

---

## Kajian Tentang Energi Simetri, dan Pengaruhnya Terhadap Kerak Dalam Bintang Neutron

Yudisthira Iriana Putra<sup>1)</sup>, Eko Tri Sulistyani<sup>2)</sup>

<sup>1</sup> *Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Gadjah Mada*  
email: [yudisthira.iriana.p@mail.ugm.ac.id](mailto:yudisthira.iriana.p@mail.ugm.ac.id)

<sup>2</sup> *Grup Riset Astrofisika, Kosmologi dan Fisika Matematis, Jurusan Fisika, Universitas Gadjah Mada*

Penulis Penanggungjawab. E-mail: [sulistyani@ugm.ac.id](mailto:sulistyani@ugm.ac.id)

### ABSTRAK

Telah dilakukan kajian mengenai Energi Simetri dan pengaruhnya terhadap Bintang Neutron terutama bagian Kerak Dalam. Pada penelitian kali ini bagian kerak dalam Bintang Neutron dimodelkan menggunakan Model Tetes Cairan Termampatkan (*CLDM*), sebuah model sederhana bersifat semiklasik yang berfokus pada efek-efek makroskopis serta mampu menggambarkan inti dalam kondisi bertekanan tinggi. Rentang nilai Energi Simetri yang digunakan diperoleh menggunakan model *MSL* dan menunjukkan rentang nilai  $25 < L < 115$ . Kemudian parameter energi simetri  $J$  dan  $L$  dimasukkan dalam model *CLDM* untuk memperoleh pengaruhnya terhadap komposisi Kerak Dalam Bintang Neutron. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi parameter energi simetri  $J$  dan  $L$  memiliki pengaruh terhadap komposisi Kerak Dalam Bintang Neutron yaitu fraksi neutron bebas, fraksi volume berisi inti bermuatan, fraksi proton pada inti, serta ukuran sel *WS*. Diketahui pula bahwa fase transisi kerak-inti dipengaruhi oleh nilai energi simetri.

**Kata Kunci** : Energi Simetri; Kerak Dalam; Bintang Neutron; Model Tetes Cairan Termampatkan.

## ABSTRACT

Symmetry energy and its effects on the properties of neutron star inner crust has been studied. In this study, inner crust of neutron star was describe by using compressible liquid drop model, and the range of symmetry energy value is obtained by some experiment which use modified skyrme-like model (*MSL*) that experiment showed the value range  $25 < L < 115$ . The symmetry energy dependence of inner crust properties is shown by input the value of symmetry energy parameter to *CLDM*. The result of this study show that symmetry energy parameter variation has an effects to some properties of inner crust of neutron star like neutron gas fraction which is decrease more rapidly on bigger  $L$  value, charge nuclei fraction which is increase more sensitive to density in bigger value of  $L$ , the size of weigner seitz cell which can not describe the nuclei in denser density, and the local proton fraction which decrease three time higher in bigger value of  $L$ . Other properties like density of transition from crust to core in neutron stars is effected by symmetry energy as well, bigger value of  $J$  make the transition happen in deeper density.

**Keywords** : symmetry energy; inner crust; neutron star; compressible liquid drop model.

### 1. Pendahuluan

Bintang merupakan sekumpulan awan molecular berukuran massif yang terdiri dari gas dan debu kosmik berkerapatan tinggi yang bersatu karena gaya gravitasi. Gaya gravitasi tersebut bersifat mengerutkan sehingga untuk mempertahankan hidupnya, Bintang menghasilkan gaya yang bersifat mengembangkan untuk melawan gaya gravitasi yaitu gaya tekan radiasi yang berasal dari reaksi fusi termal pada inti Bintang [1].

Reaksi fusi mungkin terjadi jika pada inti Bintang tersedia atom-atom yang dapat berfusi seperti hydrogen

yang berfusi menjadi helium, helium berfusi menjadi karbon, dan seterusnya hingga pada akhirnya atom-atom pada inti Bintang hanya tinggal atom besi (Fe) saja, dimana atom besi merupakan atom paling stabil sehingga reaksi fusi berhenti menghasilkan tekanan radiasi yang menyeimbangkan gaya tarik gravitasi, menghilangnya gaya tekan radiasi menyebabkan Bintang mengalami keruntuhan gravitasi yang memicu ledakan besar atau supernova [1].

Supernova bukan hanya menjadi akhir dari kehidupan sebuah bintang, tetapi juga menjadi awal mula kelahiran bintang jenis lainnya yaitu bintang yang

memiliki jari-jari jauh lebih kecil dari bintang biasa tetapi memiliki kerapatan yang jauh lebih tinggi dari bintang biasa yang karena kerapatannya yang sangat tinggi seringkali disebut dengan istilah benda mampat astronomis [2].

Pada benda padat astronomis tarikan gravitasi dapat dilawan dengan tekanan yang dihasilkan dari materi terdegenerasi baik elektron terdegenerasi maupun baryon terdegenerasi. Ada tiga jenis benda padat astronomis yang telah diketahui yaitu Katai Putih, Bintang Neutron, dan Lubang Hitam. Bintang Katai Putih bertahan dari gaya gravitasi dengan tekanan yang berasal dari elektron terdegenerasi, Bintang Neutron melawan gaya gravitasi dengan tekanan dari neutron terdegenerasi, sedangkan Lubang Hitam telah mencapai kondisi singularitas [2].

