

PENGGUNAAN PARAMETER BARU POTENSIAL WOODS - SAXON UNTUK PERHITUNGAN SPEKTRUM TENAGA INTI ^{208}Pb

Raden Oktova

Program Magister Pendidikan Fisika, Universitas Ahmad Dahlan, Yogyakarta

Kampus II, Jl.Pramuka 42, Yogyakarta 55161

E-mail: pasca.pfisika@yahoo.com

ABSTRAK

PENGGUNAAN PARAMETRISASI BARU POTENSIAL WOODS-SAXON UNTUK PERHITUNGAN SPEKTRUM TENAGA INTI ^{208}Pb . Telah dihitung aras-aras tenaga partikel-tunggal dan lubang-tunggal untuk inti ^{208}Pb menggunakan potensial Woods - Saxon dengan parametrisasi baru dalam ruang koordinat dengan algoritma Numerov. Dibandingkan parametrisasi lama, parametrisasi baru potensial Woods-Saxon berhasil meningkatkan ketelitian deviasi rms tenaga terhadap eksperimen hanya sejauh menyangkut deviasi rms tenaga partikel-tunggal saja, namun gagal untuk deviasi rms (*root mean square*) tenaga lubang-tunggal. Dalam hal struktur aras tenaga, parametrisasi baru justru menunjukkan lebih banyak kesalahan urutan aras daripada parametrisasi lama.

Kata kunci: aras tenaga partikel-tunggal, aras tenaga lubang-tunggal, ^{208}Pb , potensial Woods-Saxon, algoritma Numerov

ABSTRACT

APPLICATION OF A NEW PARAMETRIZATION OF THE WOODS-SAXON POTENTIAL TO THE CALCULATION OF ENERGY SPECTRUM IN ^{208}Pb . Single-particle and single-hole energy levels in the nucleus ^{208}Pb 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 completely for single-hole levels. In the level structure, the new parameter set shows even more level misorder than the old.

Keywords: single-particle energy levels, single-hole energy levels, ^{208}Pb , Woods-Saxon potential, Numerov algorithm

PENDAHULUAN

Deskripsi masalah banyak-benda inti (*nuclear many-body problem*) dengan suatu potensial rata-rata efektif atau potensial partikel-tunggal merupakan terobosan dalam fisika inti. Dalam model kulit untuk inti ini, 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 ^[1]. 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 ^[2]. Untuk

mendeskrripsikan inti secara teliti, parameter-parameter osilator dipilih dengan kebergantungan tertentu pada nomor massa inti, dan rumus yang banyak dipakai adalah $\hbar\omega = 41 A^{1/3}$ MeV, yang diperoleh dengan membandingkan jari-jari *rms* massa osilator dengan data eksperimental. Persamaan Schrödinger-nya 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^[3-4]. 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. Untuk itu, potensial partikel-tunggal Woods-Saxon^[5] banyak digunakan. Memang penyelesaiannya tidak lagi analitis namun dapat dihasilkan daerah kontinu spektrum, dan kehadiran komputer canggih saat ini memungkinkan penyelesaian numerik menjadi jauh lebih mudah; selain itu bentuk potensialnya realistik 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. Motivasi ini diperkuat dengan munculnya data-data baru aras-aras tenaga partikel-tunggal inti-inti bola^[6-7].

Dalam kerangka pemikiran inilah penulis dalam kajian sebelumnya telah mengkaji ketelitian penggunaan potensial Woods-Saxon untuk menghitung aras-aras partikel-tunggal nukleon inti-inti bola, yaitu ¹⁶O, ⁴⁰Ca, ⁴⁸Ca^[8], dan ²⁰⁸Pb^[9], dengan menggunakan parametrisasi Shlomo dan Bertsch^[10] yang disempurnakan oleh Bertsch^[11]. Dalam perkembangan terkini, Schwierz dkk.^[12] 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 aras partikel-tunggal (*single-particle states*) dan lubang-tunggal (*single-hole states*) di sekitar inti-inti ajaib-rangkap ¹⁶O, ⁴⁰Ca, ⁴⁸Ca, ⁵⁶Ni, ¹⁰⁰Sn, ¹³²Sn dan ²⁰⁸Pb sebagai data acuan eksperimental untuk melakukan pencocokan

kuadrat terkecil. Makalah ini menyajikan hasil penggunaan himpunan parameter baru potensial Woods-Saxon tersebut untuk menghitung spektrum tenaga partikel-tunggal dan lubang-tunggal inti bola, dan inti ajaib-rangkap ²⁰⁸Pb diambil sebagai contoh karena data eksperimental lengkap spektrum tenaga partikel-tunggal dan lubang-tunggal yang cukup mutakhir tersedia^[13-14].

