sqrt{1-V^2}} B^{\hat{r}} \right)_{,r} = 0. \tag{19}
 \end{aligned}$$

Persamaan (16)-(19) adalah persamaan pertama Maxwell relativistik bintang neutron berotasi cepat diukur oleh pengamat ZAMO. Persamaan ini belumlah dapat memberi arti fisis karena masih dalam bentuk persamaan diferensial yang membutuhkan solusi untuk setiap nilai medan magnet di setiap komponennya.

KESIMPULAN

Persamaan pertama Maxwell relativistik bintang neutron berotasi cepat diukur oleh pengamat ZAMO ditunjukkan persamaan (16)-(19). Persamaan tersebut selanjutnya dapat digunakan untuk merumuskan persamaan dinamika medan magnet di bintang neutron yang berotasi cepat dan mengakresi materi di sekitarnya dengan mengkombinasikannya dengan persamaan kedua Maxwell relativistik.

DAFTAR RUJUKAN

Anderson, J. L., Cohen, J.M., 1970. *Gravitational Collapse of Magnetic Neutron Stars*. *Astrophys. Space Science*. 9, 146.
 Anzer, U., Börner, G., 1979, *Accretion by Neutron Stars: Accretion Disk and Rotating Magnetic Field*, *Astron. Astrophysics*, 133-139
 Camenzind, M., 2007. *Compact Objects in Astrophysics White Dwarfs, Neutron Stars, and Black Hole.*, Verlag Berlin Heidelberg: Springer.
 Choundhuri A. R., Konar S., 2002, *Diamagnetic Screening of the Magnetic Field in Accreting Neutron stars*,

<http://www.arXiv.astro-ph/0108229>, 27 January 2002
 Cumming, A., Zweibel, E., Bildsten, L., 2001. *Magnetic Screening in Accreting Neutron Stars*, <http://www.arXiv.astro-ph/0102178>, 9 February 2001
 Geppert, U., Page, D., Zannias, T., 2000. *General Relativistic Treatment Of The Thermal, Magnetic, And Rotational Evolution of Isolated Neutron Stars With Crustal Magnetic Fields*. *Astron-Astrophys*. 2-1066.
 Haensel, P., Potekhin, A.Y., Yakovlev, D.G., 2007. *Neutron Stars I Equation of State and Structure*. New York: Springer.
 Ho, Wynn. C. G., 2011, *Evolution of a Buried Magnetic Field in The Central Compact Object Neutron Stars*, <http://www.arXiv.astro-ph/11024870v1>, 23 February 2011
 Konar, S., Bhattacharya, D., 1996, *Magnetic Field Evolution of Accreting Neutron Stars*, *R. Astron. Soc.* 284, 311-317
 Konar, S., Bhattacharya, D., 1999, *Magnetic Field Of Neutron Stars*, *MNRAS*, 303, 588
 Lander, S. K., 2010, *Equilibria And Oscillations Of Magnetised Neutron Stars*, *Thesis*, University Of Southampton
 Lovelace R. V. E., Romanova M. M., 2005, *Screening of The Magnetic Field of Disk Accreting Stars*, *The Astrophysical Journal*, 625:957-965

- Melatos A., dkk, 2001, Hydromagnetic Structure of a Neutron Stars Accreting at Its Polar Caps, *Astron Soc Aust* 421-430
- Muslinov, A., Tsygan, A.I., 1992. *General Relativistic Electric Potential Drops Above Pulsar Polar Caps*, *MNRAS*. 255, 61.
- Potekhin, A.Y., 2011. *The Physics Of Neutron Stars*. astro-ph. SR, 1235-1256.
- Rezzolla L., dkk, 2004. *General Relativistic Elektromagnetic Fields of a Slowly Rotating Magnetized Neutron Stars I. Formulation of the Equation*. *MNRAS*. 1-19.
- Sengupta, S., 1995. *General Relativistic Effect on The Induced Electric Field Exterior To Pulsar*. *ApJ*. 449, 224.
- Sengupta, S., 1997. *General Relativistic Effect on The Ohmic Decay Of Crustal Magnetic Fields in Neutron Stars*, *ApJ*. 479, L133.
- Shapiro, L. S., Teukolsky, S. A., 2004, *Black Hole, White Dwarfs, and Neutron stars*, Verlag: Wiley-VCH
- Yasrina, A., Rosyid, M.F., 2013. Tentang Medan Elektromagnetik Relativistik di Bintang Neutron yang Berotasi Lambat. Tesis tidak diterbitkan. Jurusan Fisika Universitas Gadjah Mada