

Analisa Energi Dan Jari-jari Inti dari Fungsi Gelombang Inti Besi (Fe) Dengan Metode Skyrme-Hartree-Fock

Lasmita Sari¹, Zaky Yudha Rabbani², Melati Iftacharo²

¹Program Studi Pendidikan Fisika, Institut Pendidikan Indonesia, Garut. Jl. Terusan
Pahlawan No.32, Kabupaten Garut, 44151, Indonesia

² Jl. Ganesa No.10, Lb. Siliwangi, Kecamatan Coblong, Kota Bandung, Jawa Barat 40132

* Corresponding author. E-mail: lasmitasari111@gmail.com (Lasmita Sari)

ABSTRAK

Penelitian ini merupakan penelitian yang berdasarkan studi literatur dan eksperimen dengan menggunakan Metoda Skyrme-Hartree-Fock. Pada artikel ini dilakukan perhitungan nuclear ground state properties dari Fe dengan menggunakan metode Skyrme-Hartree-Fock (SHF) dengan parameter-parameter Skyrme yaitu Sly4, Skyrme M, Z_{σ} , dan SIII. Dimana difokuskan untuk menghitung total energi dan nucleus radii dari besi. Dalam proses perhitungannya dibuat algoritma program HAFOMN dan Hartree-Fock untuk perhitungan atom yang dimodifikasi potensialnya dengan potensial skyrme pada MATLAB. Dari dua cara tersebut dibandingkan hasilnya untuk mencari yang mendekati dari nilai eksperimen. Berdasarkan hasil perhitungan HAFOMN parameter Skyrme M lah yang memberikan hasil yang paling mendekati nilai eksperimen, sedangkan pada perhitungan jari-jari nucleus yang paling mendekati adalah parameter Sly4. Sedangkan pada MATLAB hasil perhitungan memiliki nilai error yang sangat besar jika dibandingkan dengan hasil eksperimen. Hal ini menunjukkan bahwa program pada MATLAB masih harus diberikan modifikasi lain untuk dapat digunakan dalam kasus inti atom.

Kata kunci : Fe; Metoda Skyrme-Hartree-Fock; HAFOMN; MATLAB.

ABSTRACT

This research is based on literature study using the Skyrme-Hartree-Fock Method. In this article, the nuclear ground state property of Fe is calculated using the Skyrme-Hartree-Fock (SHF) method with Skyrme parameters, namely Sly4, Skyrme M , Z_{σ} , dan SIII. Where aims to calculate the total energy and core radius of iron. In the calculation process, the HAFOMN and Hartree-Fock program algorithms are made for the calculation of atoms that regulate their potential with skyrme potentials in MATLAB. From the two methods, the results are compared to find the closest to the experimental value. Based on the HAFOMN calculation, the Skyrme M parameter gives the results closest to the experimental value, while the Sly4 parameter is the closest to the nuclear radius calculation. While in MATLAB the calculation results have a very large error value when compared to the experimental results. This shows that the program in MATLAB still has to be given other modifications to be used in the case of atomic nuclei.

Keywords: Fe; Skyrme-Hartree-Fock method; HAFOMN; MATLAB.

1. Pendahuluan

Volume khusus ini difokuskan untuk analisis kesalahan sehubungan dengan model nuklir, khususnya yang dikalibrasi dengan data empiris. Pada artikel ini menganggap khususnya pendekatan Skyrme-Hartree-Fock (SHF) adalah model mikroskopis untuk struktur dan dinamika nuklir yang strukturnya dapat disimpulkan dari argumen ekspansi momentum rendah [1] sedangkan parameter model yang tersisa adalah ditentukan oleh penyesuaian terhadap data empiris [2].

