

DOI: doi.org/10.21009/0305020501

EFEK MESON σ^* PADA PERSAMAAN KEADAAN BINTANG NEUTRON

Alrizal¹⁾, A. Sulaksono²⁾

^{1,2}Departemen Fisika FMIPA UI, Kampus UI Depok, 16424

¹⁾alrizal91@gmail.com, ²⁾anto.sulaksono@sci.ui.ac.id

Abstrak

Keberadaan partikel hyperon di dalam bintang neutron telah dipelajari dengan menggunakan model medan rata-rata relativistik (RMF). Dengan mengasumsikan adanya hyperon di dalam bintang neutron akan berdampak kepada persamaan keadaan dan sifat-sifat dari bintang neutron. Pada kajian ini akan dibahas bagaimana pengaruh variasi konstanta kopling meson σ^* terhadap persamaan keadaan bintang neutron dengan menggunakan model medan rata-rata relativistik dan parameter set GM1 yang kemudian dikomparasikan dengan hasil yang didapat dengan menggunakan parameter set BSP. Terlihat dengan memvariasikan konstanta kopling σ^* berpengaruh terhadap persamaan keadaan bintang neutron.

Kata-kata kunci: *Bintang Neutron, Hyperon, Meson σ^* , Persamaan Keadaan*

Abstract

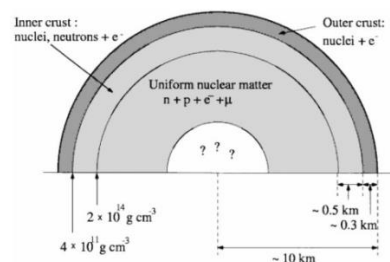
The existence of hyperon in neutron stars has been studied by relativistic mean field model. By assuming the hyperon in a neutron star will affect the equation of state and properties of neutron star. In this study, we will discuss how σ^* meson coupling constant variation affecting the equation of state of neutron stars by using relativistic mean field model and GM1 parameter which later will be compared with BSP parameter. It can be seen that by varying the σ^* coupling constants affecting the equation of state of neutron stars.

Keywords : *Neutron star, Hyperon, σ^* meson, Equation of state*

1. Pendahuluan

Bintang neutron merupakan salah satu jenis bintang padat yang memiliki massa sekitar $1,4M_{\odot}$ (M_{\odot} merupakan massa matahari) dengan jari-jari yang hanya berkisar 10 km. Kerapatan rata-rata bintang neutron adalah $(2 - 3)\rho_0$ namun kerapatan pada inti bintang neutron bisa mencapai $(10 - 20)\rho_0$. Dengan ρ_0 merupakan kerapatan nuklir normal [1].

Kemungkinan struktur dari bintang neutron dapat dilihat pada gambar 1. Terdiri dari bagian permukaan, kulit luar, kulit dalam, dan inti. Materi penyusun bagian dalam inti masih menjadi pertanyaan. kerapatan yang tinggi pada inti bintang neutron memungkinkan adanya materi seperti quark, kaon, hyperon, dan lain-lain. Pada kajian ini, inti bintang neutron diasumsikan terdiri dari hyperon [2].



Gambar 1. Struktur bintang neutron [2]

Hyperon merupakan partikel jenis barion yang mengandung satu atau lebih *quark strange*. Hyperon yang digunakan dalam kajian ini adalah hyperon Λ , Σ^- , Σ^0 , Σ^+ , Ξ^0 , dan Ξ^- . Untuk menjelaskan interaksi antar hyperon diperkenalkan dua medan meson baru yaitu meson σ^* dan ϕ [3].

Pada kajian ini akan dilihat bagaimana pengaruh variasi konstanta kopling meson σ^* terhadap persamaan keadaan bintang neutron dengan menggunakan parameter set GM1 yang kemudian akan dikomparasikan dengan hasil yang didapat dengan menggunakan parameter set BSP.