Penelitian kali ini akan berfokus pada Bintang Neutron, salah satu benda mampat astronomis yang berasal dari supernova sebuah bintang yang memiliki massa akhir  $\geq 5M_{\odot}$  [2]. Bintang Neutron sendiri hanya memiliki jari-jari  $10^{-5}R_{\odot}$ , tetapi bermassa  $(1-3)M_{\odot}$ , dan memiliki potensial gravitasi  $10^5$  kali lebih besar dari potensial gravitasi matahari [2].

Walaupun berukuran kecil tetapi Bintang Neutron memiliki massa dan potensial gravitasi yang jauh lebih besar dibandingkan matahari, hal tersebut karena kondisi Bintang Neutron sangat rapat bahkan semakin dalam kerapatannya semakin meningkat hingga mencapai kerapatan inti

semakin meningkat hingga mencapai kerapatan inti normal pada bagian ini. Kerapatan yang sangat tinggi pada inti Bintang Neutron bahkan membuat nuclei melebur satu sama lain membentuk lautan baryon [2].

Keunikan Bintang Neutron membuatnya menarik untuk diteliti, karena objek berkerapatan setinggi Bintang Neutron tidak bisa diciptakan di laboratorium [3].

Mengingat kerapatan Bintang Neutron sangat tinggi mendekati kerapatan inti normal, Bintang Neutron dapat dikategorikan sebagai *nuclear matter*, yaitu sebuah sistem ideal yang digambarkan hanya terdiri dari proton dan neutron (baryon), maka pemodelan Bintang Neutron dapat dilakukan dengan menerapkan model inti. Salah satu model inti yang sederhana dan banyak digunakan adalah model tetes cairan/*liquid drop model (LDM)*. Pada *LDM* yang kemudian membuat Weizsäcker dapat merumuskan Rumus Massa Semi-Empiris, inti dianalogikan sebagai tetes cairan homogen, tak termampatkan, dan energi ikatnya sebanding dengan volume tetes cairan dikurangi koreksi-koreksi sesuai dengan analogi tetes cairan seperti koreksi efek permukaan, efek simetri, efek Coulomb dan beberapa efek mikroskopis yang melemahkan energi ikat [4].

*LDM* layak diterapkan pada Bintang Neutron tapi hanya pada

kerapatan dibawah kerapatan tetes neutron ( $\rho_{ND} = \sim 4 \times 10^{11} \text{g/cm}^3$ ), ketika kondisi inti penyusun masih cenderung seimbang antara proton dan neutron. Selepas kerapatan tetes neutron, neutron sudah sangat mendominasi inti akibat adanya tangkapan elektron sehingga nuklei tidak sanggup lagi menahan neutron agar tetap terikat dalam inti dan neutron pun terlepas dari inti membentuk lautan neutron bebas.

Neutron bebas yang terbentuk tersebut mempengaruhi kondisi inti terutama pada kerapatan, tegangan permukaan, dan jarak antar atom yang semakin mendekat satu sama lain. *LDM* tidak bisa lagi menggambarkan inti pada kondisi yang diakibatkan adanya neutron bebas dan kerapatan yang semakin tinggi, maka dari itu *LDM* dimodifikasi menjadi *CLDM* [5].

*CLDM* merubah efek volume, efek permukaan, dan efek Coulomb yang ada pada *LDM* menjadi fungsi dari kerapatan dan fraksi neutron. Adaptasi yang dilakukan pada *CLDM* untuk merespon konsekuensi dari hadirnya neutron bebas membuat *CLDM* cocok digunakan untuk menggambarkan Kerak Dalam Bintang Neutron [4] [6].

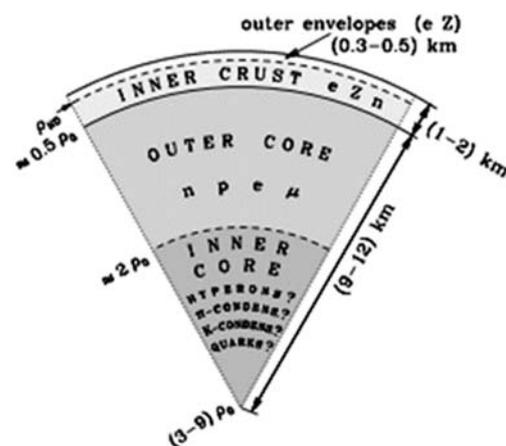
Perubahan komposisi neutron-proton yang membuat inti semakin kaya akan neutron pada Bintang Neutron ditambah dengan kerapatan yang semakin meningkat membuat energi simetri berperan penting pada Bintang Neutron. Energi simetri itu sendiri secara definisi ideal merupakan selisih energi per partikel pure neutron

*matter (PNM)* dan *symmetry neutron matter (SNM)* [7].

Untuk mempelajari lebih lanjut terkait Bintang Neutron, penelitian kali ini akan mengkaji salah satu aspek penting yang berhubungan dengan kondisi inti penyusun Bintang Neutron yaitu Energi Simetri. Energi Simetri menggambarkan perubahan energi ikat sebagai akibat dari perubahan komposisi neutron dan proton pada suatu sistem.