Salah satu kuantitas dasar untuk menjelaskan struktur nuklir adalah distribusi dari densitas inti, yang dimana dapat memberikan informasi detail mengenai struktur internal nuclei yang berhubungan dengan fungsi gelombang proton dan neutron [3]. Kuantitas yang lain adalah muatan radii nuklir yang merepresentasikan informasi yang dapat diamati yang dimana sangat berguna bagi analisis struktur nuklir [4]. Informasi yang dapat diamati tersebut, yang dapat ditentukan dari faktor-faktor pembentukan, menyediakan informasi

mengenai bentuk nuklir [5]. Metode Hartree-Fock yang dikombinasikan dengan interaksi Skyrme berhasil menyediakan model mikroskopis untuk menjelaskan properti-properti nuklir yang berada pada garis kestabilan, seperti keadaan dasar inti, *collective motions*, *fission barriers*, *giant resonances*, dan *heavy-ion collisions* [6]. Pada artikel ini dilakukan perhitungan *nuclear ground state properties* dari Fe dengan menggunakan metode Skyrme-Hartree-Fock (SHF) dengan parameter-parameter Skyrme yaitu *Sly4*, *Skyrme M*, Z_{σ} , dan *SIII*. Difokuskan untuk menghitung total energi dan nucleus radii dari besi. Selain itu dibahas analisis kesalahan dari perspektif yang lebih umum. Kombinasi strategi memberikan wawasan yang menarik tentang nilai prediktif Skyrme-Hartree-Fock (SHF) untuk observasi ini [7]. Aspek khusus dan baru dalam hal ini analisis, sejauh ini yang tidak banyak dipertimbangkan adalah variasi input data yang memungkinkan untuk mengeksplorasi dampak data fit pada parametrisasi.

Pada penelitian ini dilakukan perhitungan energi total nuklir sebesar Fe dengan menggunakan Metode Hartree-Fock dengan Skyrme force set parameter terutama dengan parameter-

parameter Skyrme yaitu *Sly4*, *Skyrme M*, Z_{σ} , dan *SIII*. Proses perhitungan dilakukan dengan menggunakan kode HAFOMN [8]. Hasil perhitungan penelitian ini dibandingkan dengan percobaan [9,10] dan Hasil perhitungan Tel dkk [11]. Dalam penelitian ini, parameter gaya Skyrme yang digunakan adalah *Sly4* [12], *Skyrme M* [13], Z_{σ} [14] dan *SIII* [15]. Nilai dari setiap set parameter dapat dilihat pada Tabel 1.

2. Bahan dan Metode

2.1 Teori Skyrme-Hartree-Fock dengan Schematic Pairing

Persamaan Hartree-Fock dan persamaan pasangan diturunkan melalui prinsip variasi dari fungsi total energi dari nukleus. Maka model keseluruhan dan semua variasinya dapat diberikan dengan mendiskusikan berbagai kontribusi pada fungsi energi.

$$E = E_{\text{Skyrme}} + E_{\text{Coulomb}} + E_{\text{pair}} - E_{\text{cm}} \quad (1)$$

dimana E_{Skyrme} adalah fungsi energi dari gaya Skyrme, E_{Coulomb} adalah energi coulomb. E_{pair} adalah *schematic pairing*, dan E_{cm} adalah koreksi untuk pusat gerakan masa dari bidang rata-rata [16].

2.1.1 Fungsi Energi Skyrme

Gaya Skyrme adalah gaya efektif untuk perhitungan nuklir *Hartree-Fock* yang bertujuan untuk memparametrikkan suatu matrik untuk hamburan nukleon-nukleon di media nuklir dengan cara yang sederhana dan efisien. Terdapat pada kisaran nol sedangkan kepadatan dan gaya yang bergantung pada momentum.

$$\begin{aligned}
 V_{Skyrme} = & t_0(1 + x_0 P_x) \delta(\vec{r}_i - \vec{r}_j) + \\
 & \frac{1}{2} t_1 (+x_1 P_x) \{ \vec{p}_{12}^2 \delta(\vec{r}_i - \vec{r}_j) + \delta(\vec{r}_i - \\
 & \vec{r}_j) \vec{p}_{12}^2 \} + t_2(1 + x_2 P_x) \vec{p}_{12} \cdot \delta(\vec{r}_i - \\
 & \vec{r}_j) \vec{p}_{12} + \frac{1}{2} t_3(1 + x_3 P_x) \rho^\alpha(\vec{r}) \cdot \delta(\vec{r}_i - \\
 & \vec{r}_j) + i t_2 \vec{p}_{12} \cdot \delta(\vec{r}_i - \vec{r}_j) (\vec{\sigma}_i - \vec{\sigma}_j) \times \\
 & \vec{p}_{12}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Di mana $\vec{p}_{12} = (\vec{p}_i - \vec{p}_j)$ adalah momentum relatif, P_x adalah operator pertukaran ruang $\vec{r}_i \leftrightarrow \vec{r}_j$, $\vec{\sigma}$ adalah vektor matriks spin Pauli, dan $\vec{r} = \frac{1}{2}(\vec{r}_i + \vec{r}_j)$.

