# TENTANG MEDAN ELEKTROMAGNET RELATIVISTIK DI BINTANG NEUTRON YANG BEROTASI LAMBAT

**Atsnaita Yasrina, M. Farchani Rosyid**
Kelompok Penelitian Kosmologi, Astrofisika, dan Fisika Matematika FMIPA UGM
Sekip Utara BLS 21 Yogyakarta
Email: atsnaitayasrina@yahoo.co.id

**Abstrak –** Penelitian dinamika medan magnet di bintang Neutron merupakan tema kajian bintang Neutron yang banyak dikerjakan para astronom baik pada ranah teoritik maupun pengamatan. Khususnya pada penyusutan medan magnet yang ketara. Untuk menjelaskan medan magnet secara teoritik dibutuhkan persamaan dinamika medan magnet. Bintang Neutron merupakan objek relativistik dan berotasi yang merupakan alasan mendasar untuk menganalisa dinamika medan magnet secara relativistik. Dalam penelitian ini dirumuskan persamaan medan elektromagnetik dalam keadaan tidak stasioner yang mengambarkan dinamika medan magnet di sekitar bintang Neutron yang berotasi lambat dengan relativitas umum. Proses yang dilakukan adalah penguraian persamaan Maxwell dengan relativitas umum yang didasari oleh metrik untuk bintang berotasi lambat.

**Kata kunci:** *bintang neutron, berotasi lambat, persamaan Maxwell, medan magnet*

## I. PENDAHULUAN

Salah satu tema kajian bintang neutron yang banyak dikerjakan para astronom baik pada ranah teoretik maupun pengamatan adalah medan magnet di bintang neutron[1]. Kajian tentang medan magnet di bintang neutron adalah dari asal mula sampai evolusinya. Evolusi medan magnet banyak dikaji di antaranya Andrew Cumming, Ellen Zweibel, dan Lars Bildsten menjelaskan dinamikan medan magnet di bintang neutron yang mengakresi. Bentuk hubungan antara menurunnya medan magnet dengan akresi adalah dengan perbandingan antara waktu difussi Ohmic dan waktu akresi. Jika waktu diffusi Ohmic lebih besar dibanding waktu akresi, maka proses penyaringan yang merupakan proses penyusutannya medan magnet bintang neutron akan terjadi lebih efektif [2]. Bhattacharya menjelaskan bahwa berkurangnya medan magnet dengan ketara terjadi hanya di sistem ganda. Kemungkinan penyebabnya adalah perubahan Ohmic di kerak, dan penyaringan oleh materi (plasma) akresi [3]. Akresi yang dilakukan oleh bintang neutron menimbulkan fenomena yang penting, yaitu penyusutan secara ketara disebabkan oleh medan magnet, semisal dari $\approx 10^{12}$ G menjadi $\approx 10^{8}$ G [4].

Penelitian terkait bintang yang berotasi lambat telah dikaji oleh Abramowics dan Wagoner (1978) yang menghasilkan persamaan untuk massa total, momentum sudut, jumlah total dari Baryon, momen inesia, dan kecepatan angular dari “tarikan” dari kerangka inesial [5]. Penelitian terkait jawaban persamaan Maxwell di ruang waktu dari bintang yang relativistik di antaranya diawali oleh Anderson dan Cohen pada tahun 1970 yang mengulas medan elektromagnet yang stasioner di ruang waktu Schwarzschild [6]. Sengupta (1995) juga menjelaskan hal tersebut, dan menunjukkan medan listrik dengan latar belakang Schwarzschild di bintang neutron [7]. Hasilnya ternyata bukan solusi persamaan Maxwell. Sengupta (1997) menjelaskan kecepatan peluruhan Ohmic di ruang waktu Schwarschild, dan hasil yang diperoleh berlaku untuk ruang waktu eksternal bintang, dan tidak memberikan solusi untuk medan elektromagnetik internal dari bintang secara relativitas umum [8]. Geppert, Page, dan Zannias (2000) menganalisa secara matematis jawaban atas persamaan Maxwell di ruang waktu internal untuk bintang, dan menggunakan metrik umum bintang reativistik yang tidak berotasi. Hasil yang diperoleh menegaskan adanya penyusutan medan magnet (waktunya) lebih singkat dibanding yang ditemukan dalam ruang waktu yang datar [9]. Muslimov dan Tsygan (1992) pertama kali meneliti pengaruh relativitas umum yang disebabkan oleh rotasi bintang, dengan rotasi yang lambat [10].