TEORI

Sebenarnya dalam parametrisasi barunya, Schwierz dkk.^[12] mendeskripsikan potensial Woods-Saxon dengan pendekatan yang sedikit berbeda, namun tidak jauh berbeda dengan yang disajikan penulis dalam kajian-kajian sebelumnya^[8-9], potensial partikel-tunggal Woods-Saxon 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) yang dinyatakan dalam Pers. (1),

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

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 Pers. (3) menjadi

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

dan k konstanta gaya statik Coulomb. Dalam suku spin-orbit Pers. (4), dapat ditulis

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

dengan ℓ bilangan kuantum momentum sudut orbital dan j bilangan kuantum momentum sudut total.

Berdasarkan parametrisasi Shlomo dan Bertsch^[10-11] yang digunakan penulis dalam kajian sebelumnya, nilai-nilai parameter dalam Pers. (2-4) adalah

$$\begin{aligned} V_0 &= 53 + V_T \left(\frac{A - 2Z - 1}{A} \right) \text{ MeV,} \\ R &= R_s = 1,25(A - 1)^{1/3} \text{ fm,} \\ a &= a_s = 0,65 \text{ fm,} \\ V_T &= 20 \text{ MeV,} \\ V_{so} &= -15,5 \text{ MeV.} \end{aligned} \quad (7)$$

Jadi parameter jari-jari dan kekaburan (*diffuseness*) sumur tidak dibedakan, $R = R_s$ dan $a = a_s$. Dalam parametrisasi baru, nilai-nilai parameter adalah

$$\begin{aligned} V_0 &= 52,06 + V_T \left(\frac{A - 2Z - 1}{A} \right) \text{ MeV,} \\ R &= 1,26A^{1/3} \text{ fm,} \\ R_s &= 1,16A^{1/3} \text{ fm,} \\ a &= a_s = 0,662 \text{ fm,} \\ V_{so} &= -24,1 \text{ MeV.} \end{aligned} \quad (8)$$

Adapun $V_T = 20$ 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 $M = (A - 1)$ sama. Dalam kajian ini, massa tereduksi dihipotesiskan dengan massa nukleon.

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

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

Aras-aras tenaga partikel-tunggal nukleon adalah eigennilai tenaga, E pada pers. (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

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

atau

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

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.

METODE PENYELESAIAN NUMERIK

Penyelesaian secara numerik pers. (14) dengan algoritma Numerov dapat dilakukan dengan hampiran [15]

$$U_{i+1} \approx \left[2 + \frac{m\Delta r^2}{\hbar^2} \left(V - E + \frac{\ell(\ell+1)\hbar^2}{2mr^2} \right) \right] U_i - U_{i-1}. \quad (15)$$

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

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

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

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

Selanjutnya aras-aras tenaga partikel-tunggal, E dapat dihitung dengan langkah-langkah sebagaimana diuraikan dalam [8-9].

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 aras-aras tenaga partikel-tunggal dan eigenfungsi dari potensial Woods-Saxon yang merupakan bagian dari program RPA3^[10-11]. Masukan program adalah nomor atom dan nomor massa inti, serta orbital-orbital partikel-tunggal dan lubang-tunggal osilator harmonik isotrop^[16] 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 eigennilai tenaga digunakan batas atas nol dan batas bawah -50 MeV.

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

N	E_N/h	Orbital	
		nl	Notasi
0	3/2	0 0	1s
1	5/2	0 1	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

Perhitungan aras-aras tenaga partikel-tunggal dan lubang-tunggal dengan potensial Woods-Saxon parametrisasi lama oleh Shlomo dan Bertsch [10-11] merujuk pada himpunan parameter Pers. (7), sedangkan parametrisasi baru merujuk pada himpunan parameter Persamaan (8).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil perhitungan aras-aras tenaga partikel-tunggal dan lubang-tunggal dalam inti ^{208}Pb 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 aras-aras tenaga disajikan dalam Gambar 1 dan 2. Aras-aras lubang-tunggal disajikan dengan huruf tebal dan data eksperimental disajikan dengan tanda bintang. Pada Gambar 1 dan Gambar 2 batas antara aras-aras partikel-tunggal dan lubang-tunggal ditunjukkan oleh bilangan ajaib 126 untuk neutron dan 82 untuk proton. Nilai

eksperimental diambil dari [13] untuk partikel-tunggal, dan dari [14] untuk lubang-tunggal. Sebagai perbandingan digunakan hasil perhitungan swakonsisten Fayans dkk. [17] yang sejauh ini tampaknya merupakan perhitungan paling teliti untuk spektrum tenaga inti ^{208}Pb , dengan deviasi rms tenaga terhitung terhadap nilai eksperimental sebesar 0,580 MeV untuk neutron dan 0,286 MeV untuk proton.