2. Metode Penelitian

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya konstanta kopling meson σ^* akan divariasikan dan akan dilihat bagaimana pengaruhnya terhadap persamaan keadaan bintang neutron dengan menggunakan model RMF. Parameter yang digunakan adalah parameter set GM1 [4] yang kemudian akan dikomparasikan dengan hasil yang didapat dengan menggunakan parameter set BSP.

Konstanta kopling hyperon dengan ω , ρ , dan ϕ ditentukan dengan menggunakan simetri SU(6) [5]

$$\begin{aligned} \frac{1}{3} g_{\omega N} &= \frac{1}{2} g_{\omega \Lambda} = \frac{1}{2} g_{\omega \Sigma} = g_{\sigma \Xi} \\ \frac{1}{3} g_{\omega N} &= \frac{1}{2} g_{\omega \Lambda} = \frac{1}{2} g_{\omega \Sigma} = g_{\sigma \Xi} \\ 2g_{\phi \Lambda} &= 2g_{\phi \Sigma} = g_{\phi \Xi} = -\frac{2\sqrt{2}}{3} g_{\omega N}, g_{\phi N} = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

Sementara konstanta kopling hyperon dengan meson σ diperoleh dari perhitungan kedalaman potensial dalam keadaan saturasi.

$$U_Y^N(\rho_0) = -g_{\sigma Y} \sigma(\rho_0) + g_{\omega Y} \omega(\rho_0) \quad (2)$$

Dengan batasan $U_{\Lambda}^N = -28 \text{ MeV}$, $U_{\Sigma}^N = +30 \text{ MeV}$, dan $U_{\Xi}^N = -18 \text{ MeV}$ [3].

Kerapatan Lagrangian total untuk model RMF terdiri dari kerapatan Lagrangian barion, meson, interaksi, dan lepton. Dapat ditulis dengan [6]

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_B + \mathcal{L}_M + \mathcal{L}_{int} + \mathcal{L}_L. \quad (3)$$

Dimana kerapatan Lagrangian barion dapat ditulis,

$$\mathcal{L}_B = \sum_B \bar{\psi}_B (i\gamma_{\mu} \partial_{\mu} - m_B) \psi_B, \quad (4)$$

kerapatan Lagrangian meson,

$$\mathcal{L}_M = \mathcal{L}_{\sigma} + \mathcal{L}_{\omega} + \mathcal{L}_{\rho} + \mathcal{L}_{\delta} + \mathcal{L}_{\sigma^*} + \mathcal{L}_{\phi} \quad (5)$$

kerapatan Lagrangian interaksi,

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{lin} + \mathcal{L}_{non lin}, \quad (6)$$

dan kerapatan Lagrangian lepton,

$$\mathcal{L}_L = \sum_L \bar{\psi}_L (i\gamma_{\mu} \partial_{\mu} - m_L) \psi_L. \quad (7)$$

Dalam kesetimbangan β , potensial kimia dari partikel dihubungkan melalui persamaan [7]

$$\mu_i = B_i \mu_n - Q_i \mu_e. \quad (8)$$

Dengan B_i = bilangan barion patrikel i , dan Q_i = muatan listrik partikel i . Dengan menggunakan hubungan (8) diperoleh hubungan (9) [8]

$$\begin{aligned} \mu_{\Lambda} &= \mu_{\Sigma^0} = \mu_{\Xi^0} = \mu_n \\ \mu_{\Sigma^-} &= \mu_{\Xi^-} = \mu_n + \mu_e \\ \mu_p &= \mu_{\Sigma^+} = \mu_n - \mu_e \end{aligned} \quad (9)$$

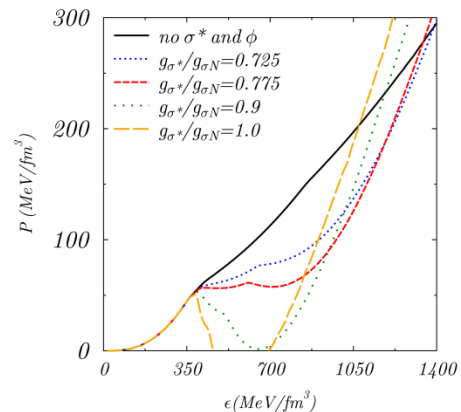
3. Hasil dan Pembahasan

Nilai variasi konstanta kopling meson σ^* dapat dilihat pada tabel 1.

