

# KARAKTERISTIK SYMMETRIC NUCLEAR MATTER PADA TEMPERATUR NOL

Annisa Fitri<sup>1</sup>, Anto Sulaksono<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Departemen Fisika FMIPA UI, Kampus UI Depok, 16424

<sup>1</sup>annisa.fitri11@sci.ui.ac.id

<sup>2</sup>anto.sulaksono@sci.ui.ac.id

## Abstrak

Pemeriksaan karakteristik *Symmetric Nuclear Matter* dilakukan untuk melihat ketidakstabilan struktur nuklir saat tumbukan ion berat, yang dipengaruhi oleh suku non linear dari persamaan medan rerata relativistik lanjutan. Perhitungan variabel kompresibilitas, tekanan, massa efektif nukleon, dan kecepatan suara dilakukan secara numerik menggunakan metode turunan berhingga. Penggunaan parameter nonlinear mempengaruhi hubungan antara perbandingan kerapatan dengan variabel termodinamik yang didapatkan. Suku non linear interaksi medan meson memberikan pengaruh terhadap karakteristik dari materi nuklir. Representasi hubungan antara perbandingan kerapatan dan perbandingan kecepatan suara dengan kecepatan cahaya adalah relevan, serta tidak menunjukkan perilaku tidak fisis.

**Kata kunci:** kecepatan, kompresibilitas, massa, meson, nukleon, suara, tekanan

## Abstract

Investigation of characteristics of Symmetric Nuclear Matter is done to check the instability of nuclear structure when heavy ion collisions, which are influenced by non linear terms of the extended relativistic mean field equations. The calculation of the variable compressibility, pressure, the effective mass of nucleons, and sound velocity is done numerically using finite derivatives. The use of nonlinear parameters affect the relationship between the ratio of the density with thermodynamic variables obtained. Non linear terms of meson field interaction give effect to the characteristics of nuclear matter. Representation between the ratio of the density and sound velocity comparison with the speed of light is relevant, and does not indicate unphysical behavior.

**Keywords:** compressibility, mass, meson, nucleons, pressure, sound, velocity

## 1. Pendahuluan

Eksperimen tumbukan ion berat menghasilkan suatu fase dimana jumlah proton dan neutron dari nukleon sama. Kondisi ini dinamakan SNM (Symmetric Nuclear Matter). Teori medan rerata (relativistic mean field theory) digunakan untuk mendeskripsikan karakteristik keadaan dasar dari SNM. Digunakan ansatz standar (S-RMF) yaitu memasukkan kontribusi medan meson  $\rho$  (vektor-isovektor),  $\sigma$  (scalar-isoskalar), dan  $\omega$  (vektor-isoskalar) sebagai derajat kebebasan dengan suku non linear yang menunjukkan interaksi antar meson. Formalisme lagrangian RMF dikembangkan dengan memasukkan interaksi pertukaran meson. Model RMF lanjutan mengandung suku hingga suku pangkat empat, dapat diaplikasikan untuk mempelajari karakteristik finite nuclei. Waldhauser [1] meneliti tentang karakteristik nuklir dari persamaan RMF non linear standar, pengamatannya terhadap solusi persamaan *self consistent* pada persamaan medan

rerata menunjukkan solusi bercabang saat kerapatan tinggi, hal ini mengindikasikan bahwa persamaan keadaan dari RMF yang digunakan belum stabil dan menimbulkan *unphysical behaviour*. Oleh karena itu pemeriksaan terhadap kestabilan persamaan keadaan dilanjutkan dengan memeriksa kecepatan suara dari persamaan energi yang didapat. Ke Liu [2] mengamati efek dari kopling iso-skalar  $\sigma$ - $\omega$  terhadap persamaan keadaan dan karakteristik materi nuklir simetri dan asimetri pada temperatur berhingga. Dapat terlihat bahwa pendekatan RMF dikembangkan dengan menambah suku non linear dengan harapan mendapatkan hasil yang dapat dijelaskan secara fisis dengan baik. Sulaksono A. [3] meneliti kriteria dari parameter-parameter non linear dari model medan rerata relativistik, kriteria tersebut digunakan untuk menganalisis ketidakstabilan mode transversal dan longitudinal dari model RMF. Parameter-parameter ini memiliki suku isoskalar yang berbeda-beda, yang didapat dari fitting terhadap properti keadaan dasar dari paket *magic nuclei*, sehingga kestabilan dari