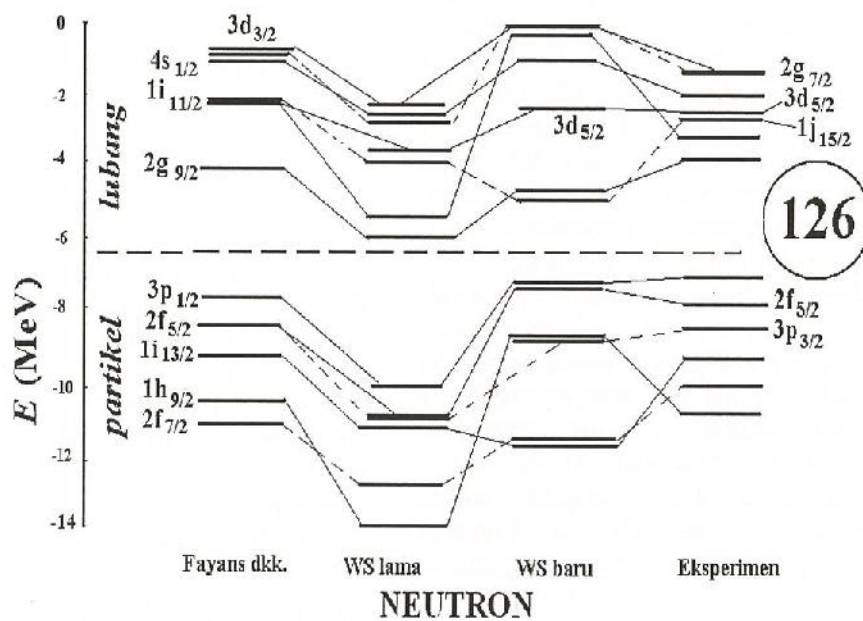
Hasil perhitungan dengan potensial Woods-Saxon parametrisasi lama memberikan tenaga yang umumnya lebih tinggi dari nilai eksperimental, sedangkan hasil perhitungan dengan potensial Woods-Saxon parametrisasi baru memberikan tenaga yang tersebar di sekitar nilai eksperimental.

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

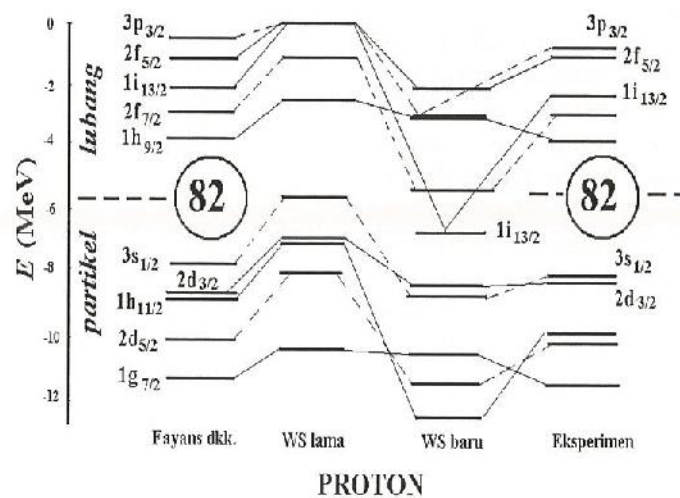
Aras	Fayans dkk.	Woods-Saxon		Eksp.
		Lama	Baru	
1h _{9/2}	10,304	13,95	8,83	10,85
2f _{7/2}	10,959	13,13	11,56	9,72
1i _{13/2}	9,178	11,18	11,77	9,01
2f _{5/2}	8,540	10,79	7,56	7,95
3p _{3/2}	8,540	10,85	8,90	8,28
3p _{1/2}	7,679	9,91	7,49	7,38
2g _{9/2}	4,162	6,00	4,84	3,93*
1i _{11/2}	2,083	5,68	0,33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

