

Efek *Pairing* Pada Isotop Zr dengan Potensial Interaksi *Uniform* 0.5 MeV

Pairing Effect on Isotope Zr with Uniform Interaction Potential 0.5 MeV

Alpi Mahisha Nugraha¹ dan Nurullaeli¹

¹Program Studi Teknik Infomatika, Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer, Universitas Indraprasta PGRI Jakarta

*Alamat e-mail: alpi.mahisha@gmail.com

Abstrak – Efek *pairing* merupakan fenomena kolektif ketika jumlah fermion pada inti atom banyak, pasangan-pasangan dari fermion tersebut akan membentuk kondisi nukleon (bersifat boson) yang akan membuat energi ikat inti makin kecil (semakin negatif). Salah satu alternatif cara untuk melihat fenomena ini adalah dengan penggunaan model Relativistic Mean Field (RMF) dan dikombinasikan dengan teori BCS pada isotop Zr. Efek *pairing* juga mempresentasikan bentuk intraksi total yang terjadi pada level terluar inti atom setelah inti atom melewati kondisi closed shell-nya yakni ${}_{40}\text{Zr}^{90}$ pada level $2d_{5/2}$, $1g_{7/2}$, $3s_{1/2}$, $2d_{3/2}$, dan $4s_{1/2}$. Bentuk interaksi ini dipengaruhi oleh potensial interaksi antar level, pada paper ini penggunaan potensial interaksi uniform 0.5 MeV dapat mewakili bentuk interaksi antar level meskipun memiliki akurasi yang tidak mencapai 100% (berkisar 88%-99%). Diperlukan metode optimasi untuk menentukan potensial interaksi agar dapat mempresentasikan bentuk interaksi antar level yang sesuai.

Kata kunci: efek *pairing*, isotop Zr, potensial interaksi *uniform*

Abstract – Pairing effect is a collective phenomenon in many body (fermion) nuclei, pairs of fermions will form a nucleon (boson) condition which is will decrease of the binding energy of nuclei (more negatively). One tool to see that in Zr-isotopes is using Relativistic Mean Field (RMF) model with combined BCS-theoretical. The pairing effect also represents of total interaction that occurs in outermost level nuclei after closed shell as ${}_{40}\text{Zr}^{90}$. Those level are $2d_{5/2}$, $1g_{7/2}$, $3s_{1/2}$, $2d_{3/2}$, and $4s_{1/2}$. Effect pairing depending by matrix potential interaction which is in this paper we used uniform potential interaction 0.5 MeV. However, to obtain more accurate results, other methods to minimize the differences with the experimental results are clearly needed here.

Keywords: *pairing effect*, Zr-isotopes, uniform potential interaction

© 2021 Jurnal Jejaring Matematika dan Sains. This work is licensed under a [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

PENDAHULUAN

Radioactive Nuclear Beams (RNB) atau penembakan nuklir radioaktif menjadi salah satu bukti kemajuan besar dalam dunia eksperimen sains saat ini. Perkembangan ini membuat hasil eksperimen yang begitu banyak, beruntungnya hal ini diimbangi dengan berkembangnya banyak pemodelan fenomena yang terjadi pada inti atom agar sesuai dengan besaran-besaran properti inti atom. Kemajuan eksperimen ini membuka kesempatan untuk mempelajari fenomena nuklir yang jauh dari pulau kestabilan, seperti inti atom dengan jumlah neutron yang banyak. Salah satu fenomena yang muncul pada inti atom saat keadaan ini adalah efek *pairing*.

Efek *pairing* atau efek pasangan adalah fenomena melemahnya energi ikat inti atom (semakin negatif) ketika jumlah nukleon pada inti atom berjumlah genap. Fenomena ini terjadi baik pada interaksi proton-proton atau pun neutron-neutron. Sehingga efek *pairing* juga disebut sebagai fenomena kolektif pada partikel berjumlah banyak. Efek *pairing* seringkali menjadi salah satu fenomena yang bertanggung jawab pada kestabilan isotop suatu nuklida. Bahkan *pairing* juga telah dicoba

untuk menjawab kestabilan pada inti atom ganjil, tentunya dengan aturan yang telah disesuaikan [1].