2.1.2 Energi dalam representasi bentuk bola .

Pada persamaan berikut dibatasi pada keadaan dasar (stasioner) dari sebuah nuclei sferis dan untuk menyederhanakan energi kinetik dalam persamaan

Schrodinger radial menjadi turunan kedua.

Semua kulit diasumsikan terisi sama rata sehingga densitasnya menjadi sferis. Secara keseluruhan hasilnya Fungsi energi Skyrme menjadi

$$\begin{aligned}
 E_{Skyrme} = & 4\pi \int_0^\infty dr r^2 \left\{ \frac{\hbar^2}{2m} r + \right. \\
 & \frac{1}{2} t_0 \left(1 + \frac{1}{2} x_0 \right) \rho^2 - \frac{1}{2} t_0 \left(1 + \right. \\
 & \left. \frac{1}{2} x_0 \right) \sum_q \rho_q^2 + \frac{1}{12} t_3 \left(1 + \frac{1}{2} x_3 \right) \rho^{\alpha+2} - \\
 & \frac{1}{12} t_3 \left(1 + \frac{1}{2} x_3 \right) \rho^\alpha \sum_q \rho_q^2 + \frac{1}{4} \left[t_1 \left(1 + \right. \right. \\
 & \left. \frac{1}{2} x_1 \right) + t_2 \left(1 + \frac{1}{2} x_2 \right) \left. \right] \rho \tau - \frac{1}{4} \left[t_1 \left(\frac{1}{2} + \right. \right. \\
 & \left. x_1 \right) - t_2 \left(\frac{1}{2} + x_2 \right) \left. \right] \sum_q \tau_q \rho_q - \\
 & \frac{1}{16} \left[3t_1 \left(1 + \frac{1}{2} x_1 \right) - t_2 \left(1 + \right. \right. \\
 & \left. \frac{1}{2} x_1 \right) \left. \right] \rho \nabla^2 \rho + \frac{1}{4} \left[t_1 \left(\frac{1}{2} + x_1 \right) - t_2 \left(\frac{1}{2} + \right. \right. \\
 & \left. x_2 \right) \left. \right] \sum_q \rho_q \nabla^2 \rho_q - \frac{1}{2} t_4 \left[\rho \nabla \vec{J} + \right. \\
 & \left. \sum_q \rho_q \nabla \vec{J}_q \right] \left. \right\}
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

dimana, $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r}$, ρ_p adalah densitas dari nukleon, τ_q adalah densitas energi kinetik dari nukleon, dan \vec{J}_q adalah densitas spin-orbit dari nukleon. Simbol q pada $q \in \{p, n\}$, dimana densitas, tanpa label isospin pada semua persamaan, melambangkan densitas total, seperti $\rho = \rho_p + \rho_n$, $\tau = \tau_p + \tau_n$, dan $\vec{J} = \vec{J}_p + \vec{J}_n$. Disisi lain, densitas pada representasi bola dinyatakan sebagai:

$$\rho_p(r) = \sum_{n_\beta j_\beta l_\beta} w_\beta \frac{2j_\beta + 1}{4\pi} \left(\frac{R_\beta}{r}\right)^2 \quad (4)$$

$$\tau_q(r) = \sum_{n_\beta j_\beta l_\beta} w_\beta \frac{2j_\beta + 1}{4\pi} \left[\left(\frac{\partial R_\beta}{\partial r} \frac{R_\beta}{r}\right)^2 + \frac{l_\beta l_\beta + 1}{r^2} \left(\frac{R_\beta}{r}\right)^2 \right] \quad (5)$$