Rezolla, Ahmedov, dan Miller menunjukkan secara analitik solusi bagi persamaan Maxwell di ruang waktu bintang neutron yang termagnetkan dan berotasi lambat. Asumsi yang digunakan adalah bahwa bintang neutron dalam keadaan tidak diselubungi oleh materi di sekitarnya, dan medan magnetnya tidak segaris dengan arah rotasi. Solusi tidak stasioner persamaan Maxwell akan sangat cocok diterapkan dalam kasus-kasus astrofisika [11].

Persamaan dinamika medan magnet dibutuhkan untuk memperoleh persamaan penyusutan medan magnet di bintang neutron. Beberapa penelitian mengkaji dengan batasan masalah secara umum seperti medan magnet dalam satu dimensi, bintang tidak berotasi, dan bintang neutron tidak dikaji dalam relativitas umum yang merupakan pendekatan untuk mempermudah perhitungan. Perlu dibangun persamaan dinamika medan magnet yang lebih realistis untuk menggambarkan bintang neutron yang sesungguhnya. Bintang neutron adalah objek astronomi yang kompak, dan berotasi dengan periode hingga milidetik. Kekompakan dan periode rotasinya yang sangat cepat, menyebabkan bintang neutron adalah objek relativistik yang dikaji dengan relativitas umum.

Permasalahan yang akan dikaji dalam penelitian ini meliputi perumusan persamaan yang menunjukkan dinamika medan magnet tidak stasioner yang secara umum digambarkan dalam persamaan Maxwell untuk bintang neutron yang berotasi lambat, bagian luar bintang terdapat materi, dan mmeperhitungkan pemindahan arus, dengan kajian relativitas umum. Hasil yang diperoleh, akan dapat dipergunakan untuk kajian penyusutan medan magnet pada bintang neutron yang mengakresi.

## II. BINTANG NEUTRON ADALAH OBJEK RELATIVISTIK DAN BEROTASI

Bintang neutron adalah objek astrofisika yang sangat ekstrem dan komplek, merupakan bintang yang paling kompak di alam semesta ini. Disebut bintang neutron karena memuat kelimpahan neutron terutama di bagian inti bintang. Hasil terbaik dan yang paling sesuai dengan persamaan keadaan, bintang neutron memiliki massa $M_* \approx 1{,}4\, M_{\text{matahari}}$ dengan memiliki jari-jari $R_* \approx 12$ km [4]. Massa maksimum yang bisa dimiliki oleh bintang neutron adalah $M_* \approx 1{,}5\, M_{\text{matahari}}$ yang memiliki jari-jari $R_* \approx 3$ km [12]. Rapat massanya $\rho \approx (2-3)\rho_o$, dengan $\rho_o = 2{,}8\times 10^{14}$ g cm$^{-3}$ adalah kerapatan normal inti [1]. Rapat massa di inti bintang lebih besar dari nilai $\rho_o$. Jika dibayangkan di bumi, satu sendok bahan bintang neutron memiliki berat milyaran ton. Tenaga gravitasinya $E_{grav} \approx GM^2/R \approx 5\times 10^{53}\,\text{erg} \approx 0{,}2Mc^2$, dan percepatan gravitasi di permukaanya [1].

Tidak seperti bintang biasa, penjelasan bintang neutron memerlukan teori relativitas umum. Beberapa hal yang menyebabkan bintang neutron harus ditinjau sebagai objek relativistik dan harus dipelajari dengan relativitas umum.

1. Pentingnya pengaruh teori relativitas umum ditentukan oleh parameter kekompakan seperti yang ditunjukkan persamaan (1)

$$x_g = r_g/R \tag{1}$$

dengan

$$r_g = 2GM/c^2 \approx 2{,}95\, M_{\text{bintang}}/M_{\text{matahari}} \tag{2}$$

dengan $r_g$ adalah jari-jari Schawzchild, $G$ konstatanta gravitasi, dan $c$ adalah kecepatan cahaya. Gravitasi pada permuakaan bintang ditentukan oleh besaran