persamaan RMF dapat diuji dengan menggunakan parameter-parameter tersebut. Efek dari suku non linear formalisme Lagrangian untuk model RMF terhadap ketidakstabilan materi nuklir telah dipelajari. Namun, pengembangannya masih harus dilakukan dengan menggunakan set parameter yang masih diperbaharui sampai sekarang sesuai dengan data eksperimen dari massa efektif meson.

## 2. Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan cara mencari persamaan tensor energi momentum dari bentuk Lagrangian model medan rerata lanjutan

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{NM} + \mathcal{L}_{\sigma} + \mathcal{L}_{\omega} + \mathcal{L}_{\rho} + \mathcal{L}_{\sigma\omega\rho} \quad (1)$$

dimana kontribusi nukleon setelah menggunakan limit termodinamika menjadi,

$$\mathcal{L}_{NM} = \frac{4}{(2\pi)^3} \int^{K_f} [\bar{U}_k[k - m]U_k - g_{\sigma}\sigma\rho_s - g_{\omega}\omega_0\rho_0]d^3k \quad (2)$$

Sedangkan, kontribusi meson sigma,

$$\mathcal{L}_{\sigma} = -\frac{1}{2}m_{\sigma}^2\sigma^2 - \frac{1}{3}b_2\sigma^3 - \frac{1}{4}b_3\sigma^4 \quad (3)$$

kontribusi meson omega, dan kontribusi meson rho

$$\mathcal{L}_{\omega} = \frac{1}{2}m_{\omega}^2\omega_0^2 - \frac{1}{4}C_1\omega_0^4 \quad (4)$$

$$\mathcal{L}_{\rho} = 0$$

Serta Lagrangian “cross coupling” pertukaran meson adalah,

$$\mathcal{L}_{\sigma\omega\rho} = d_2\sigma\omega_0^2 + \frac{1}{2}d_3\sigma^2\omega_0^2 \quad (5)$$

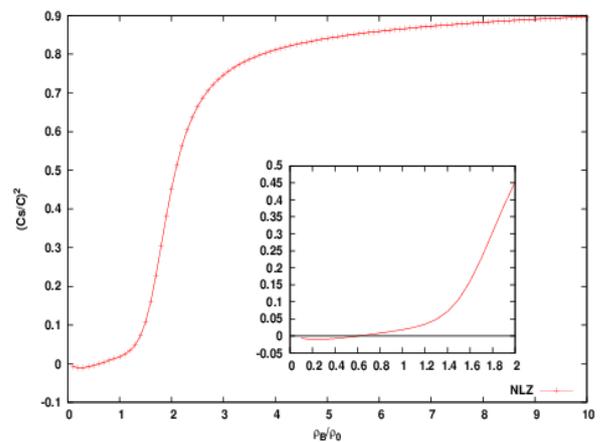
Setelah mendapatkan persamaan kerapatan energi dari bentuk Lagrangian diatas, selanjutnya dilakukan metode numerik. Metode numerik untuk persamaan energi SNM digunakan bentuk turunan berhingga, untuk mencari karakteristik kecepatan suara yang merupakan hal utama dalam penelitian ini. Kecepatan suara didapatkan dari bentuk

$$\frac{c_s^2}{c^2} = \frac{\partial P}{\partial \varepsilon} = \frac{\partial P}{\partial \rho} \frac{\partial \rho}{\partial \varepsilon} \quad (6)$$

Berdasarkan teori kausalitas dan Lorentz Invariant, tidak ada ide bahwa ada kecepatan yang mampu melebihi kecepatan cahaya.