Urutan kajian yang terkandung dalam makalah ini adalah penjelasan mengenai Bintang Neutron di Bab 2, kemudian pengenalan *CLDM* yang digunakan pada kajian ini di Bab 3, inti dari kajian kali ini yaitu energi simetri dan pengaruh variasinya terhadap komposisi Kerak Dalam akan disajikan di Bab 4.

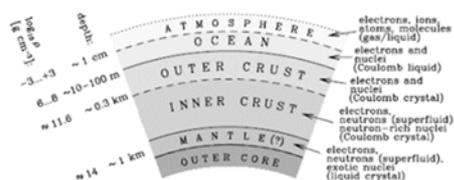
## 2. Bintang Neutron



Gambar 2.1. Struktur skematik Bintang Neutron

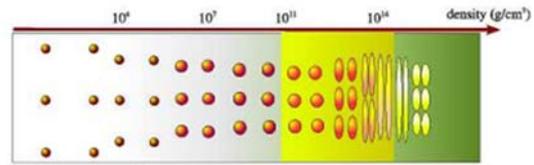
Secara umum, struktur Bintang Neutron dibagi menjadi dua bagian yaitu bagian Selubung yang merupakan bagian dengan nilai kerapatan dibawah kerapatan inti normal dan bagian Inti yaitu bagian dengan nilai kerapatan lebih dari kerapatan inti normal (Supranuklir). Bagian Inti dibagi menjadi Inti Luar dan Inti Dalam, sedangkan bagian selubung terdiri dari dua sub-bagian yaitu selubung padat yang terdiri dari Kerak Luar dan Kerak Dalam, serta selubung non-padat yang terdiri dari Atmosfer, dan Lautan Ion [8], skema struktur Bintang Neutron dapat dilihat pada *Gambar 2.1*.

Inti Bintang Neutron merupakan bagian dengan kerapatan yang sangat tinggi sehingga materi penyusunnya masih menjadi misteri, maka dari itu kajian kali ini berfokus pada bagian Selubung, gambaran struktur bagian selubung dapat dilihat pada *Gambar 2.2*. Pada *Gambar 2* dapat dilihat bahwa selubung terdiri dari 2 bagian yaitu selubung padat dan non padat, selubung non padat rentan terhadap perubahan suhu bahkan bisa menghilang ketika suhu menurun, sementara bagian selubung padat adalah bagian yang akan dibahas kali ini mengingat banyak keunikan dari sifatnya.



*Gambar 2.2.* Struktur bagian selubung Bintang Neutron (Haensel et al., 2007)

## 2.1. Kerak Bintang Neutron



*Gambar 2.3.* Kerak bintang neutron [9]

Kerak Bintang Neutron berdasarkan kerapatannya seperti terlihat dalam *Gambar 2.3*, terbagi menjadi dua bagian yaitu Kerak Luar, dan Kerak Dalam. Kerak luar terdiri atas atom yang tersusun dalam bentuk kisi BCC (*Body Centered Cubic*), Kerak Luar dimulai pada kerapatan  $10^4 \text{ g cm}^{-3}$ , pada kerapatan ini atom sudah terionisasi sepenuhnya, pada kerapatan  $10^7 \text{ g cm}^{-3}$  komposisi inti penyusun Kerak Luar menjadi kaya akan neutron sebagai akibat dari tangkapan elektron yang mengurangi komposisi proton [9], [10].

Kerak Dalam membentang dari kerapatan  $4 \times 10^{11} \text{ g cm}^{-3}$ , atau disebut juga kerapatan tetes neutron ( $\rho_{ND}$ ) hingga kerapatan sekitar  $10^{14} \text{ g cm}^{-3}$  yang setara dengan  $\rho_0/3$  [9] atau  $0,5\rho_0$  [10]. Kerak Dalam memiliki karakteristik berupa lautan neutron bebas. Batas bawah dari kerak disebut daerah mantel yang diprediksi terdiri oleh inti yang berada dalam fase pasta dimana inti tersebut tidak berbentuk bola simetri, melainkan menyerupai bentuk pasta atau silinder [10], [11].

### 3. Model Tetes Cairan Termampatkan

Model Tetes Cairan Termampatkan pertama kali dikemukakan oleh Baym, Bethe, dan Pethick (*BBP*) sebagai penyempurnaan dari model sebelumnya yaitu *LDM*. *CLDM* digunakan oleh *BBP* untuk mengetahui sifat-sifat nuklei yang berada dalam lautan neutron bebas pada Bintang Neutron, lautan neutron bebas berarti neutron yang mulai menetes keluar dari inti tepatnya pada kerapatan tetes neutron ( $\rho_{ND}$ ) yaitu senilai  $4 \times 10^{11} \text{ g/cm}^3$ , yang terjadi pada bagian transisi dari Kerak Luar ke Kerak Dalam Bintang Neutron [12].

