

# Pengujian Parametrisasi Baru Potensial Woods-Saxon dengan Perhitungan Spektrum Tenaga Keadaan Dasar Inti $Pb^{208}$

(*Test of a Newly Parametrized Woods-Saxon Potential by Calculation of the Ground State Energy Spectrum of  $Pb^{208}$* )

Raden Oktova

Program Magister Pendidikan Fisika, Program Pascasarjana, Universitas Ahmad Dahlan, Yogyakarta  
Kampus II, Jl. Pramuka 42 Lt. 3, Yogyakarta 55161

## ABSTRAK

Telah dihitung tingkat-tingkat tenaga partikel-tunggal (*single-particle*) dan lubang-tunggal (*single-hole*) untuk inti  $Pb^{208}$  menggunakan model potensial Woods-Saxon berbasis parametrisasi baru dengan algoritma Numerov dalam ruang koordinat. Dibandingkan parametrisasi lama, parametrisasi baru potensial Woods-Saxon berhasil meningkatkan ketelitian deviasi rerata akar kuadrat tenaga terhitung terhadap nilai eksperimental untuk keadaan partikel-tunggal, namun tidak berhasil untuk keadaan lubang-tunggal.

**Kata kunci:** tingkat tenaga partikel-tunggal, tingkat tenaga lubang-tunggal, potensial Woods-Saxon, algoritma Numerov

## ABSTRACT

*Single-particle and single-hole energy levels in the nucleus  $Pb^{208}$  are calculated using a new parametrization of the Woods-Saxon potential in coordinate space and the Numerov algorithm. The application of the new parameter set proves to be capable of improving the accuracy of the calculation compared to a previous parameter set as measured from the energy standard deviation (relative to the experimental values) only for single-particle levels, but it fails for single-hole levels.*

**Key words:** single-particle energy levels, single-hole energy levels, Woods-Saxon potential, Numerov algorithm

## PENDAHULUAN

Deskripsi masalah banyak-benda inti atom dengan suatu potensial rata-rata efektif atau potensial partikel-tunggal, dengan suatu pendekatan yang dikenal sebagai model kulit, merupakan suatu terobosan besar dalam fisika inti. Dalam model kulit, dinamika sebuah nukleon ditentukan oleh medan rata-rata yang diakibatkan oleh semua nukleon lain dalam inti, dan pemilihan himpunan keadaan dasar partikel-tunggal yang tepat merupakan kunci ketelitian. Data inti seperti bilangan-bilangan ajaib, jari-jari inti, tenaga ikat inti, kelimpahan inti di alam

dan berbagai besaran dalam reaksi inti memperkuat gambaran model medan rata-rata yang sangat sederhana ini (Ring & Schuck, 2000: 36–50).

Dalam sejarah fisika inti, potensial partikel-tunggal osilator harmonik dengan koreksi spin-orbit merupakan model potensial partikel-tunggal pertama yang berhasil meramalkan urutan orbital dan bilangan ajaib, dan untuk mendeskripsikan inti secara teliti, parameter-parameter osilator dipilih dengan kebergantungan tertentu pada nomor massa inti, dan rumus yang banyak dipakai adalah  $\hbar\omega = 41A^{1/3}$  MeV, yang

\* Alamat korespondensi  
e-mail: R.Oktova@uad.ac.id

diperoleh dengan membandingkan jari-jari rerata akar kuadrat massa osilator dengan data eksperimental. Suatu pendekatan yang lebih realistis adalah dengan menggunakan potensial partikel-tunggal Woods-Saxon, yang hingga kini masih banyak digunakan dalam berbagai bidang kajian fisika inti (Schwierz *et al.*, 2007). Dalam pendekatan ini, persamaan Schrödinger dapat diselesaikan dalam bentuk analitis eigenfungsi keadaan dasar partikel-tunggal, namun di sisi lain gaya-gaya sisa partikel-partikel menjadi besar, walaupun ada juga perhitungan-perhitungan cukup mutakhir dengan model ini yang berhasil mendiagonalisasi Hamiltonian banyak-benda termasuk gaya sisa partikel-partikel secara tepat (Brown, 2001).