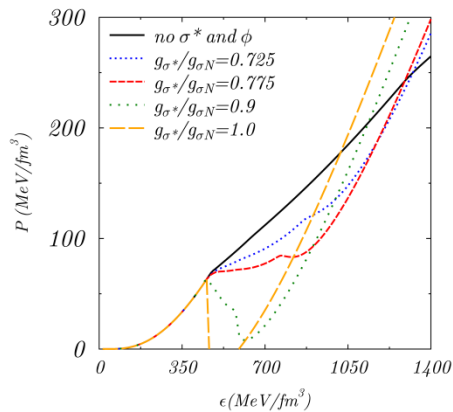
Tabel 1. Variasi nilai kopling $g_{\sigma^* \Lambda} / g_{\sigma N}$.

No.	$g_{\sigma^* \Lambda} / g_{\sigma N}$
1	Tanpa σ^* dan ϕ
2	0,725
3	0,775
4	0,9
5	1

Pertama akan kita lihat bagaimana pengaruh variasi konstanta kopling meson σ^* , seperti yang ditunjukkan pada tabel 1, terhadap persamaan keadaan bintang neutron dengan menggunakan parameter set GM1. Diperoleh hasil hubungan tekanan dan kerapatan energi seperti yang ditunjukkan pada gambar 2. Sementara gambar 3 menunjukkan hubungan tekanan dan kerapatan energi dengan menggunakan parameter set BSP.



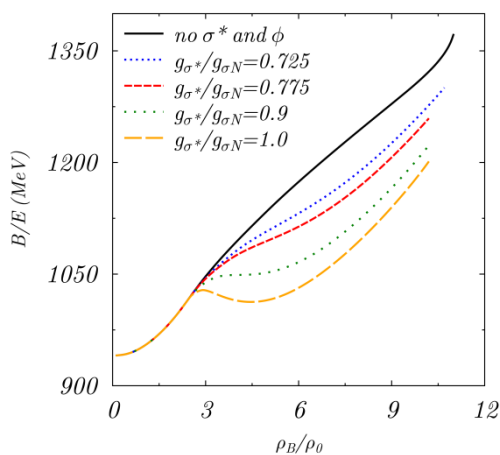
Gambar 2. Hubungan P dan ϵ menggunakan parameter set GM1.



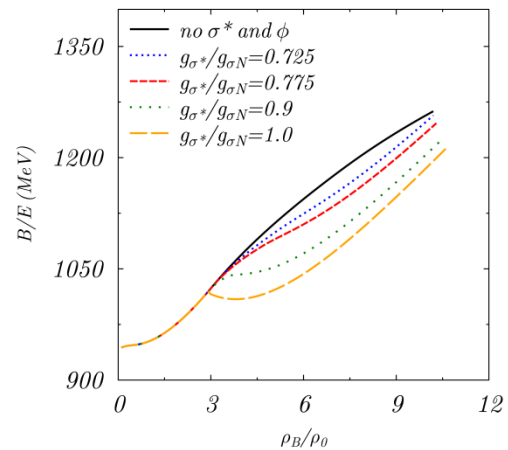
Gambar 3. Hubungan P dan ϵ menggunakan parameter set BSP.