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

Aras	Fayans dkk.	Woods-Saxon		Eksp.	Aras	Fayans dkk.	Woods-Saxon		Eksp.
		Lama	Baru				Lama	Baru	
$1g_{7/2}$	11,280	10,17	10,35	$1g_{7/2}$	$1h_{9/2}$	3,799	2,65	3,10	$1h_{9/2}$
$2d_{5/2}$	9,842	7,89	11,27	$2d_{5/2}$	$2f_{7/2}$	3,144	1,01	5,58	$2f_{7/2}$
$1h_{11/2}$	8,787	6,75	12,65	$1h_{11/2}$	$1i_{13/2}$	2,005	0,02	7,18	$1i_{13/2}$
$2d_{3/2}$	8,472	6,44	8,62	$2d_{3/2}$	$2f_{5/2}$	1,225	0,00	2,08	$2f_{5/2}$
$3s_{1/2}$	7,691	5,68	8,83	$3s_{1/2}$	$3p_{3/2}$	0,350	0,00	2,99	$3p_{3/2}$



Gambar 1. Spektrum Tenaga Partikel-Tunggal Dan Lubang-Tunggal Neutron dalam Inti ^{208}Pb



Gambar 2. Spektrum Tenaga Partikel-Tunggal Dan Lubang-Tunggal Proton Dalam Inti ^{208}Pb

Dalam hal struktur aras tenaga, hasil perhitungan dengan ketiga metode menunjukkan kesalahan-kesalahan urutan aras tenaga. Untuk neutron, perhitungan Fayans dkk. menunjukkan tiga kesalahan urutan ($1h_{9/2}$ dengan $2f_{7/2}$ terbalik, $2f_{5/2}$ dengan $3p_{3/2}$ berimpit, $1j_{15/2}$ dengan $3d_{5/2}$ terbalik), sedangkan perhitungan dengan potensial Woods-Saxon parametrisasi baru lebih banyak menunjukkan kesalahan urutan bahkan jika dibandingkan dengan potensial Woods-Saxon parametrisasi lama. Perhitungan dengan potensial Woods-Saxon parametrisasi baru untuk neutron memberikan empat kesalahan urutan ($1h_{9/2}$ dengan $2f_{7/2}$, $2f_{7/2}$ dengan $1i_{13/2}$, $1i_{11/2}$ dengan $1j_{15/2}$, $2g_{7/2}$ dengan $3d_{3/2}$, semua terbalik), padahal dengan parametrisasi lama hanya dijumpai satu kesalahan urutan ($4s_{1/2}$ terbalik dengan $2g_{7/2}$). Kcadaannya lebih parah lagi untuk proton: perhitungan Fayans dkk. sama sekali tidak memberikan urutan kesalahan, potensial Woods-Saxon parametrisasi lama hanya memberikan satu kesalahan urutan ($2f_{5/2}$ terbalik dengan $3p_{3/2}$), namun potensial Woods-Saxon parametrisasi baru justru menunjukkan enam kesalahan urutan (terbalik) yang melibatkan semua aras tenaga yang dikaji (baik partikel maupun lubang). Walaupun demikian ternyata potensial Woods-Saxon parametrisasi baru lebih unggul dalam mendeskripsikan daerah kontinu (lubang) dibandingkan parametrisasi lama, sebagaimana terlihat dari adanya dua aras lubang-tunggal proton yang mempunyai tenaga sama dengan nol (ini bisa berarti tenaganya positif jika digunakan batas atas positif untuk tebakan awal eigennilai tenaga).

Dapat disimpulkan bahwa dalam hal struktur aras tenaga ketelitian perhitungan Fayans dkk. lebih baik daripada hasil perhitungan dengan metode Woods-Saxon, terutama dengan parametrisasi baru. Tabel 4 menyajikan deviasi *rms* tenaga partikel-tunggal dan lubang-tunggal hasil perhitungan terhadap nilai eksperimental, dan terlihat jelas bahwa hasil perhitungan Fayans dkk. jauh lebih teliti dari hasil perhitungan menggunakan potensial Woods-Saxon, baik dengan parametrisasi lama maupun baru. Hal ini berlaku untuk semua aras tenaga yang ditinjau (partikel neutron, lubang neutron, partikel proton, lubang proton, dan gabungan aras partikel/lubang).