$$\vec{\nabla} \vec{J}_q(\vec{r}) = \left(\frac{\partial}{\partial r} + \frac{2}{r}\right) J_q(r) \quad (6)$$

$$J_q(\vec{r}) = \sum_{n_\beta j_\beta l_\beta} w_\beta \frac{2j_\beta + 1}{4\pi} \left[j_\beta(j_\beta + 1) - l_\beta(l_\beta + 1) - \frac{3}{4} \right] \frac{2}{r} \left(\frac{R_\beta}{r}\right)^2 \quad (7)$$

dimana β melambangkan state atau keadaan, R_β fungsi gelombang radial, j_β adalah momentum sudut, dan l_β adalah momentum sudut orbital [17].

2.1.3 Persamaan Hartree-Fock

Persamaan Hartree-Fock untuk fungsi gelombang radial yang diperoleh dari variasi fungsi energi terhadap R_β dapat dinyatakan sebagai :

$$h_q R_\beta = \epsilon_\beta R_\beta \quad (8)$$

Dengan *mean-field* Hamiltonian

$$h_q = \frac{\partial}{\partial r} B_q \frac{\partial}{\partial r} + U_q + U_{ls,q} \vec{l} \cdot \vec{\sigma} \quad (9)$$

Dimana

$$B_q = \frac{\hbar^2}{2m_q} + \frac{1}{8} \left[t_1 \left(1 + \frac{1}{2} x_1\right) + t_2 \left(1 + \frac{1}{2} x_2\right) \rho \right] - \frac{1}{8} \left[t_1 \left(x_1 + \frac{1}{2}\right) - t_2 \left(x_2 + \frac{1}{2}\right) \right] \rho_q \quad (10)$$

Dan

$$U_q = t_0 \left(1 + \frac{1}{2} x_0\right) \rho - t_0 \left(1 + \frac{1}{2} x_0\right) \rho_q + \frac{1}{12} t_3 \rho^\alpha \left[(2 + \alpha)(1 + x_3) \rho - 2(1 + x_3) \rho_q - \alpha(1 + x_3) \frac{\rho_{pr}^2 + \rho_{ne}^2}{\rho} \right] + \frac{1}{4} \left[t_1 \left(1 + \frac{1}{2} x_1\right) + t_2 \left(1 + \frac{1}{2} x_2\right) \right] \tau - \frac{1}{4} \left[t_1 \left(1 + \frac{1}{2} x_1\right) + t_2 \left(1 + \frac{1}{2} x_2\right) \right] \tau_q - \frac{1}{4} \left[t_1 \left(1 + \frac{1}{2} x_1\right) + t_2 \left(1 + \frac{1}{2} x_2\right) \right] \tau - \frac{1}{8} \left[3t_1 \left(1 + \frac{1}{2} x_1\right) + t_2 \left(1 + \frac{1}{2} x_2\right) \right] \Delta \rho + \frac{1}{8} \left[3t_1 \left(1 + \frac{1}{2} x_1\right) + t_2 \left(1 + \frac{1}{2} x_2\right) \right] \Delta \rho_q - \frac{1}{2} t_4 (\nabla \vec{J} + \nabla \vec{J}_q) + U_{Coulomb} \quad (11)$$

2.2 Energi Coulomb

Interaksi Coulomb adalah bagian yang terkenal dari interaksi nuklir. Namun, jangkauannya yang tak terbatas membuatnya sangat memakan waktu untuk mengevaluasi bertukar bagian dengan tepat, dan tidak bijaksana untuk menghabiskan sebagian besar waktu komputasi pada kontribusi kecil [19]. Oleh karena itu bagian pertukaran Coulomb diperlakukan dalam yang disebut pendekatan Slater, dan kita peroleh untuk energi Coulomb Densitas energi Coulomb dapat dinyatakan sebagai:

$$\begin{aligned} \epsilon_{Coul}(\vec{r}) &= \frac{e^2}{2} \int \frac{\rho_p(\vec{r}')\rho_p(\vec{r})}{|\vec{r} - \vec{r}'|} d^3r' \\ &\quad - \frac{3}{4} e^2 \left(\frac{3}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}} \rho_p^{\frac{4}{3}}(\vec{r}) \end{aligned} \quad (12)$$