Berdasarkan pada gambar 2, kita dapat melihat untuk setiap nilai variasi $g_{\sigma^* \Lambda}/g_{\sigma N}$ mengalami percabangan pada energi densitas dan tekanan tertentu. Percabangan pada grafik menandakan adanya transisi fase dari materi nukleon menjadi hyperon. Berdasarkan kepada grafik kita juga dapat melihat pada variasi nilai $g_{\sigma^* \Lambda}/g_{\sigma N} = 0,9$ dan $g_{\sigma^* \Lambda}/g_{\sigma N} = 1$ akan muncul *second minimum* yang menandakan adanya kestabilan dari materi. Dengan kata lain pada keadaan tersebut materi hyperon lebih banyak atau menjadi lebih dominan. Sementara berdasarkan pada gambar 3, kita dapat menyimpulkan tidak ada perubahan yang signifikan ketika parameter set BSP digunakan.

Selanjutnya akan ditampilkan hubungan energi ikat dengan kerapatan saat saturasi dengan menggunakan parameter set GM1 seperti yang ditunjukkan oleh gambar 4 dan BSP pada gambar 5.



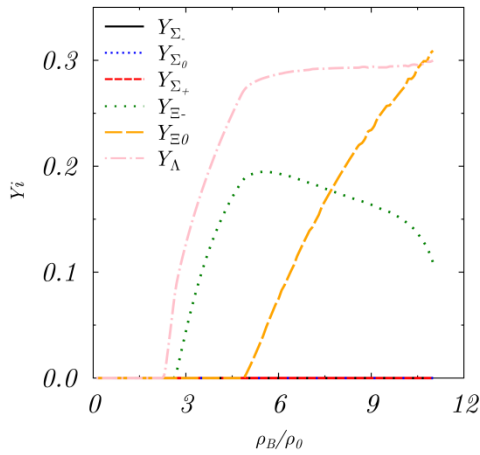
Gambar 4. Hubungan energi ikat dan kerapatan saat saturasi menggunakan parameter set GM1.



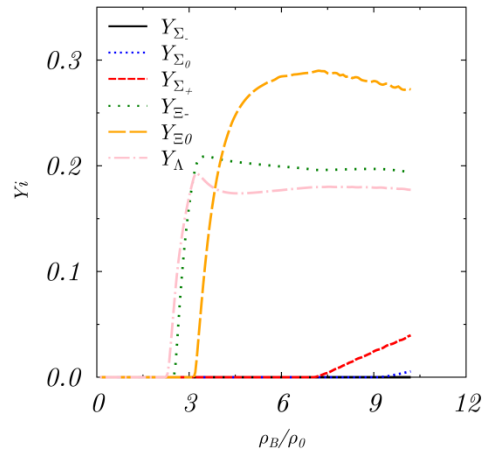
Gambar 5. Hubungan energi ikat dan kerapatan saat saturasi menggunakan parameter set BSP.

Berdasarkan kepada hubungan energi ikat dan kerapatan saat saturasi seperti yang ditunjukkan oleh grafik 4 dan 5, kita dapat melihat adanya kemunculan *second minimum* pada $\rho_B = 4.5 \rho_0$ untuk kedua parameter set yang menandakan adanya suatu kestabilan dari materi pada nilai konstanta kopling $g_{\sigma^* \Lambda}/g_{\sigma N} = 1$. Catatan, adanya energi ikat minimum pada relasi energi versus kerapatan mengindikasikan kestabilan pada titik tersebut. Dimana kestabilan suatu materi ditandai dengan keadaan energi paling minimum. Hal ini juga mengkonfirmasi apa yang telah didapat pada hubungan tekanan dan rapat energi sebelumnya.