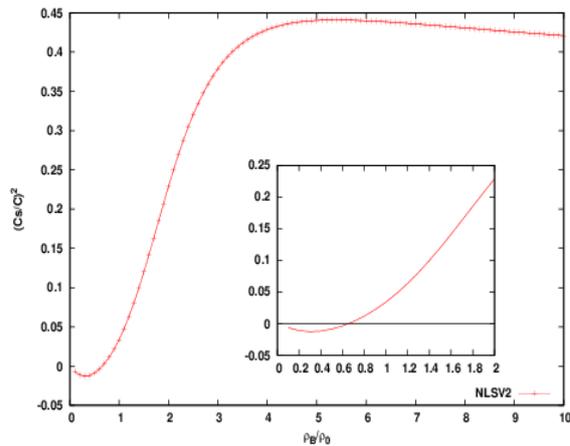
## 3. Hasil dan Pembahasan

Kecepatan suara digunakan untuk memeriksa kestabilan dari persamaan keadaan, Gambar 1 sampai Gambar 4 menunjukkan bahwa  $C_s < C$ . Hal tersebut mengindikasikan bahwa persamaan keadaan realistik dan tidak melanggar ketetapan mekanika klasik. Solusi persamaan kecepatan suara juga bersifat unik, sifat solusi tentu memperlihatkan kestabilan yang dimiliki oleh persamaan kecepatan suara. Ada satu hal yang perlu diperhatikan di Gambar 2, Gambar 3, dan Gambar 4 yaitu nilai kuadrat kecepatan suara pada kerapatan rendah saat  $\rho_B = 0$  sampai  $\rho_B = 0.6 \rho_0$  adalah negatif. Nilai negatif dari kuadrat kecepatan suara memperlihatkan ketidakstabilan persamaan energi pada kerapatan rendah. Parameter yang menunjukkan daerah ketidakstabilan persamaan paling besar yaitu parameter S-RMF ditunjukkan Gambar 1 sekitar  $\rho_B = 0.8 \rho_0$ . Berdasarkan analisis terhadap kriteria parameter set [ref.3], parameter yang tidak memiliki suku nonlinear vektor dan skalar-vektor, memiliki ketidakstabilan modulus transversal yang muncul pada kerapatan rendah. Selain itu parameter S-RMF yang diwakili oleh NLZ memiliki nilai konstanta suku skalar-isoskalar pangkat 4 yang bernilai negatif  $b_3 < 0$ , yang mempengaruhi ketidakstabilan modulus longitudinal meson ini.

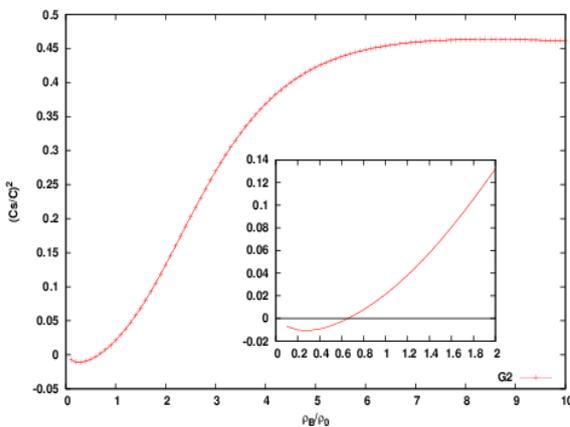


**Gambar 1.** Grafik hubungan antara fraksi kerapatan barion terhadap kecepatan suara untuk parameter S-RMF

NLSV2 merupakan salah satu jenis parameter V-RMF yang memiliki konstanta suku vektor-isoskalar namun tidak memiliki suku kopling skalar-vektor. Konstanta suku vektor-isoskalar milik NLSV2 cukup besar  $c_3 > 71$  sehingga menghilangkan ketidakstabilan modulus transversal[ref.3]. Selain itu, nilai  $b_3$  NLSV2 lebih besar dibanding  $b_3$  milik NLZ, sehingga ketidakstabilan modulus longitudinal lebih kecil dibanding NLZ, terlihat pada daerah ketidakstabilan kecepatan suara milik NLSV2 lebih sempit dibandingkan daerah ketidakstabilan milik NLZ.