Fenomena *pairing* dapat ditemukan pada banyak isotop, seperti yang telah ditelaah pada isotop Sn [2], isotop Zr [3], isotop Pr [4] dan lainnya. Banyaknya laboratorium yang menyediakan data dari beberapa isotop itulah yang menjadi motivasi penelitian struktur nuklir seperti *pairing effect* masih tetap berlangsung. Namun pada paper ini efek *pairing* yang akan diteliti adalah efek *pairing* pada isotop ${}_{40}\text{Zr}$ dengan jumlah nukleon genap yaitu dari ${}_{40}\text{Zr}^{92}$ sampai dengan ${}_{40}\text{Zr}^{112}$. Perbedaan pendekatan dan model dalam menelaah efek *pairing* menjadi salah satu topik perbedaan dengan penelitian yang telah dilakukan oleh sebelumnya, terutama dengan penelitian [5] yang hanya meneliti efek *pairing* pada isotop ${}_{40}\text{Zr}^{100}$ dan ${}_{40}\text{Zr}^{102}$.

METODE PENELITIAN

Pendekatan model yang dapat digunakan untuk menjelaskan fenomena efek *pairing* ini mulanya menggunakan pendekatan terhadap fenomena superkonduktivitas dan superfluiditas yang dikemukakan oleh Bardeen, Cooper, dan Schrieffer yang dikenal dengan

teori BCS [6]. Penggunaan teori BCS dapat dikombinasikan dengan pemodelan inti Hartree-Fock-Bogolubov (HFB) [7] untuk menghitung besaran-besaran inti atom yang fundamental seperti energi dan ukuran inti atom.

Setelah banyaknya pengembangan pemodelan mengenai pemodelan efek *pairing* pada inti atom, dikarenakan interaksi pertukaran meson tidak dapat menggambarkan fenomena *pairing* pada inti atom, teori Relativistic Mean Field (RMF) biasanya dikombinasikan dengan model nonrelativistik *pairing* seperti teori BCS [8]. Sehingga pada paper ini kami menggunakan RMF+BCS yang dikerjakan secara terpisah alih-alih menggunakan model HFB+BCS.

Penggunaan RMF+BCS ini bukan hal baru dalam melihat efek *pairing* di dalam inti atom, bahkan beberapa peneliti telah menambahkan kombinasi RMF dalam deformasi dan efek *pairing* pada inti atom [9]. Pada paper ini, penggunaan RMF diperuntukkan menghitung besaran-besaran fundamental dari inti isotop Zr seperti energi *single* partikel tiap level, energi ikat total, ukuran inti, dan besaran lainnya.

Model RMF digambarkan dalam bentuk kerapatan Lagrangian \mathcal{L} . Pada pendekatan ini \mathcal{L} terdiri dari bagian nukleon, meson, interaksi antara nukleon-meson, interaksi meson-meson, elektromagnetik dan pertukarannya. Atau secara eksplisit dapat ditulis sebagai berikut:

$$\mathcal{L}_{RMF} = \mathcal{L}_N + \mathcal{L}_M + \mathcal{L}_{\omega}^{\sigma} + \mathcal{L}_{\rho}^{\sigma} + \mathcal{L}_T + \mathcal{L}_{\omega}^{\omega} + \mathcal{L}_{\rho}^{\omega} + \mathcal{L}_{exc}^{EM},$$

Tambahan faktor \mathcal{L}_{ω}^4 dan $\mathcal{L}_{\rho\omega}^4$ menunjukkan interaksi *self-coupling* meson ω dan interaksi *cross-coupling* antara meson ω dengan meson ρ dan \mathcal{L}_{exc}^{EM} yang merupakan pertukaran elektromagnetik [10]. Fungsi kerapatan tersebut kemudian diolah secara aljabar sehingga diperoleh fungsi energi [11].

Besaran yang dihasilkan dari pemodelan RMF akan digunakan dalam teori BCS untuk melihat fenomena *pairing*. Yaitu besaran energi *single* partikel untuk menganalisa perilaku neutron ketika penambahan atau pengisian level-level energi pada isotop Zr.