Model *CLDM* memiliki beberapa sifat sebagai berikut :

- Inti digambarkan sebagai sebuah tetes cairan termampatkan, dimana kerapatan materi didalam inti dijadikan sebagai variabel dengan membandingkannya dengan kerapatan neutron bebas [5].
- Energi inti diperoleh dari jumlahan 3 suku makroskopis, yaitu energi volume, energi Coulomb, dan energi permukaan [5]
- Inti digambarkan berbentuk bola simetris, serta jari-jari neutron diasumsikan identik dengan jari-jari proton ( $R_N \approx R_p$ ) [6]

Pada kerapatan tetes neutron ( $\rho_{ND}$ ). Fenomena keluarnya neutron dari inti menyebabkan inti pada kerak dalam

berada dalam lautan neutron bebas, neutron bebas tersebut menyebabkan beberapa konsekuensi terhadap keadaan inti yang berada di sekelilingnya, yang pertama adalah materi didalam inti yang kaya neutron akan relatif sama dengan materi gas neutron bebas diluar, yang kedua adalah semakin berkurangnya tegangan permukaan seiring dengan semakin meningkatnya kerapatan [13], lalu aspek fisis ketiga yang luput dari *RMSE/LDM* adalah interaksi tarik-menarik Coulomb antara nuklei yang berubah karena semakin dekatnya jarak antar inti sebagai akibat kerapatan yang semakin meningkat [5].

*CLDM* dinilai merupakan model yang lebih tepat dimana materi-materi inti pada kerak dalam dapat diuraikan menjadi suku volume, suku permukaan, dan suku Coulomb sebagai fungsi kerapatan dan perubahan komposisi untuk mengakomodasi efek-efek yang diakibatkan neutron bebas. Dengan kata lain, model tetes cairan termampatkan ini merupakan perluasan model tetes cairan yang terkait fungsi kerapatan dan komposisi. *CLDM* bersifat semi-klasik sehingga bisa menjelaskan sifat-sifat makroskopis inti dengan mengabaikan efek-efek mikroskopis [4].

Dapat dituliskan energi total inti pada *CLDM* yaitu [6]:

$$E(A, Z) = E_{vol} + E_{surf} + E_{Coul} \quad (3.1)$$

$E_{vol}$  merupakan energi volume fungsi kerapatan yang dapat disajikan sebagai berikut [6]:

$$E_{vol} = A\omega(\rho_N, \delta) \quad (3.2)$$

dengan  $\omega$  sebagai energi volume per nucleon fungsi kerapatan dan fraksi neutron, selanjutnya disebut sebagai efek volume.

$$E_{surf} = 4\pi\sigma(\rho_N, \delta)R_p^2 \quad (3.3)$$

$E_{surf}$  merupakan energi permukaan dengan  $\sigma$  merupakan tegangan permukaan fungsi kerapatan dan fraksi neutron, selanjutnya disebut sebagai efek permukaan.

$$E_{coul} = \frac{3Z^2 e^2}{5R_p} \quad (3.4)$$

$E_{coul}$  merupakan energi Coulomb.

Efek volume ( $\omega$ ) dan efek permukaan ( $\sigma$ ) diperoleh dalam bentuk ekspansi terhadap kerapatan dan fraksi neutron sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \omega(\rho_N, \delta) &= \omega_0 + \frac{K_0}{18\rho_0}(\rho - \rho_0)^2 + [S_0 + \frac{L}{3\rho_0}(\rho - \rho_0)]\delta \\ \sigma(\rho_N, \delta) &= \sigma_0 [1 - C_{sym}\delta^2 + \chi \left(\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0}\right)] \end{aligned} \quad (3.5)$$

dengan  $\rho_0$  merupakan kerapatan jenuh,  $\omega_0$  merupakan energi dari *SNM*,  $K_0$  merupakan konstanta inkompresibilitas,  $S_0$  merupakan koefisien energi simetri (pada bab selanjutnya berarti sama dengan parameter J), dan L merupakan koefisien simetri kerapatan.

Pada ekspansi ini terlihat bahwa parameter energi simetri (J dan L) dapat diakomodasikan melalui *CLDM*.

#### 4. Energi Simetri

Energi Simetri Inti menggambarkan perubahan energi ikat pada sistem inti yang diakibatkan perubahan rasio proton dan neutron penyusun inti tersebut. Dalam Bintang Neutron energi simetri menggambarkan perubahan komposisi neutron-proton yang simetris (lapisan kerak luar) menuju kondisi materi yang kaya akan neutron/neutron bebas (kerak dalam). Energi Simetri menjadi salah satu aspek penting dalam fisika inti karena banyaknya fenomena yang berkaitan dengan proses inti erat kaitannya dengan parameter Energi Simetri [14].

Bintang Neutron dapat dianalogikan sebagai sebuah *Nuclear Matter (NM)* yaitu sebuah sistem ideal yang berisikan komponen inti (proton dan neutron), pada *nuclear matter* dikenal sebuah persamaan keadaan yang disebut nuclear matter equation of state (*NM EoS*). *NM EoS* menggambarkan energi per partikel pada sebuah sistem sebagai fungsi dari kerapatan ( $\rho$ ) dan fraksi proton ( $x$ ) atau dapat ditulis  $E(\rho, x)$ . Materi dengan nilai fraksi proton ( $x=0,5$ ) disebut sebagai Materi Inti Simetri/*Symmetry Nuclear Matter (SNM)*, sedangkan pada nilai  $x=0$ , dikenal sebagai Materi Neutron Murni/

*Pure Neutron Matter (PNM)*[14]. Secara ideal energi simetri merupakan selisih energi ikat pada *PNM*, dengan energi ikat pada *SNM*.