Kajian fisika inti saat ini telah mencapai daerah inti jauh di luar daerah kestabilan di mana daerah kontinu (*continuum*) spektrum medan partikel-tunggal menjadi penting, dan untuk itu potensial partikel-tunggal Woods-Saxon masih banyak digunakan, setidaknya sebagai potensial awal coba-coba dalam suatu perhitungan swakonsisten, misalnya untuk mendeskripsikan distribusi nukleon dalam teras inti halo (Baghawat *et al.*, 2000; Rotival & Duguet, 2009). Baru-baru ini juga dilaporkan perhitungan distribusi inti dengan potensial Wood-Saxon dan pengaruhnya terhadap medan magnetik dalam tumbukan ion berat relativistik (Mo *et al.*, 2013), dan dalam kajian lain tentang sistem sedikit-benda (*few-body system*) digunakan potensial Wood-Saxon vektor terdeformasi untuk mencari penyelesaian persamaan DKP (Hamzavi & Ikhdair, 2012). Dalam penggunaannya saat ini, penyelesaian persamaan gelombang dengan potensial Woods-Saxon tidak lagi dilakukan secara analitis namun dapat dihasilkan daerah kontinu spektrum, dan kehadiran komputer canggih saat ini memungkinkan penyelesaian numeris menjadi jauh lebih mudah; selain itu bentuk potensialnya realistis karena menyerupai distribusi kerapatan inti. Sejumlah parametrisasi potensial Woods-Saxon telah dilakukan orang, dengan tujuan yang berbeda-beda dan berlaku untuk daerah massa inti yang berbeda-beda pula. Parametrisasi baru juga didorong munculnya data-data baru tingkat-tingkat tenaga partikel-tunggal inti-inti bola (Bernardos *et al.*, 1993; López-Quelle *et al.*, 2000).

Didorong oleh kenyataan bahwa potensial Woods-Saxon masih banyak digunakan dalam kajian fisika inti terkini dan tersedianya data-data baru tingkat-tingkat tenaga partikel-tunggal untuk inti-inti bola, penulis dalam kajian kecil sebelumnya telah mengkaji ketelitian penggunaan potensial Woods-Saxon untuk menghitung tingkat-tingkat tenaga partikel-tunggal nukleon inti-inti bola, yaitu  $O^{16}$ ,  $Ca^{40}$ ,  $Ca^{48}$  (Oktova, 2007), dan  $Pb^{208}$  (Oktova, 2010), dengan menggunakan parametrisasi Shlomo dan Bertsch (Bertsch, 1991). Dalam perkembangan terkini, Schwierz *et al.* (2007) telah mendapatkan himpunan parameter baru untuk potensial Woods-Saxon yang diyakini merupakan himpunan parameter global, dan memenuhi prinsip-prinsip simetri kekekalan isospin dalam gaya inti serta kinematika dua-benda. Dalam parametrisasi baru ini digunakan himpunan tingkat tenaga partikel-tunggal (*single-particle*

*states*) dan lubang-tunggal (*single-hole states*) di sekitar inti-inti ajaib-rangkap  $O^{16}$ ,  $Ca^{40}$ ,  $Ca^{48}$ ,  $Ni^{56}$ ,  $Sn^{100}$ ,  $Sn^{132}$  dan  $Pb^{208}$  sebagai data acuan eksperimental untuk melakukan pencocokan kuadrat terkecil.

Makalah ini menyajikan hasil perhitungan dengan menggunakan himpunan parameter baru potensial Woods-Saxon tersebut untuk menghitung spektrum tenaga partikel-tunggal dan lubang-tunggal inti bola, dan inti ajaib-rangkap  $Pb^{208}$  diambil sebagai contoh mengingat data eksperimental lengkap spektrum tenaga partikel-tunggal dan lubang-tunggal yang cukup mutakhir tersedia sebagai pembandingan (Schmorak, 1984; Martin, 1991). Selain dibandingkan dengan data eksperimental, untuk perbandingan digunakan hasil perhitungan swakonsisten Fayans *et al.* (1994) dengan fungsional kerapatan-tenaga yang sejauh ini tampaknya merupakan salah satu perhitungan paling teliti untuk spektrum tenaga inti keadaan dasar  $Pb^{208}$ . Mengingat bahwa potensial Woods-Saxon adalah suatu potensial satu-benda sederhana, dari parameter baru yang dikaji tentu saja tidak diharapkan suatu tingkat ketelitian tinggi seperti yang diharapkan dari perhitungan swakonsisten yang canggih, namun dari kajian ini setidaknya dapat diperoleh gambaran ada-tidaknya peningkatan ketelitian dibandingkan perhitungan dengan parameter lama.