dimana persamaan suku kiri menggambarkan *direct* Coulomb dan persamaan suku kanan menggambarkan *exchange* Coulomb. Karena untuk mengevaluasi bagian *exchange* Coulomb secara tepat akan memakan waktu yang terlalu lama, bagian Coulomb-*exchange* dimana, $U_{ls,q}$ adalah faktor pembentuk dari potensial *one-body* spin-orbit, U_{Coul} adalah potensial coulomb, dan U_q adalah potensial dari nukleon [18] diselesaikan dengan menggunakan aproksimasi Slater.

2.3 Pairing

Energi *pairing* pada total energi dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$\begin{aligned} E_{pair} &= - \sum_q G_q \left[\sum_{\beta \in q} \sqrt{w_\beta(1-w_\beta)} \right]^2 \end{aligned} \quad (13)$$

dimana elemen matriks *pairing* G_q adalah konstan untuk setiap tipe ($G_{pr} = \frac{22MeV}{A}$ dan $G_{ne} = \frac{29MeV}{A}$, dimana A adalah nomor total nukleon dari sebuah nukleus). Dan w_β adalah bobot *pairing* dari proton dan neutron, dan dapat dihitung menggunakan:

$$w_\beta = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\epsilon_\beta - \epsilon_{F,q}}{\sqrt{\epsilon_\beta - \epsilon_{F,q}^2 + \Delta_q^2}} \right) \quad (14)$$

dimana,

$$\frac{\Delta_q}{G_q} = \sum_{\beta \in q} \sqrt{w_\beta(1-w_\beta)} \quad (15)$$

Δ_q adalah celah *pairing*, ϵ_β adalah energi partikel tunggal pada kondisi β , dan $\epsilon_{F,q}$ adalah energi Fermi. Penjelasan rinci dari energi *pairing* dapat dilihat pda persamaan (16). *Root-Mean-Square* (rms) radii dari muatan, masa, neutron dan proton dapat didefinisikan pada persamaan berikut:

$$r_q = \langle r_q^2 \rangle^{\frac{1}{2}} = \left[\int \vec{r}_{\rho_q}^2 \vec{r} d^3 \vec{r} \right]^{\frac{1}{2}} \left[\int \rho_q \vec{r} d^3 \vec{r} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

Fokus utama dari penelitian ini adalah untuk menyelidiki dampak dari perbedaan nilai kekuatan pasangan pada beberapa sifat nuklir statis. Perhitungan dilakukan dengan memperbaiki beberapa parameter input seperti (i) nomor proton dan neutron dan (ii) parameter dasar yang sesuai dari nukleus yang diteliti; (iii) jenis parameterisasi Skyrme – dipilih di sini untuk menjadi tipe SIII, (iv) tipe pasangan sisa interaksi – dipilih sebagai kekuatan senioritas, dan (v) intensitas intensity pasangan sisa diberikan dalam Set T0 sampai α . Perhitungan iteratif ini kemudian dilakukan sampai konvergensi tercapai. Adapun fungsi eigen diperoleh dari penyelesaian persamaan Schrodinger pada setiap iterasi yang digunakan untuk menghitung nilai ekspektasi dari jumlah bunga lainnya.

3. Hasil dan Pembahasan

Parameter Skyrme *potential* yang digunakan pada artikel ini adalah sebagai berikut:

Tabel 1. Parameter Potensial Skyrme .

Set Name	SLy4	Skyrme M	Z-sigma	SIII
T0	-2488	-2645	-1983.8	-1128.8
T1	486.82	410	362.252	395
T2	-546.3	-135	-104.27	-95
T3	13777	15595	11861.4	14000
T4	123	130	123.69	120
X0	0.834	0.09	11.717	0.45
X1	-0.344	0	0	0
X2	-1	0	0	0
X3	1.354	0	1.762	1
α	0.167	0.167	0.25	1

Parameter-parameter tersebut dimasukan kedalam program Hartree-Fock untuk atom yang dimodifikasi dengan potensial Skyrme pada MATLAB dan program HAFOMN untuk mendapatkan hasil perhitungan energi seperti berikut:

Tabel 2. Hasil Perhitungan Energi Total.