$$g = \frac{GM}{R^2\sqrt{1-x_g}} \approx \frac{1{,}328\times 10^{14}\, M_{\text{bintang}}/M_{\text{matahari}}}{\sqrt{1-x_g}\,R_6^{\,2}}\,\text{cm s}^{-2} \tag{3}$$

dengan $R_6 \equiv R/\left(10^6\,\text{cm}\right)$. Bintang neutron memiliki $x_g \approx 0{,}2-0{,}4$. Secara umum bintang memiliki parameter kekompakan $x_g << 1$, misalnya $x_g \approx 10^{-4}$ untuk katai putih, dan $x_g \approx 10^{-6}$ untuk bintang di barisan utama dengan $M_{\text{bintang}} \approx M_{\text{matahari}}$ (Istiqomah, 2010). Jika memasukkan massa dan jari-jari bintang neutron $M_* \approx 1{,}4\, M_{\text{matahari}}$, $R_* \approx 12$ km ke persamaan (1) dapat ditunjukkan $x_g \approx 0{,}3$.

2. Bintang Neutron adalah bintang yang berotasi dengan cepat.
Pulsar adalah bintang neutron, dan berarti bintang neutron adalah bintang yang berotasi [12]. Dalam sumber lain bintang neutron berputar dengan putaran yang super cepat disebut pulsar [13]. Dikatakan berotasi lambat jika mempunyai periode lebih besar dari 1,396 ms [4].

Geometri bintang yang berotasi lambat di sistem koordinat bola $(ct, r, \theta, \phi)$ dalam relativitas umum digambarkan

$$ds^2 = -e^{2\Phi(r)}dt^2 + e^{2\Lambda(r)}dr^2 - 2\omega(r)r^2\sin^2\theta\, dt\, d\phi + r^2 d\theta^2 + r^2\sin^2\theta\, d\phi^2 \tag{4}$$

[11]. Metrik yang menggambarkan bintang neutron yang berotasi lambat dalam sistem koordinat bola $(ct, r, \theta, \phi)$ adalah

$$g_{\alpha\beta} = \begin{pmatrix} -e^{2\Phi(r)} & 0 & 0 & -\omega r^2\sin^2\theta \\ 0 & e^{2\Lambda(r)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r^2 & 0 \\ -\omega r^2\sin^2\theta & 0 & 0 & r^2\sin^2\theta \end{pmatrix}, \tag{5}$$

dengan $\omega(r)$ adalah kecepatan angular dari kerangka acuan inersia. Sementara $\Phi(r)$ adalah fungsi metrik dari bintang neutron yang tidak berotasi (simetri bola) [15]. Besaran $\Phi(r), \Lambda(r)$ yang merupakan fungsi skalar menggambarkan keadaan bintang [16]. Jika terdapat partikel yang mengorbit bintang, maka partikel akan bergerak dengan kecepatan sudut $\Omega$. Partikel dapat dianggap rehat, sehingga berlaku $\Omega = \omega$ yang berkaitan dengan bintang yang tetap, tetapi partikel akan masih mengorbit mengelilingi bintang dengan kecepatan angular $\omega$. Kedaan tersebut disebut "tarikan" dari kerangka inersia (*dragging of inertial fames*). Untuk mempelajari "tarikan" dari kerangka inersia dalam ruang waktu bintang yang berotasi dibantu oleh ZAMO (*Zero Angular-Momentum Observers*).

## III. PERSAMAAN MAXWELL DALAM RUANG WAKTU YANG BEROTASI LAMBAT DALAM KERANGKA ZAMO

Untuk menggambarkan persamaan Maxwell dalam ruang waktu yang berotasi lambat menggunakan matrik yang disajikan dalam persamaan (4). Dalam kasus ini menggunakan pendekatan bintang yang berotasi lambat, karena memberikan hasil yang akurat untuk semua periode pulsar dari hasil pengamatan (Rezzolla dkk, 2004)[11].