Adapun persamaan Hamiltonian untuk pada teori BCS sebagai berikut:

$$E = \langle BCS | H | BCS \rangle = 2 \sum_{s>0} \epsilon_s^0 v_s^2 + \sum_{s's'>0} V_{ss'} u_s v_{s'} u_{s'} v_{s'} + \sum_{s>0} V_{ss'} v_s^2 \quad (1)$$

dengan suku pertama mempersentasikan energi *single* partikel yang diperoleh dari perhitungan model RMF, sedangkan kedua suku selanjutnya adalah suku yang mempersentasikan *pairing* dengan potensial interaksi $V_{ss'}$.

Level yang digunakan fokus pada lima level terluar pada isotop Zr dengan *potensial* interaksi antar

level di set pada nilai 0.5 MeV. Level tersebut adalah $2d_{5/2} = -7.248$, $1g_{7/2} = -6.570$, $3s_{1/2} = -5.812$, $2d_{3/2} = -5.540$ dan $4s_{1/2} = -1.934$. Besaran yang digunakan untuk mengindikasikan fenomena *pairing* adalah *gap pairing* atau delta dengan satuan MeV sebagai berikut:

$$\Delta_s = \frac{1}{2} \sum_{s'>0} \frac{\Delta_{s'}}{\epsilon_{s'}} V_{ss'} \quad (2)$$

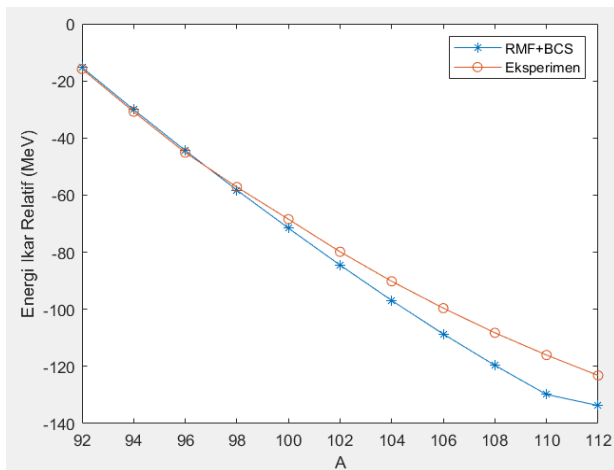
Hasil dari kedua pendekatan ini akan dianalisa untuk mengetahui efek *pairing* yang terjadi pada inti atom isotop Zr. Salah satu output yang dihasilkan dari model ini adalah energi ikat inti relatif terhadap ${}_{40}\text{Zr}^{90}$ yang dapat dibandingkan dengan hasil eksperimen. Relatif terhadap ${}_{40}\text{Zr}^{90}$ dikarenakan isotop tersebut dalam kondisi stabil [12] hal ini berkaitan dengan kondisi atom yang memenuhi *magic* number yang mengindikasikan inti dalam kondisi *closed shell*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Isotop Zr atau Zirconium adalah nuklida yang sampai saat ini menjadi objek penelitian di skala eksperimen laboratorium seperti yang dilakukan oleh Korean Atomic Energy Research Institution (KAERI). Pengembangan penelitian Zirconium tentu saja sangat berkontribusi terhadap kemajuan teknologi terutama di dunia logam dan pemanfaatan laser. Pada paper ini, besaran energi ikat inti relatif terhadap isotop ${}_{40}\text{Zr}^{90}$ yang akan dibandingkan dengan hasil eksperimen sebagai nilai pembandingan keakuratan data yang dihasilkan pemodelan RMF+BCS.

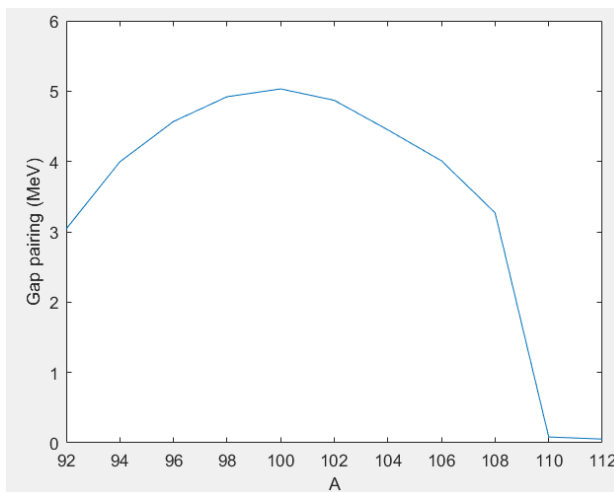
Tabel 1. Akurasi Hasil Perhitungan Energi Ikat Relatif