Set Name	HAFOMN (MeV)	Matlab (MeV)	Experiment (MeV)
SLy4	479.4857483	1561.52	-
Skyrme M	482.6051331	1711.78	-492.25389
Z-sigma	492.6906433	899.781	-
SIII	476.9673462	1122.23	-

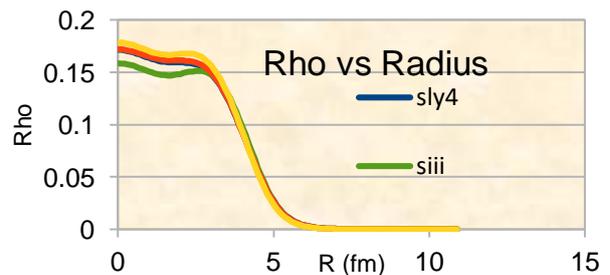
Dapat dilihat bahwa hasil yang didapat dari HAFOMN sudah mendekati hasil dari eksperimen, Sedangkan hasil yang didapat dari MATLAB masih sangat jauh dari nilai eksperimen. Hal tersebut dikarenakan pada program MATLAB proses perhitungan yang digunakan adalah skema perhitungan untuk sistem atom dengan modifikasi pada potensialnya saja, sehingga tidak diperhitungkan adanya perubahan perhitungan yang seharusnya dilakukan pada saat penggunaan potensial yang berbeda. Dimana sebaliknya program HAFOMN memang diperuntukan khusus menghitung energi inti dengan potensial Skyrme.

Radius inti dapat ditentukan dengan melihat dimana fungsi gelombang dari nucleon mulai jatuh karena setiap nucleon pada keadaan dasar akan berada di didalam inti saja, sehingga fungsi gelombang diluar inti akan bernilai nol. Hasil grafik radius inti dapat dilihat pada gambar 1 dan 2. Dengan melihat fungsi gelombang yang didapat dari program, didapatkan hasil perhitungan radius inti yang tertera pada tabel 3.

Tabel 3. Hasil Perhitungan Radius Inti.

Set Name	HAFOMN (fm)	Matlab (fm)	Experiment (fm)
SLy4	3.7024	-	
Skyrme			
M	3.6897	-	
Z-			3.6933
sigma	3.6254	-	
SIII	3.7135	-	

Dalam penelitian ini juga dihitung distribusi densitas lokal proton dan neutron untuk masing-masing inti untuk memahami sifat-sifat keadaan dasarnya. Distribusi kerapatan lokal untuk proton dan neutron dapat dilihat pada Gambar 1, dimana dapat dilihat bahwa pada radius 0-1 fm, SLy4 memberikan nilai tertinggi hasil dan SIII memberikan hasil terendah.



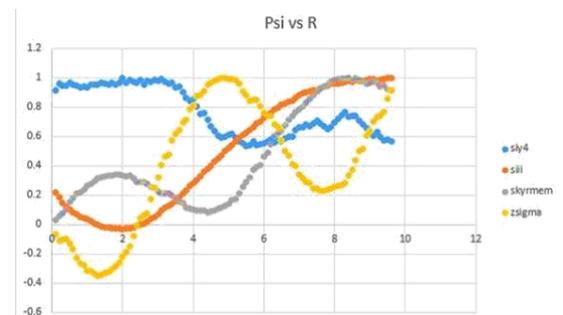
Gambar 1. Hasil rho vs radius dengan berbagai parameter untuk program HAFOMN.