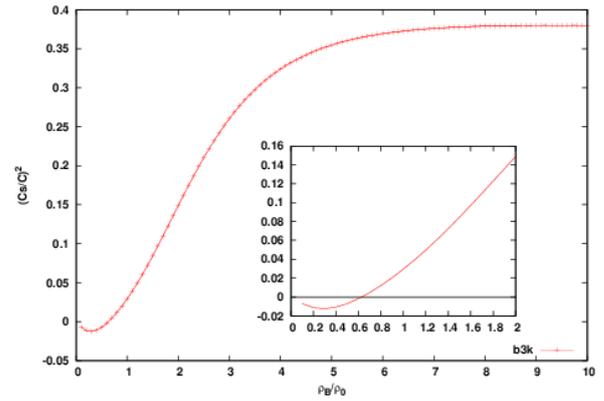


**Gambar 2.** Grafik hubungan antara fraksi kerapatan barion terhadap kecepatan suara untuk parameter V-RMF

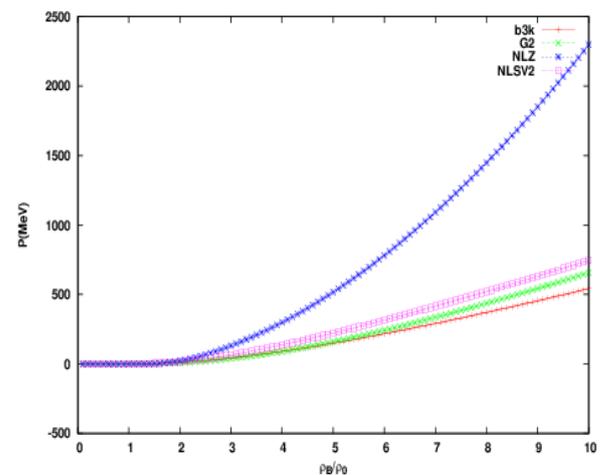


**Gambar 3.** Grafik hubungan antara fraksi kerapatan barion terhadap kecepatan suara untuk parameter E-RMF

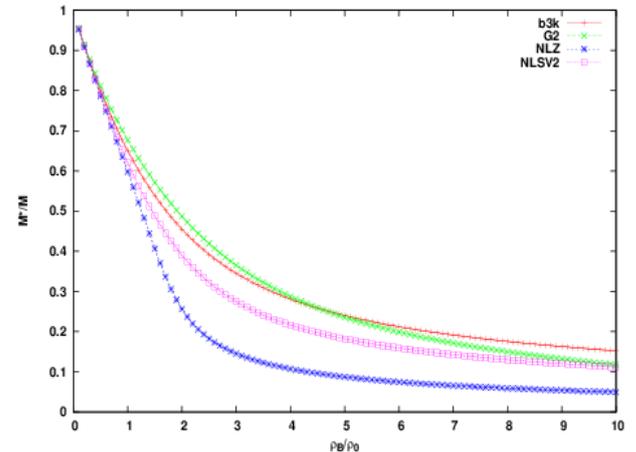
Daerah ketidakstabilan kecepatan suara pada parameter G2 ditunjukkan Gambar 4 tidak berbeda dengan daerah ketidakstabilan NLSV2 dan b3k. Akan tetapi, nilai negatif kuadrat kecepatan suara milik parameter E-RMF ini lebih kecil jika dibandingkan parameter NLZ dan NLSV2. Pengaruh dari 2 suku kopling skalar-vektor yang dimiliki G2 megakibatkan daerah ketidakstabilan kecepatan suara seharusnya menjadi lebih sempit. Keempat parameter ini tidak menunjukkan ketidakstabilan persamaan pada densitas tinggi, hanya saja indikasi nilai kecepatan suara akan terus meningkat melebihi kecepatan cahaya ditunjukkan oleh parameter S-RMF (Gambar 1).