A	Energi Ikat Eksperimen (MeV)	Energi Ikat RMF+BCS (MeV)	Akurasi (%)
92	-15,8333	-15,2598	96,37785
94	-30,8008	-30,065	97,61114
96	-45,1369	-44,3867	98,3379
98	-57,1706	-58,2261	98,15386
100	-68,4529	-71,6041	95,39649
102	-79,8554	-84,5194	94,15943
104	-90,1923	-96,9192	92,54162
106	-99,5970	-108,6674	90,89286
108	-108,2327	-119,6361	89,46397
110	-116,0254	-129,8273	88,10443
112	-123,1661	-133,6984	91,4487



Gambar 1. Energi ikat relatif terhadap ${}_{40}\text{Zr}^{90}$.

Nilai A adalah nomor massa atau jumlah proton dan neutron pada isotop Zr. Berdasarkan Tabel 1, besaran akurasi terhadap besar energi ikat eksperimen berkisar 88% sampai 98%, sehingga cukup sesuai jika penggunaan interaksi potensial *uniform* 0.5 MeV sebagai alternatif gambaran bentuk interaksi antar level pada lima kulit terluar di inti atom Zr. Akurasi yang dihasilkan pun fluktuatif sehingga terlihat tidak bergantung pada jumlah massa (A) atau jumlah neutron yang ditambahkan. Hal ini cukup unik dikarenakan akurasi meningkat ketika menuju ${}_{40}\text{Zr}^{100}$ dan setelah itu akurasi berkurang dan kembali meningkat pada isotop ${}_{40}\text{Zr}^{112}$. Perbedaan energi ikat relatif ini juga direpresentasikan pada Gambar 1. Pada Gambar 1 terlihat bahwa perbedaan dengan nilai eksperimen membesar sampai isotop ${}_{40}\text{Zr}^{110}$ dan kembali mendekati nilai eksperimen pada isotop ${}_{40}\text{Zr}^{112}$.



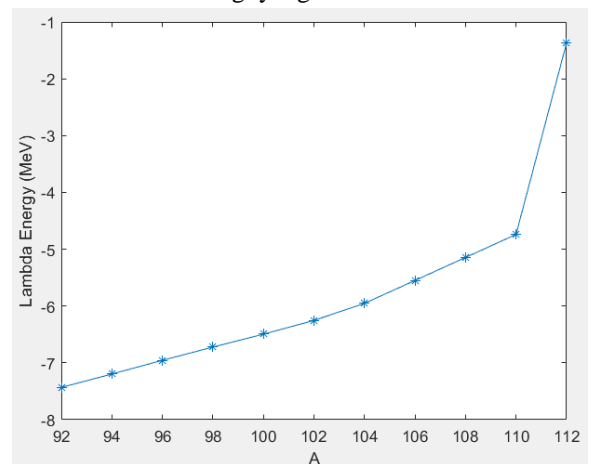
Gambar 2. Efek *pairing* pada isotop Zr.

Efek *pairing* terlihat pada Gambar 2, neutron yang ditambahkan pada saat pembentukan isotop berkumpul. Terlihat terdapat satu kumpulan besar yang menggambarkan keadaan interaksi efek *pairing* pada level $2d_{5/2} = -7.248$, $1g_{7/2} = -6.570$, $3s_{1/2} = -5.812$, $2d_{3/2} = -5.540$, dimana ke-4 level tersebut memiliki besar energi *single* partikelnya relatif berdekatan dibandingkan dengan level terluar yakni $4s_{1/2} = -1.934$. Sehingga terlihat

terdapat dua buah neutron yang terpisah dari sekumpulan neutron pada isotop ${}_{40}\text{Zr}^{112}$.

Penggunaan potensial interaksi *uniform* 0.5 MeV ternyata dapat digunakan sebagai salah satu alternatif cara dalam melihat efek *pairing* pada isotop Zr. Namun nilai potensial interaksi yang bersifat uniform atau seragam tentu saja kurang cukup mempresentasikan bentuk interaksi tiap level yang sesungguhnya terjadi.