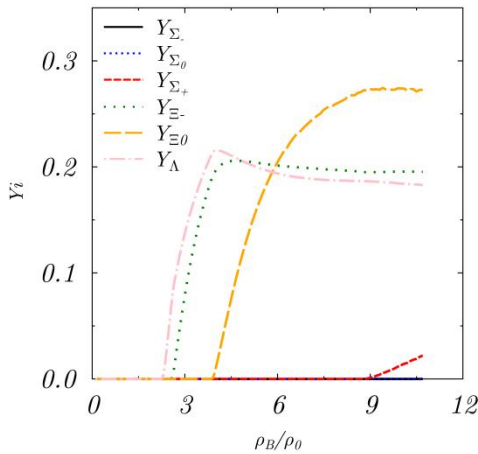
Selanjutnya, untuk mengetahui distribusi partikel untuk masing-masing variasi konstanta kopling dan partikel apa yang berperan paling dominan dalam terjadinya transisi fase akan ditampilkan hubungan fraksi dengan kerapatan saat saturasi dengan menggunakan parameter set GM1 seperti yang ditunjukkan oleh gambar 6-10.



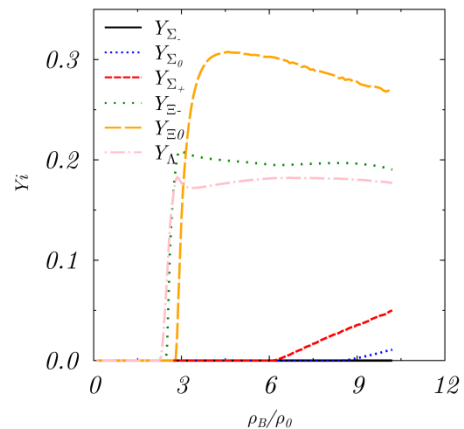
Gambar 6. Hubungan fraksi dan kerapatan saat saturasi menggunakan parameter set GM1 tanpa σ^* , ϕ .



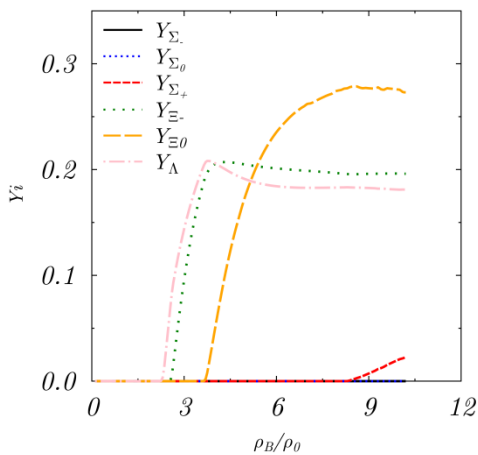
Gambar 9. Hubungan fraksi dan kerapatan saat saturasi menggunakan parameter set GM1 dengan $g_{\sigma^*\Lambda}/g_{\sigma N} = 0,9$.



Gambar 7. Hubungan fraksi dan kerapatan saat saturasi menggunakan parameter set GM1 dengan $g_{\sigma^*\Lambda}/g_{\sigma N} = 0,725$.



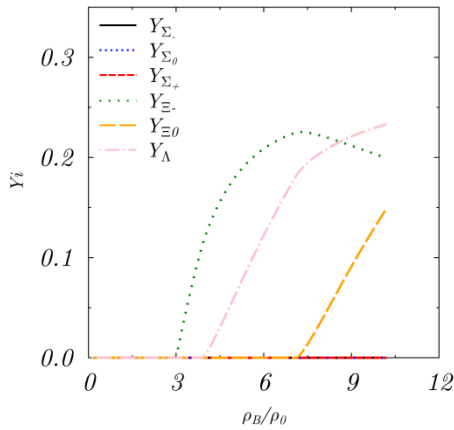
Gambar 10. Hubungan fraksi dan kerapatan saat saturasi menggunakan parameter set GM1 dengan $g_{\sigma^*\Lambda}/g_{\sigma N} = 1,0$.



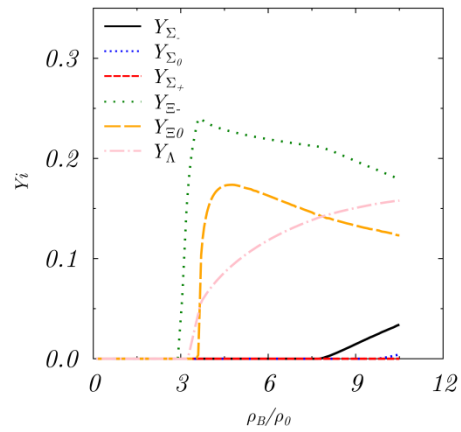
Gambar 8. Hubungan fraksi dan kerapatan saat saturasi menggunakan parameter set GM1 dengan $g_{\sigma^*\Lambda}/g_{\sigma N} = 0,775$.