**Gambar 4.** Grafik hubungan antara fraksi kerapatan barion terhadap kecepatan suara untuk parameter tes



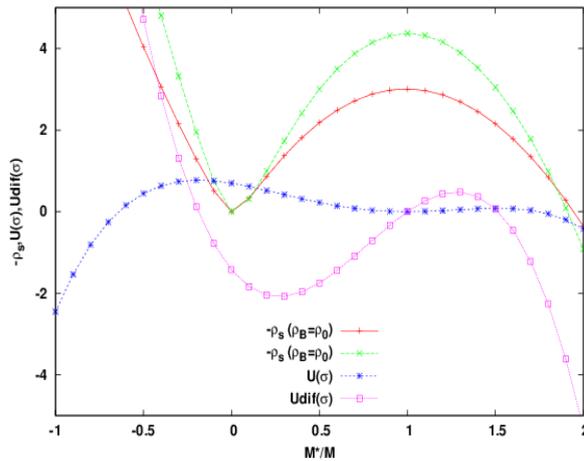
**Gambar 5.** Grafik hubungan tekanan vs kerapatan



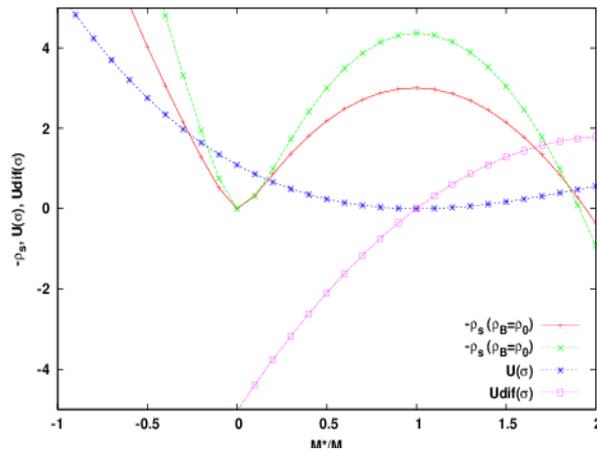
**Gambar 6.** Grafik hubungan massa efektif vs kerapatan

Kestabilan persamaan medan rerata lanjutan diperiksa dengan mengamati karakteristik SNM. Terlihat pada Gambar 5, kenaikan tekanan yang paling drastis ditunjukkan oleh parameter S-RMF, hal ini sesuai dengan grafik kecepatan suara parameter S-RMF (Gambar 1) memiliki nilai kecepatan suara paling tinggi saat kerapatan tinggi dibanding ketiga parameter lainnya. Gambar 6 memperlihatkan hubungan massa efektif dengan kerapatan, pada grafik

ini juga memperlihatkan suku non linear memberikan pengaruh pada nilai massa efektif nukleon.



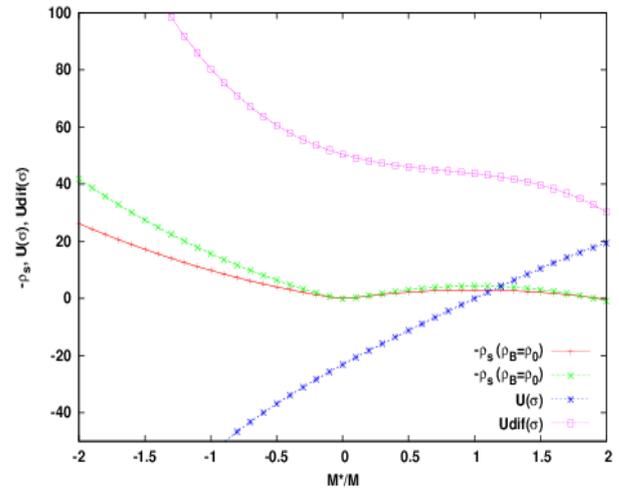
**Gambar 7.** Persamaan keadaan NLZ,  $-\rho_s$  merupakan nilai negatif dari densitas skalar,  $U(\sigma)$  merupakan potensial skalar dengan turunan pertama yaitu  $Udif(\sigma)$