Sebenarnya dalam parametrisasi barunya, Schwierz *et al.* (2007) mendeskripsikan potensial Woods-Saxon dengan pendekatan yang sedikit berbeda, namun bentuk akhir potensial sama dengan yang disajikan penulis dalam kajian-kajian sebelumnya (Oktova, 2007; Oktova, 2010) dan secara lengkap dapat disajikan dalam tiga suku, yakni potensial sentral berupa fungsi Fermi ( $V_{SW}$ ) dengan koreksi kopling spin-orbit ( $V_s$ ) dan potensial Coulomb ( $V_c$ ),

$$V = V_{SW} + V_s + V_c, \quad (1)$$

dengan

$$V_{SW} = \frac{-V_0}{1 + e^{-\frac{r-R}{a}}}, \quad (2)$$

$$V_c = V_c(r) - \frac{2V_T(A - 2Z - 1)}{A(1 + e^{-\frac{r-R}{a}})}, \quad (3)$$

$$V_s = f_{\ell} V_{so} \frac{e^{(r-R_s)/a_s}}{a_s R_s (1 + e^{(r-R_s)/a_s})^2}. \quad (4)$$

Dalam potensial Coulomb persamaan (3),

$$V_c(r) = \begin{cases} \frac{Zke^2}{R_c} \left[ 1,5 - 0,5 \left( \frac{r}{R_c} \right)^2 \right], & r < R \\ \frac{Zke^2}{r}, & r \leq R, \end{cases} \quad (5)$$

dan  $k$  konstanta gaya statik Coulomb. Dalam suku spin-orbit persamaan (4),

$$f_\ell = \begin{cases} \ell & \text{bila } 2\ell < j \\ -(\ell+1) & \text{bila } 2\ell \geq j, \end{cases} \quad (6)$$

dengan  $\ell$  bilangan kuantum momentum sudut orbital dan  $j$  bilangan kuantum momentum sudut total.

Berdasarkan parametrisasi Shlomo dan Bertsch (Bertsch, 1991) yang digunakan penulis dalam kajian sebelumnya, nilai-nilai parameter dalam persamaan (2-4) adalah

$$V_0 = 53 + V_T \left( \frac{A - 2Z - 1}{A} \right) \text{ MeV}, \quad (7.a)$$

$$R = R_s = 1,25 (A - 1)^{1/3} \text{ fm}, \quad (7.b)$$

dengan  $a = a_s = 0,65 \text{ fm}$ ,  $V_T = 20 \text{ MeV}$ , dan  $V_{so} = -15,5 \text{ MeV}$ . Jadi parameter jari-jari dan kekaburan (*diffuseness*) sumur tidak dibedakan,  $R = R_s$  dan  $a = a_s$ . Dalam parametrisasi baru, nilai-nilai parameter adalah

$$V_0 = 52,06 + V_T \left( \frac{A - 2Z - 1}{A} \right) \text{ MeV}, \quad (8.a)$$

$$R = 1,26A^{1/3} \text{ fm}, \quad (8.b)$$

$$R_s = 1,16A^{1/3} \text{ fm}, \quad (8.c)$$

dengan  $a = a_s = 0,662 \text{ fm}$ , dan  $V_{so} = -24,1 \text{ MeV}$ . Adapun  $V_T = 20 \text{ MeV}$ , sama dengan parameter sebelumnya. Terdapat koreksi pusat massa inti dalam parametrisasi baru sehingga digunakan massa tereduksi sistem inti

$$\mu = \frac{mM}{m+M}, \quad (9)$$

dengan  $m$  massa nukleon, dan  $M$  massa sisa inti dianggap  $M = (A - 1) \text{ sma}$ . Dalam kajian ini, massa tereduksi dihampiri dengan massa nukleon.