Salah satu aspek penting dalam *NM EoS* adalah energi simetri fungsi kerapatan yang menggambarkan perubahan energi ikat inti ketika terdapat perubahan rasio neutron dan proton pada jumlah baryon yang tetap ( $Z$  dan  $N$  berubah, ketika  $A$  tetap). Energi Simetri muncul ketika dilakukan ekspansi Taylor pada *NM EoS* sebagai fungsi kerapatan dan parameter asimetri dimana parameter asimetri ( $\delta$ ) ini memiliki bentuk  $\delta = I - 2x$  [15], bernilai  $\delta = I$  untuk *PNM* dan bernilai  $\delta = 0$  untuk *SNM*. Ekspansi Taylor pada persamaan energi per partikel adalah sebagai berikut [16]:

$$E(\rho, \delta) = E_0(\rho, \delta = 0) + E_{sym2}(\rho)\delta^2 + E_{sym4}(\rho)\delta^4 \quad (4-1)$$

dilakukan pendekatan orde kedua karena orde yang lebih besar tidak signifikan menjadi:

$$E(\rho, \delta) = E_0(\rho_0) + E_{sym}(\rho)\delta^2 \quad (4-2)$$

Energi simetri yang muncul pada persamaan (4-3) dan (4-4) disebabkan oleh perbedaan komposisi ( $\delta$ ), lebih lanjut  $E_{sym}$  dapat diekspansikan kembali sebagai respon atas perubahan kerapatan sebagai berikut :

$$E_{sym}(\rho) = E_{sym}(\rho_0) + \frac{L}{3} \left( \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \right) + \frac{K_{sym}}{18} \left( \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \right)^2 + \frac{Q_{sym}}{162} \left( \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \right)^3$$

(4-3)

disederhanakan menjadi:

$$E_{sym}(\rho) = J + L\chi + \frac{1}{2} K_{sym}\chi^2 + \dots \quad (4-4)$$

(4-4)

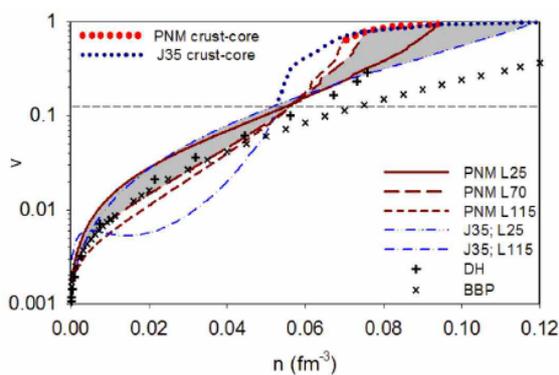
dimana  $J$  merupakan nilai energi simetri yang muncul karena perubahan energi ikat yang diakibatkan perubahan komposisi neutron-proton pada inti ( $E_{sym}$  pada persamaan (4-2)), sementara  $L$  merupakan energi simetri yang muncul sebagai konsekuensi dari perubahan kerapatan terhadap kerapatan inti normal, dan  $K_{sym}$  efek energi simetri tambahan yang berpengaruh tidak signifikan sehingga diabaikan pada penelitian kali ini.

Pendekatan orde kedua bisa dilakukan karena berfokus pada efek-efek yang muncul akibat perubahan kerapatan, diketahui dari persamaan (4-4) bahwa parameter  $J$  muncul akibat perubahan komposisi neutron-proton sedangkan parameter  $L$  muncul akibat dari perubahan kerapatan. Perubahan kerapatan dan komposisi tersebut sesuai dengan yang terdapat pada Bintang Neutron khususnya pada bagian Kerak Dalam dimana terdapat proton dan neutron yang mulai tidak seimbang karena adanya tangkapan elektron membuat inti semakin kaya akan neutron dan kerapatan yang semakin dalam semakin mendekati kerapatan inti normal.

Perubahan komposisi yang terjadi membuat nilai parameter  $J$  menjadi penting pada bagian Kerak Dalam Bintang Neutron, sementara kerapatan yang meningkat mendekati kerapatan inti normal pada bagian inti, membuat inti menjadi bersatu dengan seluruh sistem membentuk lautan homogen menegaskan bahwa terdapat perubahan kerapatan yang signifikan sehingga nilai parameter  $L$  menjadi penting bagi Kerak Dalam Bintang Neutron.