Persamaan pertama Maxwell dalam relativitas umum diberikan oleh

$$3!\,F_{[\alpha\beta,\gamma]} = 2\left(F_{\alpha\beta,\gamma} + F_{\gamma\alpha,\beta} + F_{\beta\gamma,\alpha}\right) = 0 \,, \qquad (6)$$

dengan $F_{\alpha\beta}$ adalah tensor medan elektromegnetik yang digambarkan merupakan hubungan antara medan vektor-4 listrik dan magnet $E^{\alpha}, B^{\alpha}$ . Komponen kovarian dari komponen tensor elektromagnetik diberikan oleh

$$F_{\alpha\beta} \equiv 2u_{[\alpha}E_{\beta]} + \eta_{\alpha\beta\gamma\delta}u^{\gamma}B^{\delta} \,, \qquad (7)$$

dengan $\eta_{\alpha\beta\gamma\delta}$ adalah *pseudo-tensorial* yang digambarkan oleh simbol Levi-Civita $\varepsilon_{\alpha\beta\gamma\delta}$ , yaitu

$$\eta^{\alpha\beta\gamma\delta} = -\frac{1}{\sqrt{-g}}\varepsilon_{\alpha\beta\gamma\delta}\,; \quad \eta_{\alpha\beta\gamma\delta} = \sqrt{-g}\;\varepsilon_{\alpha\beta\gamma\delta} \,, \qquad (8)$$

dengan

$$g \equiv \det\left|g_{\alpha\beta}\right| = -e^{2(\Phi+\Lambda)}r^4 \sin^2\theta \,, \qquad (9)$$

yang diperoleh dari matrik persamaan (4). Kecepatan vektor-4 menggunakan hasil pengamatan dari ZAMO, yaitu

$$\left(u^{\alpha}\right)_{\text{ZAMO}} \equiv e^{-\Phi(r)}(1,0,0,\omega); \qquad \left(u_{\alpha}\right)_{\text{ZAMO}} \equiv e^{\Phi(r)}(-1,0,0,0). \qquad (10)$$

Bentuk umum persamaan kedua Maxwell dalam relativitas umum adalah

$$F^{\alpha\beta}{}_{;\beta} = 4\pi J^{\alpha} \,, \qquad (11)$$

dengan arus empat $J^{\alpha}$ adalah jumlah dari arus konveksi dan konduksi yaitu

$$J^{\alpha} = \rho_e w^{\alpha} + j^{\alpha}; \qquad j^{\alpha}w_{\alpha} = 0 \,, \qquad (12)$$

dengan $w$ kecepatan empat konduktor dan $\rho_e$ rapat muatan yang sebenarnya. Jika arus konduksi $j^{\alpha}$ dibawa oleh elektron dengan konduktivitas listrik $\sigma$ , hukum Ohm dapat dituliskan

$$j_{\alpha} = \sigma F_{\alpha\beta}w^{\beta} \,. \qquad (13)$$

Penjabaran persamaan pertama dan kedua Maxwell dalam kerangka ZAMO diperoleh

$$e^{\Lambda}r\frac{\partial B^{\hat\phi}}{\partial t} = -\left(e^{\Phi}rE^{\hat\theta}\right)_{,r} + e^{\Phi+\Lambda}E^{\hat r}{}_{,\theta} + \sin\theta\left(\omega r^2 B^{\hat r}\right)_{,r} + \omega e^{\Lambda}r\left(\sin\theta B^{\hat\theta}\right)_{,\theta} \qquad (14)$$

$$e^{\Lambda}r\sin\theta\frac{\partial B^{\hat\theta}}{\partial t} = -e^{\Phi+\Lambda}E^{\hat r}{}_{,\phi} + \sin\theta\left(e^{\Phi}rE^{\hat\phi}\right)_{,r} - \omega e^{\Lambda}r\sin\theta\, B^{\hat\theta}{}_{,\phi} \qquad (15)$$

$$r\sin\theta\frac{\partial B^{\hat r}}{\partial t} = e^{\Phi}\left[E^{\hat\theta}{}_{,\phi} - \left(\sin\theta E^{\hat\phi}\right)_{,\theta}\right] - \omega r\sin\theta\, B^{\hat r}{}_{,\phi} \qquad (16)$$

$$\sin\theta\left(r^2B^{\hat r}\right)_{,r} + e^{\Lambda}r\left(\sin\theta\, B^{\hat\theta}\right)_{,\theta} + e^{\Lambda}rB^{\hat\phi}{}_{,\phi} = 0\,. \qquad (17)$$