Dalam koordinat bola, persamaan Schrödinger untuk potensial Woods-Saxon (1) dapat ditulis

$$\left( -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V \right) \Psi(r, \theta, \phi) = E \Psi(r, \theta, \phi). \quad (10)$$

Tingkat-tingkat tenaga partikel-tunggal nukleon adalah eigen nilai tenaga,  $E$  pada persamaan (10). Dengan metode pemisahan variabel, dimisalkan

$$\Psi(r, \theta, \phi) = R(r) \Theta(\theta) \Phi(\phi) \quad (11)$$

dan dengan substitusi  $U = Rr$ , maka persamaan bagian radial menjadi

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 U}{dr^2} + \left( V + \frac{\ell(\ell+1)\hbar^2}{2mr^2} \right) U = EU \quad (12)$$

atau

$$\frac{d^2 U}{dr^2} = F(r, U), \quad (13)$$

dengan

$$F(r, U) = \left( \frac{2m}{\hbar^2} (V - E) + \frac{\ell(\ell+1)}{r^2} \right) U, \quad (14)$$

artinya diferensial kedua  $U$  terhadap  $r$  hanya bergantung pada variabel bebas  $r$  dan  $U$  yang dicari serta tidak mengandung  $dU/dr$ , sehingga persamaan diferensial dapat diselesaikan dengan algoritma Numerov.

Penyelesaian secara numeris persamaan (14) dengan algoritma Numerov dapat dilakukan dengan hampiran (Thijssen, 1999)

$$U_{l+1} \approx \left\{ 2 + \frac{m\Delta r^2}{\hbar^2} \left( V - E + \frac{\ell(\ell+1)\hbar^2}{2mr^2} \right) \right\} U_l - U_{l-1} \quad (15)$$

dengan  $\Delta r$  adalah lebar langkah antara dua titik kisi berurutan. Jika dianggap  $r$  sangat kecil dibandingkan seluruh jangkauan  $r$ , maka berlaku hampiran

$$U(r) = r^{\ell+1}, \quad (16)$$

dengan demikian untuk lebar langkah  $\Delta r = 0,1$  misalnya, nilai  $U$  pada dua titik pertama dapat dihampiri dengan

$$U_1 \approx 0,1^{\ell+1}, \quad U_2 \approx 0,2^{\ell+1}. \quad (17)$$

## METODE PENELITIAN

Berdasarkan metode Numerov (persamaan 15-17), tingkat-tingkat tenaga partikel-tunggal,  $E$  dapat dihitung dengan langkah-langkah sebagai berikut (Oktova, 2010).

1. Dibaca nilai bilangan kuantum  $\ell$  untuk keadaan partikel-tunggal tertentu. Urutan keadaan-keadaan dalam kulit nukleon tertentu dapat dihitung berdasarkan urutan pada osilator isotrop seperti ditunjukkan pada Tabel 1, dengan  $N = 2n + \ell$  adalah bilangan kuantum utama osilator ( $0,1,2,3,\dots$ ), dan  $n$  bilangan kuantum radial osilator adalah cacah simpul eigen fungsi  $U$  dan dibaca dari data masukan.
2. Dengan nilai tebakan awal  $E = (E_{\min} + E_{\max})/2$ , dihitung nilai eigen fungsi  $U$  pada semua titik kisi dengan menggunakan persamaan (15).
3. Diperiksa apakah cacah simpul eigen fungsi  $U$  sesuai dengan  $n$  yang diperoleh dari pembacaan data masukan pada langkah pertama. Jika cacah simpul eigen fungsi  $U$  lebih besar dari  $n$ , maka ditetapkan batas baru  $E_{\max} = E$ , dan kembali ke langkah 2. Jika cacah simpul eigen fungsi  $U$  lebih

kecil dari atau sama dengan  $n$ , maka ditetapkan batas baru  $E_{\min} = E$ , dan kembali ke langkah 2. Loop langkah 2 dan 3 dilakukan hingga 25 kali.

4. Mengulangi langkah 1 dan seterusnya sampai semua keadaan masukan terbaca dan diproses.

Untuk membantu perhitungan numerik, dibuat sebuah program perhitungan dalam bahasa Windows Compaq Visual Fortran Professional Edition 6.5.0 yang diberi nama SW dengan mengembangkan subrutin STATIC, yaitu subrutin perhitungan tingkat-tingkat tenaga partikel-tunggal dan eigen fungsi dari potensial Woods-Saxon yang merupakan bagian dari program RPA3 (Bertsch, 1991). Masukan program adalah nomor atom dan nomor massa inti, serta orbital-orbital partikel-tunggal dan lubang-tunggal osilator harmonik isotrop (Oktova *et al.*, 1997) berdasarkan urutan seperti pada Tabel 1. Parameter-parameter kisi yang digunakan sama seperti pada kajian sebelumnya, yaitu cacah titik kisi sama dengan 50, dan lebar langkah  $\Delta r = 0,25$  fm. Untuk tebakan awal eigen nilai tenaga digunakan batas atas nol dan batas bawah  $-50$  MeV.