Berdasarkan gambar 6 – 10, kita dapat melihat hyperon pertama yang muncul adalah hyperon Λ , kemudian diikuti oleh hyperon Ξ^- dan hyperon Ξ^0 . Hyperon Σ^+ muncul Ketika nilai konstanta $g_{\sigma^*\Lambda}/g_{\sigma N} = 0,725$. Dan hyperon Σ^0 baru muncul ketika nilai $g_{\sigma^*\Lambda}/g_{\sigma N} = 0,9$. Sementara hyperon Σ^- tidak muncul sama sekali bahkan ketika nilai $g_{\sigma^*\Lambda}/g_{\sigma N} = 1$. Berdasarkan kepada grafik, kita juga dapat melihat bahwa partikel yang berperan paling dominan dalam terjadinya transisi fase dari materi nukleon menjadi hyperon adalah partikel Σ^+ .

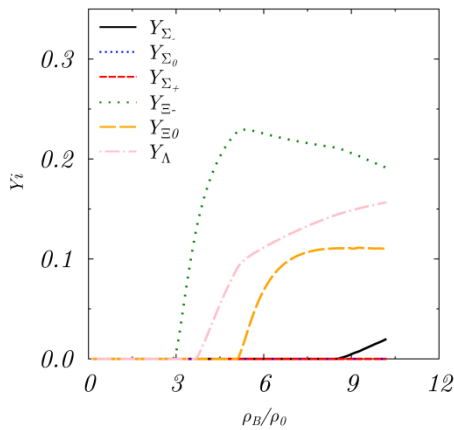
Selanjutnya akan ditampilkan hubungan fraksi dengan kerapatan saat saturasi dengan menggunakan parameter set BSP seperti yang ditunjukkan oleh gambar 11-15.



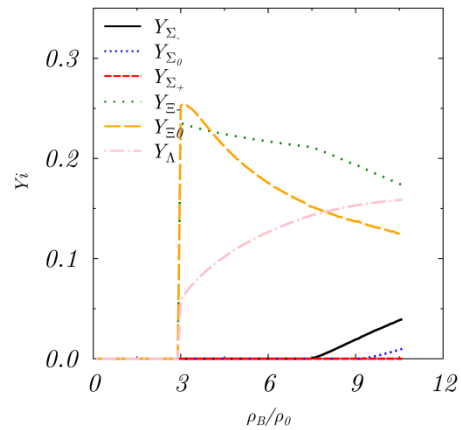
Gambar 11. Hubungan fraksi dan kerapatan saat saturasi menggunakan parameter set BSP tanpa σ^* , ϕ .



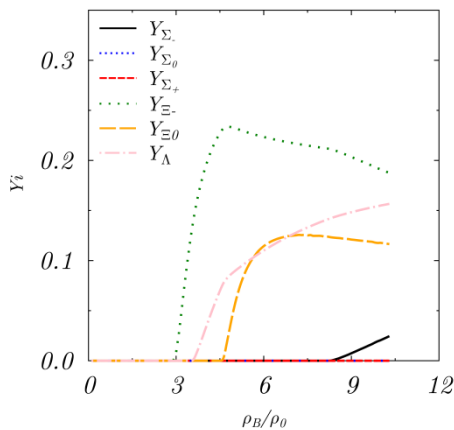
Gambar 14. Hubungan fraksi dan kerapatan saat saturasi menggunakan parameter set BSP dengan $g_{\sigma^*\Lambda}/g_{\sigma N} = 0,9$.