Di area ini, hasil SLy4 menurun lebih drastis daripada parameter lainnya. Pada radius 2-5 fm, Z-sigma memberikan hasil tertinggi dan SIII memberikan hasil

terendah. Itu hasil SLy4 dan Skyrme M serupa satu sama lain di area ini. Dalam radius 5-12 fm, semua parameter memberikan hasil yang serupa. Dari profil kerapatan neutron, pada radius 0-1 fm, Z-sigma memperoleh hasil tertinggi dan SIII memperoleh hasil yang paling rendah. Di area ini, kemiringan Sly4 lebih drastis dibandingkan parameter lainnya. Di radius 2-5 fm, Z-sigma memperoleh hasil tertinggi dan SIII memperoleh hasil terendah. Sly4 dan Skyrme M hasilnya lebih mirip di area ini. Pada radius 5-12 fm, semua parameter memperoleh pola yang sama tetapi Z-sigma adalah sedikit berbeda dari yang lain.

Tampilan distribusi potensial lokal untuk proton dan neutron inti Fe dari angka ini, dapat dilihat bahwa SLy4 memperoleh lembah terdalam. SIII dan Skyrme memperoleh kedalaman yang sama dari same lembah tetapi lereng dan daerah permukaan untuk semua parameter cukup mirip satu sama lain. Semua parameter yang digunakan dalam penelitian ini sesuai dengan yang terkait percobaan dan hasil peneliti lainnya. Sebagian besar hasil Skyrme lebih dekat dengan eksperimen terkait hasil dari hasil Sly4, Z-sigma dan SIII. Dari densitas nukleon dan profil potensial dapat dilihat bahwa hasil yang diperoleh dari semua parameter serupa satu sama lain, terutama kemiringan dan

permukaan daerah. Dari hasil tersebut di atas, dapat ditunjukkan bahwa metode Skyrme-Hartree-Fock dapat menjadi alat yang berguna untuk mempelajari sifat-sifat keadaan dasar nuklir dari inti berat. Sedangkan untuk hasil dari pemrograman MATLAB bisa dilihat dari gambar 2.



Gambar 2. Hasil rho vs radius dengan berbagai parameter untuk hasil MATLAB

Pada gambar 1 menunjukkan hasil rho vs radius dengan empat parameter yang digunakan untuk program HAFOMN. Terlihat bahwa pada grafik keempat parameter yang digunakan perlahan turun dan mencapai satu titik yang sama, yaitu kurang lebih pada titik 6 fm. Sedangkan untuk hasil dari program yang dibuat pada MATLAB yang ditampilkan pada gambar 2, radius inti tidak bisa ditentukan karena fungsi gelombang yang didapatkan tidak menggambarkan bentuk dari suatu fungsi gelombang inti, sehingga radius intinya tidak dapat ditentukan.

Dari hasil yang didapat, *error* energi hasil perhitungan terhadap hasil eksperimen dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 4. *Error* Energi Total.

Set Name	HAFOMN (%)	Matlab (%)
SLy4	2.59381225	217.21841751
Skyrme M	1.9601179586	447.74331595
Z-sigma	0.0887252105	282.78799178
SIII	3.105418588	127.97788353

dan *error* radius inti hasil perhitungan terhadap hasil eksperimen dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 5. *Error* Jari-jari Inti.

Set Name	HAFOMN (%)	Matlab (%)
SLy4	0.0837996378	-
Skyrme M	0.2595085557	-
Z-sigma	1.9976752359	-
SIII	0.3838564053	-

Program Hartree-Fock untuk perhitungan atom yang dimodifikasi potensialnya dengan potensial skyrme pada MATLAB memiliki nilai error yang sangat besar. Hal ini menunjukkan bahwa program masih harus diberikan modifikasi lain untuk dapat digunakan dalam kasus inti atom. Parameter Skyrme M yang digunakan tidak

memberikan hasil yang *uniform* apabila dibandingkan antara perhitungan energi dan inti. Sedangkan pada hasil HAFOMN diketahui parameter Z-Sigma lah yang memberikan hasil yang paling mendekati nilai eksperimen, sedangkan pada perhitungan jari-jari nucleus yang paling mendekati adalah parameter Sly4.