#### 4.1. Pengaruh energi simetri terhadap komposisi Kerak Dalam Bintang Neutron

##### 4.1.1. Pengaruh energi simetri terhadap fraksi inti bermuatan pada Kerak Dalam Bintang Neutron



Gambar 4.1. Grafik fraksi inti bermuatan vs kerapatan dengan pengaruh energi simetri [17]

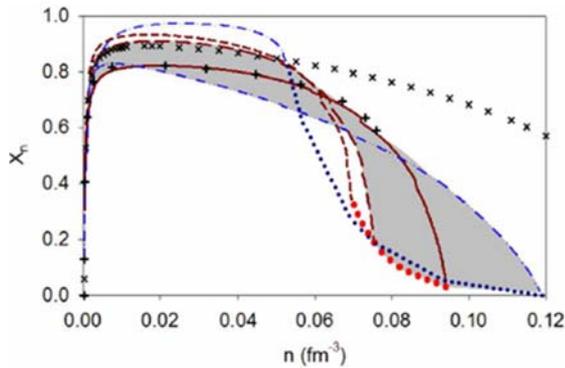
Pada *Gambar 4.1* seluruh variasi  $EoS$  yang digunakan menghasilkan sifat yang sama yaitu fraksi volume inti bermuatan meningkat seiring bertambahnya nilai kerapatan, hal ini disebabkan karena semakin besar kerapatan maka ukuran inti akan semakin besar karena berubah bentuk dari bola menjadi pasta yang berakibat pula terhadap semakin rapatnya jarak antar inti, maka dari itu inti bermuatan akan semakin memenuhi ruang pada Kerak Dalam Bintang Neutron mengalahkan neutron bebas.

Variasi parameter energi simetri pada grafik dalam *Gambar 4.1* dilakukan dengan dua variasi yaitu yang pertama  $J$  dibuat tetap ( $35 \text{ MeV}$ ) dengan variasi nilai  $L$  ( $25$  dan  $115$ )  $\text{MeV}$  disajikan dengan garis berwarna biru. Variasi yang kedua ditampilkan dalam garis berwarna merah,  $L$  divariasikan dan  $J$  nilainya mengikuti  $L$ .

Perbedaan nilai  $J$  seperti yang disajikan dalam grafik berwarna merah terlihat tidak signifikan karena tiap-tiap grafik bervariasi dalam rentang yang kecil dan tidak menunjukkan perbedaan yang mencolok.

Sementara pada  $J$  tetap (grafik biru) terlihat ketika  $L115$ , terjadi perubahan yang sangat sensitif terhadap perubahan kerapatan. Hal tersebut membuktikan persamaan energi simetri ( $4-4$ ) dimana nilai  $L$  muncul karena adanya perubahan kerapatan sehingga otomatis ketika nilai  $L$  lebih tinggi akan merespon lebih sensitif perubahan kerapatan dibandingkan nilai  $L$  lebih rendah.

#### 4.1.1. Pengaruh energi simetri terhadap fraksi neutron bebas pada Kerak Dalam Bintang Neutron



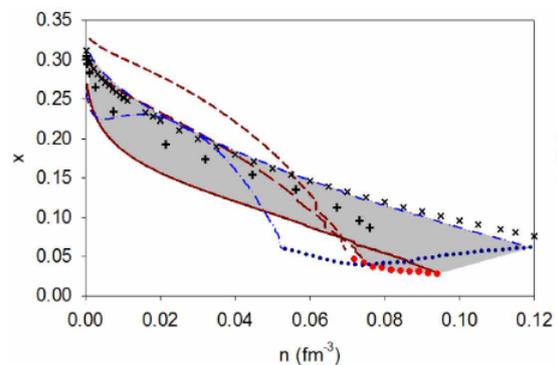
Gambar 4.2. Grafik fraksi neutron bebas vs kerapatan dengan pengaruh energi simetri [17]

Grafik pada *Gambar 4.2* menunjukkan fraksi neutron bebas meningkat tajam pada awal peningkatan kerapatan (awal kerapatan tetes neutron), tetapi dengan semakin meningkatnya kerapatan fraksi neutron bebas ( $X_n$ ) menurun drastis.

Rendahnya nilai fraksi neutron diakibatkan ukuran inti yang semakin besar, terlebih munculnya fase pasta dimana ukuran inti selain membesar juga memanjang sehingga semakin memenuhi ruang yang tersedia pada Kerak Dalam, semakin berkembangnya ukuran inti membuat lautan neutron bebas semakin terdesak hingga komposisinya berkurang, dan bernilai mendekati nol ketika sistem telah memasuki bagian inti Bintang Neutron dimana materi penyusunnya homogen.

Sifat dari tiap-tiap variasi grafik menunjukkan hal yang sama seperti sebelumnya dimana  $L 115$  bergerak lebih sensitif terhadap perubahan kerapatan, terlihat nilai  $X_n$  menurun lebih cepat ketika nilai  $L$  yang diberikan lebih besar.

#### 4.1.2. Pengaruh energi simetri terhadap fraksi proton di dalam inti pada Kerak Dalam Bintang Neutron

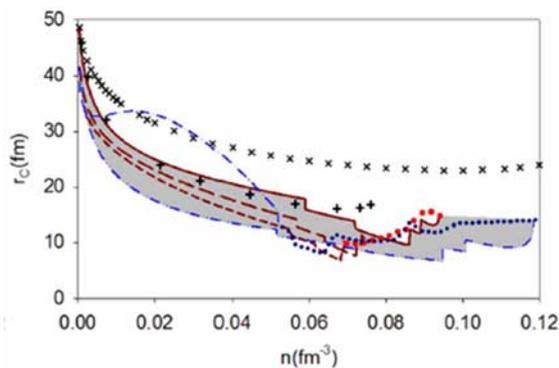


Gambar 4.3. Grafik fraksi proton vs kerapatan dengan pengaruh energi simetri [17].