Gambar 12. Hubungan fraksi dan kerapatan saat saturasi menggunakan parameter set BSP dengan $g_{\sigma^*\Lambda}/g_{\sigma N} = 0,725$.



Gambar 15. Hubungan fraksi dan kerapatan saat saturasi menggunakan parameter set BSP dengan $g_{\sigma^*\Lambda}/g_{\sigma N} = 1$.



Gambar 13. Hubungan fraksi dan kerapatan saat saturasi menggunakan parameter set BSP dengan $g_{\sigma^*\Lambda}/g_{\sigma N} = 0,775$.

Berbeda dengan menggunakan parameter set GM1, ketika kita menggunakan parameter set BSP kita dapatkan hyperon yang pertama muncul adalah hyperon Ξ^- kemudian diikuti dengan hyperon Λ dan hyperon Ξ^0 . Hyperon Σ^- muncul Ketika nilai konstanta $g_{\sigma^*\Lambda}/g_{\sigma N} = 0,725$. Dan hyperon Σ^0 baru muncul ketika nilai $g_{\sigma^*\Lambda}/g_{\sigma N} = 0,9$. Sementara hyperon Σ^+ tidak muncul sama sekali bahkan ketika nilai $g_{\sigma^*\Lambda}/g_{\sigma N} = 1$. Berdasarkan kepada grafik, kita dapat melihat bahwa partikel yang berperan paling dominan dalam terjadinya transisi fase adalah partikel Σ^- .

4. Simpulan

Dari kajian ini, kita dapat menyimpulkan ketika nilai konstanta kopling $g_{\sigma^*\Lambda}/g_{\sigma N}$ divariasikan dari tanpa σ^*

dan ϕ hingga $g_{\sigma^*\Lambda}/g_{\sigma N} = 1$ didapat bahwa semakin besar nilai $g_{\sigma^*\Lambda}/g_{\sigma N}$ memungkinkan munculnya *second minimum* pada $\rho_B=4.5 \rho_0$ yang menandakan adanya kestabilan materi yaitu pada nilai $g_{\sigma^*\Lambda}/g_{\sigma N} = 0,9$ dengan kata lain pada nilai tersebut hyperon menjadi lebih dominan dibanding nukleon. Sementara untuk nilai $g_{\sigma^*\Lambda}/g_{\sigma N} = 1$ *second minimum* muncul dengan nilai negatif yang menandakan ketidakstabilan. Terlihat bahwa ketika menggunakan parameter set GM1, hyperon yang berkontribusi terhadap terjadinya transisi fase adalah hyperon Σ^+ sementara hyperon Σ^0 berkontribusi terhadap terjadinya transisi fase untuk parameter set BSP.

Daftar Acuan

- [1] P.Haensel, A.Y. Potekhin, D.G Yakovlev. *Neutron stars I*, 1st ed. New York, Springer (2007), p.1
- [2] Heiselberg, Morten HJ, Phases of dense matter neutron stars, Elsevier. 328(2000), p.242
- [3] Jurgen SB, Matthias H, Horst S, Walter G, Phase transition to hyperon matter in neutron stars, Physical Review Letter. 89(2002) p.2
- [4] NK Glendenning, SA Moszkowski, Reconciliation of neutron-star masses and binding of the Λ in hypernuclei, Physical Review Letter. 67(1991) p.3
- [5] Jurgen SB, Avraham G, Properties of strange hadronic matter in bulk and in finite systems, Physical Review C, 62(2000) p.2
- [6] A. Sulaksono, Anisotropic pressure and hyperon in neutron stars, International Journal of Modern Physics E, (2014) p.3
- [7] Jurgen SB, IN Mishustin, Hyperon-rich matter in neutron stars, Physical Review C, 53(1995) p.3
- [8] I Vidana, A Polls, A Ramos, L Engvik, MH Jensen, Hyperon-hyperon interactions and properties of neutron star matter, Physical Review C, 62(2000) p.1