Sementara penjabaran persamaan kedua Maxwell dalam kerangka ZAMO diperoleh

$$\sin\theta\left(r^2E^{\hat r}\right)_{,r} + e^{\Lambda}r\left(\sin\theta\, E^{\hat\theta}\right)_{,\theta} + e^{\Lambda}r\,E^{\hat\phi}{}_{,\phi} = 4\pi e^{\Lambda}r^2\sin\theta J^{\hat t} \qquad (18)$$

$$e^{\Phi}\left[\left(\sin\theta\, B^{\hat\theta}\right)_{\theta} - B^{\hat\theta}{}_{,\varphi}\right] - \omega r\sin\theta\, E^{\hat r}{}_{,\phi} = \left(r\sin\theta\right)\frac{\partial E^{\hat r}}{\partial t} + 4\pi e^{\Phi}r\sin\theta J^{\hat r} \qquad (19)$$

$$e^{\Phi+\Lambda}B^{\hat r}{}_{,\phi} - \sin\theta\left(e^{\Phi}r\,B^{\hat\phi}\right)_{,r} - \left(\omega e^{\Lambda}\sin\theta\right)E^{\hat\theta}{}_{,\phi} = \left(e^{\Lambda}r^2\sin\theta\right)\frac{\partial E^{\hat\theta}}{\partial t} + 4\pi e^{\Phi+\Lambda}r\sin\theta J^{\hat\theta} \qquad (20)$$

$$\left(e^{\Phi}rB^{\hat\theta}\right)_{,r} - e^{\Phi+\Lambda}B^{\hat r}{}_{,\theta} + \sin\left(\omega r^2E^{\hat r}\right)_{,r} + \omega e^{\Lambda}r\left(\sin\theta E^{\hat\theta}\right)_{,\theta} = \left(e^{\Lambda}r\right)\frac{\partial E^{\hat\phi}}{\partial t} + 4\pi e^{\Lambda}\omega r^2\sin\theta J^{\hat t} + 4\pi e^{\Phi+\Lambda}J^{\hat\phi}, \qquad (21)$$

dengan arus empat dalam kerangka ZAMO $J^{\hat\alpha}$ adalah

$$J^{\hat t} = \rho_e - \sigma\, e^{-\Phi}r\sin\theta\, E^{\hat\phi}\Omega \qquad (22)$$

$$J^{\hat r} = \sigma e^{2\Lambda}\left(E^{\hat r} - \varpi\frac{r\sin\theta}{e^{\Phi}}B^{\hat\theta}\right) \qquad (23)$$

$$J^{\hat\theta} = \sigma r^2\left(E^{\theta} + \varpi\frac{r\sin\theta}{e^{\Phi}}B^{\hat r}\right) \qquad (24)$$

$$J^{\hat\phi} = \left(r\sin\theta\right)^2\left(\frac{\rho_e}{e^{\Phi}r\sin\theta} + \sigma E^{\hat\phi}\right). \qquad (25)$$

## IV. RUMUSAN DINAMIKA MEDAN MAGNET DI BINTANG NEUTRON YANG BEROTASI LAMBAT

Menekankan bahwa di luar bintang neutron terdapat materi, maka konduktivitas listrik di sekitar bintang neutron tidak nol dan tidak seragam. Selain itu, kerena pemindahan arus tidak diabaikan, maka komponen perubahan medan listrik tehadap waktu juga tidak dapat diabaikan. Perumusan dinamika medan magnet untuk komponen radial adalah

$$\frac{\partial B^{\hat r}}{\partial t} = \frac{1}{4\pi e^{\Lambda}\left(r^2\sin\theta\right)^2}\left\{\frac{1}{\sigma}\left\{e^{\Phi+\Lambda}B^{\hat r}{}_{,\phi} - \sin\theta\left(e^{\Phi}rB^{\hat\phi}\right)_{,r} - \left(e^{\Lambda}r^2\sin\theta\right)\frac{\partial E^{\hat\theta}}{\partial t}\right\} + O(\Omega)\right\}_{,\phi}$$