Secara umum fraksi proton dalam inti berkurang seiring dengan bertambahnya kerapatan, karena semakin bertambah kerapatan cenderung menyebabkan inti semakin kaya akan neutron. Pada grafik dalam *Gambar 4.3* terdapat informasi terkait fase transisi yaitu ketika bentuk garis pada grafik berubah menjadi titik-titik, dari informasi terkait fase transisi dapat diinterpretasikan pada *EoS J35* (warna biru) fraksi proton pada fase transisi kerak-inti bervariasi dari  $0,03$  hingga  $0,06$ . Pada *EoS PNM* (warna merah) fraksi proton pada fase transisi bervariasi dari  $0,025$  hingga  $0,06$ .

Terlihat selisih yang cukup kentara pada grafik merah dimana variasi nilai  $J$  berpengaruh terhadap nilai awal fraksi proton, semakin besar  $J$  semakin besar pula fraksi proton dan lebih cepat pula penurunan fraksi proton seiring peningkatan kerapatan. Pada variasi  $L$ , seperti pada gambar sebelumnya nilai  $L115$  memberikan respon yang jauh lebih sensitif dibandingkan nilai  $L$  yang lebih kecil.

#### 4.1.3. Pengaruh energi simetri terhadap sel WS pada Kerak Dalam Bintang Neutron



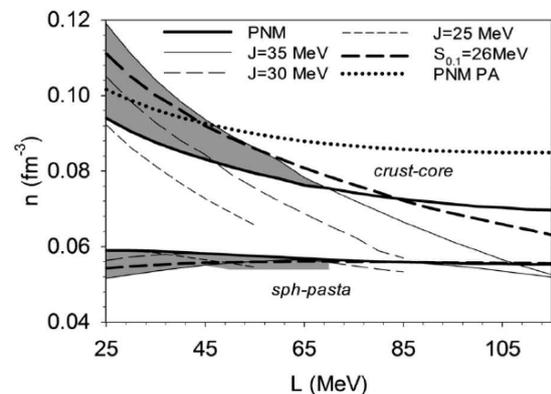
Gambar 4.4. Grafik ukuran sel WS vs kerapatan dengan pengaruh energi simetri.

Dari grafik pada Gambar 4.4 dapat dilihat bahwa semakin besar kerapatan, maka semakin kecil ukuran sel WS, dikarenakan kondisi yang sangat mampat membuat sel saling menekan satu sama lain.

Konsistensi ditunjukkan dengan semakin besar nilai  $L$  mengakibatkan penurunan nilai  $r_c$ . Kemudian pada

rentang kerapatan  $(0,04 - 0,10)fm^{-3}$  grafik menunjukkan *step* yang diskontinyu, hal tersebut menunjukkan fase transisi bentuk inti dari bola simetris menjadi fase pasta, transisi terjadi dipertegas dengan perubahan grafik dari garis putus-putus menjadi titik-titik yang berarti sama seperti sebelumnya menandakan fase transisi kerak-mantel.

#### 4.1.4. Pengaruh energi simetri terhadap kerapatan pada transi bagian kerak-inti Bintang Neutron



Gambar 4.5. Grafik kerapatan pada fase transisi kerak-inti Bintang Neutron dan transisi bentuk inti bola-pasta.

Untuk variasi EoS dengan nilai  $J$  berbeda ( $J25, J30, J35$ ). Nilai kerapatan transisi berbanding lurus dengan nilai  $J$ , tetapi berbanding terbalik dengan nilai  $L$ . Rentang nilai kerapatan paling tinggi berada pada  $0,12 fm^{-3}$  dan paling rendah pada  $0,06 fm^{-3}$ , yang terdapat pada EoS  $J35$ .

Hasil ini menunjukkan bahwa terdapat perbedaan yang signifikan antara bagian kerak dengan bagian inti, bagian inti ditandai dengan semakin homogenya komponen penyusun yang berarti komposisi neutron-proton sangat berbeda dibandingkan dengan

di bagian kerak, perbedaan komposisi tersebut berakibat pengaruh nilai parameter  $J$  dapat menandakan transisi kerak-inti dapat terjadi lebih cepat atau lebih lama (lebih cepat berarti ketebalan kerak lebih tipis, lebih lama berarti ketebalan kerak lebih besar).

Berbeda dengan kerapatan transisi kerak-inti, transisi pasta memiliki rentang yang lebih tipis, hanya berkisar pada kerapatan  $0,06-0,06 \text{ fm}^{-3}$ .

Transisi dari bentuk bola menuju pasta dapat disimpulkan tidak terlalu dipengaruhi oleh energi simetri karena parameter  $J$  dan  $L$  sensitif terhadap perubahan komposisi dan kerapatan sedangkan transisi dari bola menuju pasta berarti bentuk geometrisnya yang berubah dan tidak secara langsung mempengaruhi komposisi proton-neutron maupun kerapatan yang mengakibatkan variasi energi simetri tidak mempengaruhi terlalu banyak transisi inti bola menjadi pasta.

#### 4. Simpulan

1. Energi simetri merupakan sebuah perubahan energi yang diakibatkan perubahan komposisi penyusun nuklei, dan perubahan kerapatan pada nuklei.
2. Model Tetes Cairan Termampatkan (*CLDM*), merupakan model sederhana yang telah banyak digunakan untuk menggambarkan kerak dalam Bintang

Neturon serta diketahui mengakomodasikan parameter energi simetri.