Perhitungan tingkat tenaga partikel-tunggal dan lubang-tunggal dengan potensial Woods-Saxon parametrisasi lama oleh Shlomo dan Bertsch (Bertsch, 1991) merujuk pada himpunan parameter persamaan (7), sedangkan parametrisasi baru merujuk pada himpunan parameter persamaan (8).

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil perhitungan tingkat-tingkat tenaga partikel-tunggal dan lubang-tunggal dalam inti  $Pb^{208}$  dengan potensial Woods-Saxon disajikan pada Tabel 2 untuk neutron dan Tabel 3 untuk proton, dan untuk mudahnya hanya disajikan nilai mutlak tenaga (yang sebenarnya bernilai negatif). Skema tingkat-tingkat tenaga disajikan dalam Gambar 1 dan 2. Tingkat-tingkat tenaga lubang-tunggal disajikan dengan huruf tebal dan data eksperimental disajikan dengan tanda bintang. Pada Gambar 1 dan 2 batas antara tingkat-tingkat tenaga partikel-tunggal dan lubang-tunggal ditunjukkan oleh bilangan ajaib 126 untuk neutron dan 82 untuk proton. Nilai eksperimental diambil dari (Martin, 1991) untuk partikel-tunggal, dan dari (Schmorak, 1984) untuk

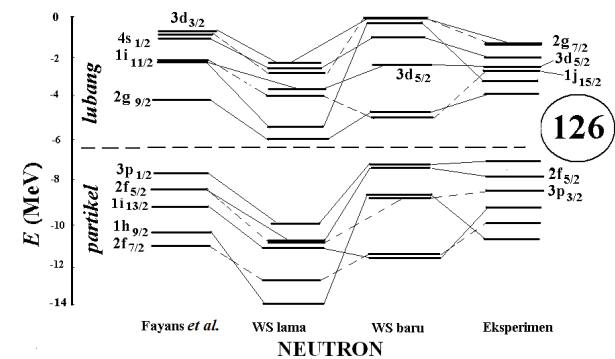
**Tabel 1.** Orbital-orbital partikel-tunggal dan lubang-tunggal osilator harmonik isotrop

N	$E_N/\hbar\omega$	Orbital	
		$n\ell$	Notasi
0	3/2	00	1s
1	5/2	01	1p
2	7/2	1 0,0 2	2s,1d
3	9/2	1 1,0 3	2p, 1f
4	11/2	2 0,1 2,0 4	3s, 2d, 1g
5	13/2	2 1, 1 3, 0 5	3p,2f, 1h
6	15/2	3 0,2 2,1 4,0 6	4s,3d, 2g, 1i
7	17/2	3 1,2 3,1 5,0 7	4p,3f,2h,1j

lubang-tunggal. Sebagai perbandingan digunakan hasil perhitungan swakonsisten Fayans *et al.* (1994) yang sejauh ini tampaknya merupakan perhitungan paling teliti untuk spektrum tenaga inti  $Pb^{208}$ , dengan deviasi rerata akar kuadrat tenaga terhitung terhadap nilai eksperimental sebesar 0,580 MeV untuk neutron dan 0,286 MeV untuk proton.

Hasil perhitungan dengan potensial Woods-Saxon parametrisasi lama memberikan tenaga yang umumnya lebih tinggi dari nilai eksperimental, sedangkan hasil perhitungan dengan potensial Woods-Saxon parametrisasi baru memberikan tenaga yang tersebar di sekitar nilai eksperimental, jadi dapat disimpulkan bahwa perhitungan dengan parametrisasi baru berhasil menghilangkan kecenderungan penyimpangan sistematis yang terdapat pada parametrisasi lama.