Tabel 4. Deviasi *rms* tenaga hasil perhitungan terhadap nilai eksperimental dalam satuan MeV

Aras	Fayans dkk.	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

Tabel 4 menunjukkan bahwa dibandingkan parametrisasi lama, parametrisasi baru potensial Woods-Saxon berhasil meningkatkan ketelitian untuk aras-aras partikel baik untuk neutron maupun proton, namun yang sebaliknya justru terjadi untuk aras-aras lubang (parametrisasi lama lebih teliti daripada parametrisasi baru). Jika gabungan semua aras partikel dan lubang dikaji, diperoleh kesimpulan yang membingungkan tentang mana yang lebih teliti, karena parametrisasi baru lebih teliti daripada parametrisasi lama untuk neutron namun sebaliknya untuk proton, parametrisasi lama justru lebih teliti daripada parametrisasi baru. Sebuah faktor yang boleh jadi perlu diperhatikan adalah koreksi pusat massa Pers. (9) yang dalam kajian ini diabaikan.

KESIMPULAN

Dibandingkan parametrisasi lama yang dikaji di sini, parametrisasi baru potensial Woods-Saxon berhasil meningkatkan ketelitian deviasi *rms* tenaga terhadap eksperimen hanya sejauh menyangkut deviasi *rms* tenaga partikel-tunggal saja, namun gagal untuk deviasi *rms* tenaga lubang-tunggal. Dalam hal struktur aras tenaga, parametrisasi baru potensial Woods-Saxon justru menunjukkan lebih banyak kesalahan urutan aras daripada parametrisasi lama. Dalam semua aspek, baik parametrisasi lama maupun parametrisasi baru potensial Woods-Saxon masih kalah teliti dibandingkan metode perhitungan swakonsisten terbaik oleh Fayans dkk. Untuk kajian selanjutnya dapat

diperhitungkan adanya koreksi pusat massa untuk penggunaan di daerah kontinu.

DAFTAR PUSTAKA

1. Ring, P., Schuck, P., "The Nuclear Many-Body Problem", Springer, Berlin (2000) 36-50.
2. Mayer, M.G., *Phys. Rev.* **75** (1949)1969.
3. Brown, B.A., Wildenthal, B., *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* **38** (1988) 29.
4. Brown, B.A., *Prog. Part. Nucl. Phys.* **47** (2001) 517.
5. Woods, R.D., Saxon, D.S., "Diffuse Surface Optical Model for Nucleon-Nuclei Scattering", *Phys. Rev.* **95** (1954) 577.
6. López-Quelle, M., Van Giai, N., Marcos, S., Savushkin, L., *Phys. Rev.* **C6106** (2000) 4321.
7. Bernardos, P., Fomenko, V. N., Van Giai, N., López-Quelle, M., Marcos, S., Niembro, R., Savushkin, L. N., *Phys. Rev.* **C48** (1993) 2665.
8. Oktova, R., "Perhitungan aras-aras tenaga partikel-tunggal inti bola dalam ruang koordinat", *Jurnal Forum MIPA* **5** (1) (2007), 1.
9. Oktova, R., "Perhitungan Aras-Aras Tenaga Partikel-Tunggal Inti 208Pb dengan Potensial Woods-Saxon" (Prosiding Seminar Nasional Sains & Pendidikan Sains V, 10 Juni 2010), FSM – UKSW Salatiga (2010) 304.
10. Shlomo, S., Bertsch, G., *Nucl. Phys.* **A243** (1975) 507.
11. Bertsch, G., "The Random Phase Approximation for collective excitations", in LANGANKE K., MARUHN J.A., KOONIN S.E. (editors). *Computational Nuclear Physics 1: Nuclear Structure*, Chapter 4, New York : Springer-Verlag (1991) 75-87.
12. Schwierz, N, Wiedenhöver, I., Volya, A., "Parameterization of the Woods-Saxon Potential for Shell-Model Calculations", arXiv:0709.3525 [nucl-th] 21 Sept. 2007.
13. Martin, M.J., *Nucl. Data Sheets for A=209*, *Nucl. Data Sheets* **63** (1991) 723.
14. Schmorak, M.R., *Nucl. Data Sheets for A=207*, *Nucl. Data Sheets* **43** (1984) 383.
15. Thijssen, J.M., "Computational Physics". Cambridge University Press (1999).
16. Oktova, R., "Perhitungan Momen Kelembaman Inti Genap-Genap dengan Model Superfluida." Tesis S2 Fisika. Yogyakarta : Program Pascasarjana UGM (1996) 42-54.
17. Fayans, S. A., Trykov, E. L., Zawischa. D., Influence of effective spin-orbit interaction on the collective states of nuclei. *Nucl Phys.* **A568** (1994) 523 -543.