$$
\begin{aligned}
&-\frac{1}{4\pi\, e^{\Lambda} r^{4}\sin\theta}\Bigg\{\frac{1}{\sigma\sin\theta(1-\omega\Omega)}\Big[\Big(e^{\Phi} rB^{\hat{\theta}}\Big)_{r} - e^{\Phi+\Lambda}B^{\hat{r}}{}_{,\theta} + \sin\theta \\
&\Bigg\{\frac{\omega r^{2}}{4\pi\sigma e^{\Phi+2\Lambda} r\sin\theta}\bigg\{e^{\Phi}\Big[\Big(\sin\theta B^{\hat{\theta}}\Big)_{,\theta} - B^{\hat{\theta}}{}_{,\phi}\Big] - (r\sin\theta)\frac{\partial E^{\hat{r}}}{\partial t}\bigg\}\Bigg\}_{,r} \\
&+\omega e^{\Lambda} r\Bigg\{\frac{1}{4\pi\sigma e^{\Phi+\Lambda} r^{3}}\bigg\{e^{\Phi+\Lambda}B^{\hat{r}}{}_{,\phi} - \sin\theta\Big(e^{\Phi} rB^{\phi}\Big)_{,r} - \Big(e^{\Lambda} r^{2}\sin\theta\Big)\frac{\partial E^{\hat{\theta}}}{\partial t}\bigg\}\Bigg\}_{,\theta} \\
&-\Big(e^{\Lambda} r\Big)\frac{\partial E^{\hat{\phi}}}{\partial t} - 4\pi e^{\Lambda} r^{2}\sin\theta\rho_{e}(\Omega+\omega) + \sin\theta O(\Omega)_{,r} + \big(\sin\theta O(\Omega)\big)_{,\theta}\Bigg]\Bigg\}_{,\theta} \\
&-\omega B^{\hat{r}}{}_{,\phi}.
\end{aligned}
\tag{26}
$$

Perumusan dinamika medan magnet untuk komponen polar adalah

$$
\begin{aligned}
\frac{\partial B^{\hat{\theta}}}{\partial t} =& -\frac{e^{\Phi}}{4\pi e^{\Phi+2\Lambda}(r\sin\theta)^{2}}\Bigg\{\frac{1}{\sigma}\bigg\{e^{\Phi}\Big[\Big(\sin\theta B^{\theta}\Big)_{,\theta} - B^{\hat{\theta}}{}_{,\phi}\Big] - (r\sin\theta)\frac{\partial E^{\hat{r}}}{\partial t}\bigg\} + O(\Omega)\Bigg\}_{,\phi} \\
&+\frac{1}{4\pi\sigma e^{\Lambda} r\sin^{2}\theta}\Bigg\{\frac{1}{\sigma e^{\Lambda} r^{2}(1-\omega\Omega)}\Big[\Big(e^{\Phi} rB^{\hat{\theta}}\Big)_{,r} - e^{\Phi+\Lambda}B^{\hat{r}}{}_{,\theta} + \sin\theta \\
&\Bigg\{\frac{\omega r^{2}}{4\pi\sigma e^{\Phi+2\Lambda} r\sin\theta}\bigg\{e^{\Phi}\Big[\Big(\sin\theta B^{\hat{\theta}}\Big)_{,\theta} - B^{\hat{\theta}}{}_{,\phi}\Big] - (r\sin\theta)\frac{\partial E^{\hat{r}}}{\partial t}\bigg\}\Bigg\}_{,r} \\
&+\omega e^{\Lambda} r\Bigg\{\frac{1}{4\pi\sigma e^{\Phi+\Lambda} r^{3}}\bigg\{e^{\Phi+\Lambda}B^{\hat{r}}{}_{,\phi} - \sin\theta\Big(e^{\Phi} rB^{\hat{\phi}}\Big)_{,r} - \Big(e^{\Lambda} r^{2}\sin\theta\Big)\frac{\partial E^{\hat{\theta}}}{\partial t}\bigg\}\Bigg\}_{,\theta} \\
&-\Big(e^{\Lambda} r\Big)\frac{\partial E^{\hat{\phi}}}{\partial t} - 4\pi e^{\Lambda} r^{2}\sin\theta\,\rho_{e}(\Omega+\omega) + \sin\theta\, O(\Omega)_{,r} + \big(\sin\theta\, O(\Omega)\big)_{\theta}\Bigg]\Bigg\}_{,r} \\
&-\omega B^{\hat{\theta}}{}_{,\phi}.
\end{aligned}
\tag{27}
$$