Tabel 4 menyajikan deviasi rerata akar kuadrat tenaga partikel-tunggal dan lubang-tunggal hasil perhitungan terhadap nilai eksperimental, dan terlihat jelas bahwa hasil perhitungan Fayans *et al.* jauh lebih teliti dari hasil perhitungan menggunakan potensial Woods-Saxon, baik dengan parametrisasi lama maupun



**Gambar 1.** Spektrum tenaga partikel-tunggal dan lubang-tunggal neutron dalam inti  $Pb^{208}$

**Tabel 2.** Hasil perhitungan tingkat-tingkat tenaga partikel-tunggal dan lubang-tunggal neutron, dinyatakan dengan  $-E$  dalam satuan MeV

Keadaan	Fayans <i>et al.</i>	Woods-Saxon		Eksp.
		Lama	Baru	
1h <sub>9/2</sub>	10,304	13,95	8,83	10,85
2f <sub>7/2</sub>	10,959	13,13	11,56	9,72
1i <sub>13/2</sub>	9,178	11,18	11,77	9,01
2f <sub>5/2</sub>	8,540	10,79	7,56	7,95
3p <sub>3/2</sub>	8,540	10,85	8,90	8,28
3p <sub>1/2</sub>	7,679	9,91	7,49	7,38
<b>2g<sub>9/2</sub></b>	<b>4,162</b>	<b>6,00</b>	<b>4,84</b>	<b>3,93*</b>
<b>1i<sub>11/2</sub></b>	<b>2,083</b>	<b>5,68</b>	<b>0,33</b>	<b>3,15*</b>
<b>1j<sub>15/2</sub></b>	<b>1,965</b>	<b>4,04</b>	<b>5,27</b>	<b>2,52*</b>
<b>3d<sub>5/2</sub></b>	<b>2,014</b>	<b>3,69</b>	<b>2,25</b>	<b>2,37*</b>
<b>4s<sub>1/2</sub></b>	<b>1,452</b>	<b>2,57</b>	<b>1,07</b>	<b>1,89*</b>
<b>2g<sub>7/2</sub></b>	<b>1,279</b>	<b>2,80</b>	<b>0,04</b>	<b>1,43*</b>
<b>3d<sub>3/2</sub></b>	<b>0,980</b>	<b>2,20</b>	<b>0,35</b>	<b>1,39*</b>

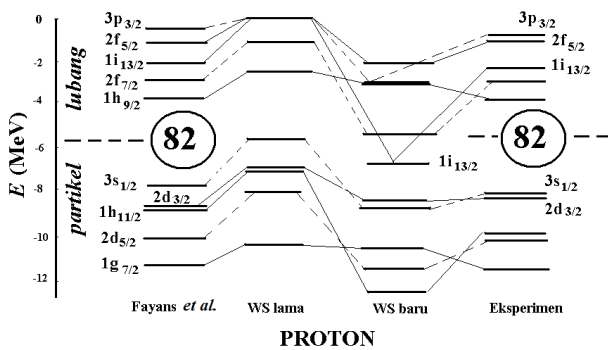


baru. Hal ini berlaku untuk semua tingkat tenaga yang ditinjau (partikel neutron, lubang neutron, partikel proton, lubang proton, dan gabungan tingkat partikel/lubang).

Dibandingkan parametrisasi lama, parametrisasi baru potensial Woods-Saxon berhasil meningkatkan ketelitian untuk tingkat-tingkat tenaga partikel untuk neutron dan proton, namun tidak berhasil meningkatkan ketelitian untuk tingkat-tingkat tenaga lubang (Tabel 4).

**Tabel 3.** Hasil perhitungan tingkat-tingkat tenaga partikel-tunggal dan lubang-tunggal proton, dinyatakan dengan  $-E$  dalam satuan MeV

Keadaan	Fayans <i>et al.</i>	Woods-Saxon		Eksp.
		Lama	Baru	
1g <sub>7/2</sub>	11,280	10,17	10,35	11,52
2d <sub>5/2</sub>	9,842	7,89	11,27	9,71
1h <sub>11/2</sub>	8,787	6,75	12,65	9,38
2d <sub>3/2</sub>	8,472	6,44	8,62	8,39
3s <sub>1/2</sub>	7,691	5,68	8,83	8,03
1h <sub>9/2</sub>	3,799	2,65	3,10	3,77*
2f <sub>7/2</sub>	3,144	1,01	5,58	2,86*
1i <sub>13/2</sub>	2,005	0,02	7,18	2,16*
2f <sub>5/2</sub>	1,225	0,00	2,08	0,96*
3p <sub>3/2</sub>	0,350	0,00	2,99	0,66*