3. Energi simetri berpengaruh terhadap sifat kerak dalam Bintang Neutron diantaranya :

- a. Fraksi inti bermuatan, semakin besar energi simetri membuat nilai fraksi inti bermuatan meningkat lebih sensitif terhadap perubahan kerapatan.
- b. Fraksi neutron bebas, penurunan nilai fraksi neutron bebas semakin besar seiring dengan semakin besarnya parameter  $L$  energi simetri yang diberikan.
- c. Fraksi proton pada inti, terdapat perubahan sensitif pada energi simetri bernilai tinggi tetapi tidak berpengaruh terhadap energi simetri rendah.
- d. Ukuran sel  $WS$ , terdapat diskontinuitas yang menandakan ketidakmampuan sel  $WS$ , menggambarkan fase pasta.
- e. Kerapatan transisi dari kerak menuju inti berbanding lurus dengan nilai  $J$  tetapi berbanding terbalik dengan  $L$ .

Pada kajian kali ini bisa parameter energi simetri baik  $J$  maupun  $L$  berasal dari input yang dimasukkan oleh peneliti, sehingga komposisi Kerak Dalam menyesuaikan dengan nilai masukkan yang diberikan, pada kenyataannya tentu saja tidak seperti itu melainkan karakteristik Kerak Dalam pada

Bintang Neutron yang menentukan besaran nilai energi yang tersedia. Sebagai ilustrasi pada Bintang Neutron yang memiliki ketebalan kerak lebih tinggi maka akan menghasilkan parameter energi simetri  $J$  yang lebih tinggi pula.

### 5.1. Saran

1. Penelitian kali ini hanya sebatas kajian literature terhadap kajian lain yang telah dilaksanakan, kedepannya diharapkan dilakukan perhitungan komputasi sendiri untuk memperoleh hasil penelitian
2. Dilakukan kajian terhadap benda mampat lainnya seperti katai putih dan lubang hitam.
3. Memperluas kajian Bintang Neutron tidak sebatas di bagian kerak
4. Memperluas kajian energi simetri tidak sebatas pada Bintang Neutron

### 6. Referensi

1. E. L. Istiqomah, "Suhu Kritis dan Celah Tenaga Superfluida Pada Inti Bintang Neutron yang Mendingin," Gadjah Mada, 2010.
2. S. L. Shapiro dan S. A. Teukolsky, *Black Holes, White Dwarfs, and Neutron Stars*. 2004.
3. V. P. Psonis, C. C. Moustakidis, dan S. E. Massen, "Nuclear Symmetry Energy Effects on Neutron Stars Properties," 2008.
4. E. T. Sulistyani, "Bintang Neutron : Model Tetes Cairan Termampatkan pada Kerak Dalam Bintang Neutron," 2016.
5. G. Baym, H. A. Bethe, dan C. J. Pethick, "Neutron Star Matter," *Nucl. Phys. A*, vol. 175, hal. 225–271, 1971.
6. K. Iida dan K. Oyamatsu, "Surface Tension in a Compressible Liquid-Drop Model: Effects on Nuclear Density and Neutron Skin Thickness," *Phys. Rev. C - Nucl. Phys.*, vol. 69, no. 3, hal. 037301-1, 2004.
7. J. M. Lattimer, "Symmetry Energy in Nuclei and Neutron Stars," *Nucl. Phys. A*, vol. 1, no. 1, hal. 1–20, 2014.
8. P. Haensel, A. Y. Potekhin, dan D. G. Yakovlev, *Neutron Stars I Equation of State and Structure*, vol. 33. 2007.
9. N. Chamel dan P. Haensel, "Physics of Neutron Star Crusts," *living Rev. Relativ.*, 2008.
10. A. Y. Potekhin, "The Physics of Neutron Stars," hal. 1–28, 2010.
11. N. Chamel, "The Crust of Neutron Stars," 2006.
12. E. L. Istiqomah, "Suhu Kritis dan Celah Tenaga Superfluida Pada Inti Bintang Neutron yang Mendingin," Gadjah Mada, 2010.
13. S. L. Shapiro dan S. A. Teukolsky, *Black Holes, White Dwarfs, and Neutron Stars*. 2004.

14. M. Baldo dan G. F. Burgio, “The Nuclear Symmetry Energy,” *Prog. Part. Nucl. Phys.*, vol. 91, hal. 203–258, 2016.
15. W. G. Newton, M. Gearheart, dan B. A. Li, “A Survey of the Parameter Space of the Compressible Liquid Drop Model as Applied to the Neutron Star Inner Crust,” *Astrophys. Journal, Suppl. Ser.*, vol. 204, no. 1, 2013.
16. C. C. Moustakidis, “Symmetry Energy Effects on Location of the Inner Edge of Neutron Star Crusts,” *Phys. Rev. C*, 2012.
17. W. G. Newton, M. Gearheart, J. Hooker, dan B. Li, “The Nuclear Symmetry Energy, The Inner Crust, and Global Neutron Star Modeling,” *Astro-ph.SR*, hal. 1–25, 2011.