Perumusan dinamika medan magnet untuk komponen toroidal adalah

$$
\begin{aligned}
\frac{\partial B^{\hat{\phi}}}{\partial t} =& \frac{1}{e^{\Lambda} r\sin\theta}\Bigg\{\frac{1}{\sigma e^{\Lambda} r}\bigg\{e^{\Phi+\Lambda}B^{\hat{r}}{}_{,\phi} - \sin\theta\Big(e^{\Phi} rB^{\hat{\phi}}\Big)_{,r} - \Big(e^{\Lambda} r^{2}\sin\theta\Big)\frac{\partial E^{\hat{\theta}}}{\partial t}\bigg\} + O(\Omega)\Bigg\}_{,r} \\
&+\frac{1}{4\pi e^{2\Lambda} r^{2}}\Bigg\{\frac{1}{\sigma\sin\theta}\bigg\{e^{\Phi}\Big[\Big(\sin\theta B^{\hat{\theta}}\Big)_{,\theta} - B^{\hat{\theta}}{}_{,\phi}\Big] - (r\sin\theta)\frac{\partial E^{\hat{r}}}{\partial t}\bigg\} + O(\Omega)\Bigg\}_{\theta} \\
&+\frac{\sin\theta}{e^{\Lambda} r}\Big(\omega r^{2}B^{\hat{r}}\Big)_{,r} + \omega\Big(\sin\theta B^{\hat{\theta}}\Big)_{,\theta}.
\end{aligned}
\tag{28}
$$

## V. KESIMPULAN

Perumusan dinamika medan magnet adalah sebagai persamaan dasar untuk merumuskan persamaan penyusutan medan magnet di bintang neutron yang mengakresi. Perumusan dinamika medan magnet di bintang neutron yang berotasi lambat, di luar bintang neutron terdapat materi, dan memperhitungkan pemindahan arus untuk tiap komponen radial, polar, dan toroidal ditunjukkan persamaan (26)-(28).

## PUSTAKA


[1] P. Haensel, A.Y. Potekhin, Yakovlev, D.G., 2007, *Neutron Stars 1 Equation of State and Structure*, New York: Springer

[2] A. Cumming, E. Zweibel , L. Bildsten , 2001, Magnetic Screening in Accreting Neutron Stars, *http://www.arXiv.astro-ph/0102178*, 9 February 2001

[3] D. Bhattacharya, 2002, Evolution of Neutron Stars Magnetic Fields, Jurnal Astrophysics, *The Astrophysical Jurnal. Astr*, 67-72

[4] A.Y. Potekhin, 2011, The Physics Of Neutron Stars, *astro-ph*. SR, 1235-1256

[5] M. A. Abramowicz, R. V. Wagoner, 1978, Slowly Rotating Relativistic Stars, *ApJ*, 1063-1078

[6] J. L. Anderson, J. M. Cohen, 1970, Gravitational Collapse of Magnetic Neutron Stars, *Astropys. Space Science*, 9, 146

[7] S. Sengupta, 1995, General Relativistic Effect on The Induced Electric Field Exterior To Pulsar, *ApJ*, 449, 224

[8] S. Sengupta, 1997, General Relativistic Effect on The Ohmic Decay Of Crustal Magnetic Fields in Neutron Stars, *ApJ*, 479, L133

[9] U. Geppert, D. Page, T. Zannias, 2000, General Relativitic Treatment Of The Thermal, Magnetic, And Rotational Evolution of Isolated Neutron Stars With Crustal Magnetic Fields, *Astron-Astrophys*, 2-1066

[10] A. Muslinov, A.I. Tsygan, 1992, General Relativistic Electric Potential Drops Above Pulsar Polar Caps, *MNRAS*, 255, 61

[11] Rezzolla L., dkk, 2004, General Relativitic Elektromagnetic Fields of a Slowly Rotating Magnetized Neutron Stars I. Formulation of the Equation, *MNRAS*, 1-19

[12] L.S. Shaphiro, S.A. Teukolsky, 2004, *Black Hole, White Dwarfs, and Neutron stars*, Verlag: Wiley-VCH

[13] M. Camenzind, 2007, *Compact Objects in Astrophysics White Dwarfs, Neutron Stars, and Black Hole*, Verlag Berlin Heidelberg: Springer

[14] F. Weber, K. Glendenning, K. M. Weigel, 1991, Structure And Stability Of Rotating Relativistic Neutron Stars, *ApJ*, 579-591

[15] K. Kono, 2001, Moments Of Inertia Of Relativistic Magnetized Stars, *Astronomy and Astropysics*, 739-8526