4. Simpulan

Telah dilakukan penelitian untuk menghitung densitas dan jari-jari rms untuk proton dan neutron inti Fe dengan menggunakan metode Hartree-Fock dengan parameter set Skyrme, terutama parameter set Sly4, Skyrme M , Z-Sigma, dan SIII. Pada penelitian ini semua parameter yang digunakan dalam keadaan baik kesepakatan dengan hasil percobaan terkait dan peneliti lain, di mana hasil Skyrme M adalah lebih dekat secara kolektif untuk bereksperimen energi daripada Sly4, Z-Sigma, atau SIII. Perhitungan jari-jari penelitian ini dengan parameter set Skyrme M dan SIII cukup dekat dengan Tel et al dan hasil eksperimen terkait. Hasil ini menunjukkan bahwa metode Skyrme-Hartree-Fock dapat menjadi alat yang berguna untuk menjelaskan sifat keadaan dasar inti berat.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Yacobus Yulianto yang telah berbaik hati untuk memberikan sumber referensi dan beberapa masukan terkait makalah.

5. Referensi

- [1] K. Langanke, J.A.Maruhn, dan S.E. Koonin. *Computational Nuclear Physics I*. Springer . New York.
- [2] Y.Yulianto, dan Z. Su'ud. 2017. Radii and Density Calculations of ^{209}Bi by Using Skyrme-Hartree-Fock Method. *Journal of Physics: Conference Series* 799 012024.
- [3] Bender M, Heenen P H, and Reinhard P G 2003 *Reviews of Modern Physics* **75** 121
- [4] Angeli, I. and Marinoca, K. P. 2013. Table of experimental nuclear ground state charge radii: An update. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 99(1): 69.
5. Angeli I and Marinova K 2013 *Atomic Data and Nuclear Data Tables* **99** 69
- [5] World Nuclear Association, *Nuclear power in world today*. [online] Available at <http://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-futuregeneration/nuclear-power-in-the-world-today.aspx> [Accessed 24 July 2020]
- [6] Bonneau, L., Minkov, N., Duc, D. D., Quentin, P. and Bartel, J. 2015. Effect of core polarization on magnetic dipole moments in deformed odd-mass nuclei. *Phys. Rev. C*, 91
- [7] Koh, M.-H., Duc, D. D., Nhan Hao, T.V., Ha, T. L., Quentin, P. and Bonneau, L. 2016. Bandhead spectra of low-energy single-particle excitations in some well-deformed, odd-mass heavy nuclei within a microscopic approach. *Nucl. Phys. A*, 52: 3.
- [8] Koh, M.-H., Bonneau, L., Quentin, P., Nhan Hao, T. V., and Wagiran, H. 2017. Fission barriers of two odd-neutron actinide nuclei taking into account the time-reversal symmetry breaking at the mean-field level. *Phys. Rev. C*, 95(1): 014315.
- [9] Mohammad Nor, N., Koh, M-H., Rezle, N. A., Quentin, P and Bonneau, L. 2018. Preliminary investigation of band-head

- energies and charge quadrupole moment of some rare-earth nuclei within mean-field approach. *Jurnal Fizik Malaysia*, 39(2): 30033
- [10] Tel E and Aydin A 2012 *J. Fusion Energy* **31**
- [11] Koh, M.-H. 2015. Fission-barriers and energy spectra of odd-mass actinide nuclei in selfconsistent mean-field calculations. PhD. Thesis. University of Bordeaux-Universiti Teknologi Malaysia.
- [12] Raman, S., Nestor J. R., C. W. and Tikkanen, P. 2001. Transition probability from the ground to the first-excited 2^+ state of even-even nuclei. *Atomic Data and Nuclear Data Tables* 2001, 78(1): 1.
- [13] NuDat 2.7, *National nuclear data center*. [online] Available at <https://www.nndc.bnl.gov/nudat2/reCenter.jsp?z=70n=94> [Accessed 27 June 2020].
- [14] Dobaczewski J, Nazarewicz W and Reinhard P G 2014 *J. Phys. G* 41.
- [15] Y. Urata, K. Hagino, and H. Sagawa, *Phys. Rev. C* 83, 041303(R) (2011).
- [16] Bevington P R and Robinson D K 2003 *Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences* (McGraw-Hill).
- [17] Li-Gang Cao, G. Colò, H. Sagawa, and P.-F. Bortignon, *Phys. Rev. C* 89, 044314 (2014).