**Gambar 2.** Spektrum tenaga partikel-tunggal dan lubang-tunggal proton dalam inti Pb<sup>208</sup>

**Tabel 4.** Deviasi rerata akar kuadrat tenaga hasil perhitungan terhadap nilai eksperimental dalam satuan MeV

Keadaan	Fayans <i>et al.</i>	Woods-Saxon	
		Lama	Baru
n partikel	0,427	1,902	1,097
p partikel	0,234	1,462	1,232
n lubang	0,393	1,168	1,242
p lubang	0,165	1,030	1,993
n (partikel+lubang)	0,580	2,232	1,657
p (partikel+lubang)	0,286	1,789	2,343

**SIMPULAN**

Dibandingkan parametrisasi lama yang dikaji di sini, parametrisasi baru potensial Woods-Saxon berhasil meningkatkan ketelitian deviasi rerata akar kuadrat tenaga terhadap eksperimen untuk keadaan partikel-tunggal saja, namun tidak berhasil meningkatkan ketelitian untuk keadaan lubang-tunggal. Untuk kajian selanjutnya dapat diperhitungkan adanya koreksi pusat massa untuk penggunaan di daerah kontinu.

**DAFTAR PUSTAKA**

Baghwat A, Gambhir YK & Patil SH, 2000. Nuclear Densities in the Neutron-Halo Region. *Eur. Phys. J.*, A8(4): 511-520.

Bernardos P, Fomenko V N, Van Giai N, López-Quelle M, Marcos S, Niembro R, & Savushkin L N, 1993. Relativistic Hartree-Fock Approximation in a Nonlinear Model for Nuclear Matter and Finite Nuclei. *Phys. Rev. C*48: 2665-2672.

Bertsch G, 1991. The Random Phase Aproximation for collective excitations. pp 75-87 in Langanke K, Maruhn JA & Koonin SE (eds). *Computational Nuclear Physics 1: Nuclear Structure*, Chapter 4, New York: Springer Verlag.

Brown BA, 2001. Neutron Radii in Nuclei and the Neutron Equation of State. *Prog. Part. Nucl. Phys.* 47: 517.

Fayans S A, Trykov E L, Zawischa D, 1994. Influence of effective spin-orbit interaction on the collective states of nuclei. *Nucl Phys.* A568: 523-543.

Hamzavi M & Ikhdair SM, 2012. Any J-state Solution of the DKP Equation for a Vector Deformed Woods-Saxon Potential, *Few-Body Systems* 53 (3-4): 461-471.

López-Quelle M, Van Giai N, Marcos S, & Savushkin L, 2000. Spin-Orbit Splitting in Non-Relativistic and Relativistic Self-Consistent Models. *Phys. Rev. C* 61: 64321.

Martin MJ, 1991. Nucl. Data Sheets for A=209, *Nucl. Data Sheets* 63: 723.

Mo YJ, Feng SQ & Shi YF, 2013. Effect of the Wood-Saxon nuclear distribution on the chiral magnetic field in Relativistic Heavy-Ion Collisions. *Phys. Rev. C*88: 024901.

Oktova R, 2010, Perhitungan Aras-Aras Tenaga Partikel-Tunggal Inti Pb<sup>208</sup> dengan Potensial Woods-Saxon. *Prosiding Seminar Nasional Sains & Pendidikan Sains V*, FSM UKSW Salatiga, 10 Juni 2010, p. 304.

Oktova R, 2007. Perhitungan aras-aras tenaga partikel-tunggal inti bola dalam ruang koordinat, *Jurnal Forum MIPA* 5(1): 1.

Oktova R, Muslim & Prayoto, 1997. Application of the Best Oscillator Parameter Set to the Calculation of Moments of Inertia of Even-Even Nuclei. *Proceedings Indonesian Students Scientific Meeting 1997*, Wiesbaden, Germany, p. 49.

Ring P & Schuck P, 2000. *The Nuclear Many-Body Problem*. Berlin: Springer.

Rotival V & Duguet T, 2009. New analysis method of the halo phenomenon in finite many-fermion systems. First applications to medium-mass atomic nuclei, *Phys. Rev. C* 79: 054308.

Schmorak MR, 1984. Nucl. Data Sheets for A=207, *Nucl. Data Sheets* 43: 383.

Schwierz N, Wiedenhöver I & Volya A, 2007. Parameterization of the Woods-Saxon Potential for Shell-Model Calculations, *arXiv:0709.3525 [nucl-th]* 21 Sept. 2007.

Thijssen JM, 1999. *Computational Physics*. Cambridge University Press.