Besaran lain yang dapat dihasilkan dari penggunaan model RMF+BCS ini adalah nilai lambda, atau energi yang diperlukan untuk “menciptakan” partikel. Lambda akan bervariasi terhadap konsisi state inti atom, penambahan neutron pada isotop yang kaya dengan neutron akan lebih besar dibandingkan pada isotop dengan jumlah neutron sedikit. Hal ini juga dapat terlihat pada Gambar 3. Penambahan neutron pada isotop ${}_{40}\text{Zr}^{112}$ memerlukan energi yang cukup besar dibanding dengan isotop sebelumnya. Keadaan ini mengartikan bahwa ‘penciptaan’ partikel yang tidak bergerombol membutuhkan nilai energi yang lebih besar.



Gambar 3. Lambda energi pada isotop Zr.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan pada bab sebelumnya, dapat disimpulkan bahwa efek *pairing* adalah fenomena kolektif yang membuat energi ikat inti menjadi semakin kecil atau semakin negatif. Penggunaan RMF+BCS dengan potensial interaksi uniform 0.5 MeV dapat menjadi salah satu alternatif cara untuk melihat efek *pairing* pada isotop Zr. Efek *pairing* pada isotop Zr memperlihatkan bahwa neutron yang ditambahkan dan menempati level $2d_{5/2}$, $1g_{7/2}$, $3s_{1/2}$ dan $2d_{3/2}$ akan membentuk sekumpulan dan penamhan dua neutron selanjutnya akan terpisah dari kumpulan tersebut dan menempati level $4s_{1/2}$.

Berdasarkan hasil penelitian, meskipun dengan nilai akurasi yang dihasilkan dengan pemodelan ini mencapai 98% untuk nilai energi ikat relatif terhadap eksperimen, untuk penelitian selanjutnya tetap diperlukan metode optimasi agar matriks interaksi yang digunakan tidak seragam dan sesuai dengan gambaran interaksi yang terjadi tiap levelnya.

REFERENSI

- [1] Bhattacharya, M, et al. 'Role of pairing interaction in neutron rich odd and even Zr nuclei', *Physical Review*, Vol 75, No. 017301, 2007.
- [2] Nugraha, A.M. 'Efek *Pairing* pada Isotop Sn ($N > 82$) dalam Teori BCS Menggunakan Sembilan Tingkat Energi', *Faktor Exacta*, Vol 10, No 2, Hal: 101-110, 2017.
- [3] Urban, W., Varley, B. J., & Schulz, N. *isotopes of Zr*. 52(5), 2306–2309, 1995
- [4] Li, J., Li, J., Li, J., Ma, Z., Ma, Z., Ma, Z., Zhou, Y. 'Ground-state and pairing properties of Pr isotopes in relativistic mean-field theory'. *Physical Review C - Nuclear Physics*, 65(6), 643051–643055, 2002.
- [5] J.L.Durell, et al. 'Pairing strength in neutron-rich isotopes of Zr', *Physical Review C*, Vo 52, No 5, 1995.
- [6] Bardeen, L. N. Cooper, and J. R. Schrieffer. 'Microscopic Theory of Superconductivity', *Phys. Rev.* 106: 162-164, 1957.
- [7] Sandulescu, N, et al. 'Isovector neutron-proton pairing with particle number projected BCS', *Physical Review C*, Vol 80, No. 044335, 2009.
- [8] Sandulescu, N, et al. 'Pairing correlations and resonant states in the relativistic mean field theory', *Physical Review C*, Vol 68, No. 054323, 2003.
- [9] Geng, Lisheng, et al. 'Relativistic Mean Field Theory for Deformed Nuclei with Pairing Correlations', *Progress of Theoretical Physics*, Vol 110, No 5, 2003.
- [10] A. Sulaksono, *Electromagnetic and Isovector Terms in Standard Relativistic Mean Field Models*, *Int. Journal of Modern Phys. E*. Vol 20, No. 9, 2011.
- [11] Liliani, et al. 'Impacts of the tensor couplings of omega and rho mesons and Coulomb-exchange terms on supe-rheavy nucleiand their relation to the symmetry energy', *Physical review C*, Vol 93, No. 054322, May 2016.
- [12] Pauwels, D. et al. 'Pairing-excitation versus intruder states in ^{68}Ni and ^{90}Zr ', *Physical review C*, Vol 82, No 027304, 2010.