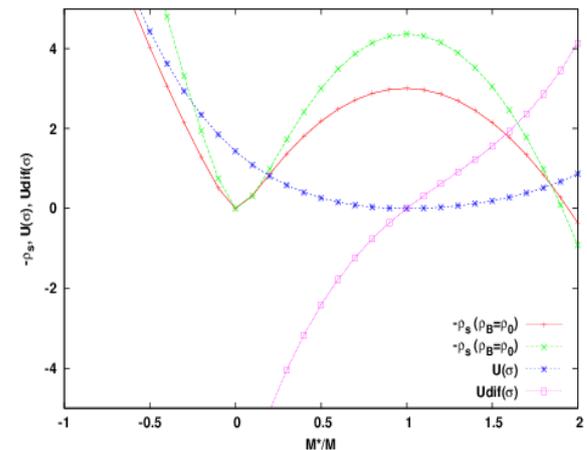
**Gambar 8.** Persamaan keadaan NLSV2,  $-\rho_s$  merupakan nilai negatif dari densitas skalar,  $U(\sigma)$  merupakan potensial skalar dengan turunan pertama yaitu  $Udif(\sigma)$

Solusi dari persamaan keadaan ditunjukkan oleh titik potong grafik nilai negatif densitas skalar, potensial skalar dan derivatif potensial skalar. Grafik densitas skalar menunjukkan ketidakstabilan karena memiliki solusi lebih dari satu. Potensial skalar pada parameter E-RMF menunjukkan kestabilan paling tinggi dibandingkan ketiga parameter lain, efek dari suku non linear  $d_2$  dan  $d_3$  memberikan pengaruh kestabilan pada potensial skalar. Titik potong pada persamaan keadaan (Gambar 9) hanya 1 saat  $\frac{M^*}{M} > 1$ . Daerah ketidakstabilan turunan potensial skalar pada parameter S-RMF menunjukkan daerah ketidakstabilan cukup lebar. Hal ini mengindikasikan bahwa nilai konstanta  $b_3 < 0$  dan nilai  $C_1 = 0$

mempengaruhi ketidakstabilan dari persamaan keadaan parameter NLZ.



**Gambar 9.** Persamaan keadaan G2,  $-\rho_s$  merupakan nilai negatif dari densitas skalar,  $U(\sigma)$  merupakan potensial skalar dengan turunan pertama yaitu  $Udif(\sigma)$



**Gambar 10.** Persamaan keadaan b3k,  $-\rho_s$  merupakan nilai negatif dari densitas skalar,  $U(\sigma)$  merupakan potensial skalar dengan turunan pertama yaitu  $Udif(\sigma)$

#### 4. Kesimpulan

Persamaan keadaan untuk persamaan model medan rerata lanjutan dinilai cukup stabil. Nilai kuadrat perbandingan kecepatan suara dengan kecepatan cahaya kurang dari 1 ( $c_s/c$ )<sup>2</sup> > 1. Hal ini menunjukkan bahwa persamaan keadaan stabil dan realistis. Akan tetapi pada kerapatan rendah persamaan keadaan mengalami ketidakstabilan, indikasi ini ditunjukkan dengan nilai fraksi kecepatan suara bernilai negatif. Parameter yang menunjukkan

karakteristik kecepatan suara yang lebih stabil ditunjukkan oleh parameter E-RMF. Kestabilan persamaan keadaan dari 4 parameter terlihat berbeda-beda, dipengaruhi oleh suku non linear pada persamaan Lagrangian medan rerata lanjutan. Parameter S-RMF menunjukkan daerah ketidakstabilan potensial skalar dan turunan potensial skalar paling lebar dibandingkan parameter lainnya.

### **Ucapan Terimakasih**

Terima kasih kepada Departemen Fisika UI, terutama rekan-rekan civitas akademika peminatan Nuklir dan Partikel Teoritik, atas diskusinya yang sangat berharga.

### **Daftar Acuan**

- [1] Waldhauser, B.M, Nuclear Equation of State from The Nonlinear Relativistic Mean Field Theory, 1987, Phys. Rev. C 38, Number 02.
- [2] Liu, K, Finite Temperature Nuclear Matter Properties within A Relativistic  $\sigma$ -  $\omega$  Coupling Model, Phys. Rev. C 88(2013), 068202.
- [3] Sulaksono, A, Criteria for Nonlinear Parameters of Relativistic Mean Field Models, Phys. Rev. C 79(2009), 044306.
- [4] Agrawal, B.K., Optimization of Relativistic Mean Field Model for Finite Nuclei to Neutron Star Matter, Nuclear Physics A 882 (2012), p.1-20.

