

EFEK PAIRING PADA ISOTOP Sn ($N > 82$) DALAM TEORI BCS MENGGUNAKAN SEMBILAN TINGKAT ENERGI

ALPI MAHISHA NUGRAHA

alpi.mahisha@gmail.com

Program Studi Teknik Informatika,
Fakultas Teknik, Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Indraprasta PGRI

Abstrak. Pembentukan isotop Sn yang kaya dengan neutron menjadi salah satu topik yang menarik di bidang reaksi inti, terutama mengenai kestabilan pada inti berat tersebut. Perhitungan besar energi total dengan menggunakan pendekatan teori BCS dan pemodelan inti berupa lima level energi, hanya dapat menghitung besar energi total dengan efek kolektif berupa efek *pairing* hingga isotop $^{132}_{50}\text{Sn}$ atau isotop Sn dengan jumlah neutron 82. Di sisi lain, eksperimen terus berlanjut dan telah melebihi pembentukan isotop tersebut. Oleh karena itu, diperlukan pemodelan yang dapat menampung neutron lebih banyak, dalam penelitian ini digunakan pemodelan inti berupa sembilan tingkat energi dengan potensial interaksi konstan untuk menjelaskan fenomena *pairing* hingga $^{154}_{50}\text{Sn}$. Namun dari segi akurasi diperlukan metode lain agar perbedaan dengan hasil eksperimen menjadi lebih kecil.

Kata kunci : fenomena *pairing*, isotop Sn, teori BCS, model sembilan tingkat energi.

PENDAHULUAN

Pengembangan ilmu pengetahuan di bidang reaksi inti menjadi topik eksperimen yang menarik selama beberapa dekade belakangan ini. Reaksi yang mencakup interaksi antara proton-neutron di dalam inti sering kali memperlihatkan fenomena yang sulit dijelaskan dengan teori yang sudah ada sebelumnya. Sejauh ini, perilaku proton-neutron di dalam inti dimodelkan seperti halnya elektron yang mengorbit inti atom dengan tingkatan energi yang berbeda. Teori ini dikenal dengan model inti kulit (Beiser, 1982 : 122). Salah satu reaksi inti yang menarik adalah reaksi yang melibatkan perubahan jumlah neutron dengan mempertahankan jumlah proton di dalam inti yang disebut dengan isotop (S. Krane, 1982 : 4). Sesuai dengan model inti kulit, neutron yang ditambahkan ke dalam inti akan menempati tingkat energi tertentu. Keadaan ini akan mempengaruhi besar energi total inti dari isotop tersebut.

Salah satu institusi yang saat ini masih melakukan eksperimen mengenai reaksi tersebut adalah *Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI)*. Institusi tersebut melakukan eksperimen mengenai isotop dengan berbagai macam isotop, terutama pada isotop yang memiliki kestabilan inti yang tinggi seperti $^{100}_{50}\text{Sn}$ (Tin). Kestabilan yang tinggi ini diakibatkan karena jumlah proton dan neutron pada $^{100}_{50}\text{Sn}$ sama dan keduanya merupakan bilangan ajaib atau *magic number*. Isotop Sn yang telah dibuat manusia saat ini telah mencapai isotop $^{138}_{50}\text{Sn}$ dan akan terus bertambah di tahun-tahun mendatang. Dalam melakukan eksperimen pembentukan suatu isotop, para peneliti terlebih dahulu memperkirakan besar energi total berdasarkan model-model inti yang ada. Perkiraan energi total dapat menggambarkan energi yang dibutuhkan dalam pembentukan isotop yang dimaksud.

Penyelesaian masalah berupa perhitungan energi total diperlukan suatu teori yang dapat menjelaskan interaksi yang melibatkan banyak partikel dan efek kolektifitas, seperti fenomena *pairing* atau pasangan yang terjadi pada reaksi inti. Pendekatan standar yang digunakan untuk menjelaskan fenomena berupa superkonduktivitas atau superfluiditas adalah teori BCS yang dikemukakan oleh Bardeen, Cooper, dan Schrieffer (Bardeen, 1957:162-164). Teori ini mula-mula diaplikasikan pada zat padat untuk menjelaskan fenomena superkonduktivitas pada logam. Namun seiring dengan perkembangan zaman, ternyata teori ini dapat digunakan untuk menyelesaikan permasalahan pasangan pada partikel *fermion* apa saja, termasuk untuk neutron maupun proton pada inti atom. Perhitungan energi total isotop Sn dengan teori ini telah dilakukan oleh peneliti sebelumnya (Andreozzi, 1996:253-260) dengan pemodelan inti kulit yang terdiri dari lima tingkat energi. Sayangnya dengan pemodelan seperti ini, batas maksimal terhadap perhitungan energi total isotop Sn hanya mampu menjelaskan dari isotop $^{106}_{50}\text{Sn}$ hingga isotop $^{132}_{50}\text{Sn}$. Disisi lain, eksperimen terhadap isotop Sn saat ini telah melebihi isotop tersebut. Oleh karena itu, diperlukan pemodelan baru yang dapat menjelaskan fenomena pasangan pada isotop Sn yang melebihi $^{132}_{50}\text{Sn}$.

Fenomena *Pairing* di Dalam Inti

Keberadaan pasangan dua partikel *fermion* seperti neutron dan proton pada tingkat energi yang sama di dalam inti mengakibatkan energi total sistemnya menjadi lebih rendah, fenomena inilah yang disebut dengan fenomena *pairing* di dalam inti (Brink DM, 2005:14-15). *Pairing* merupakan fenomena kolektif berupa interaksi yang melibatkan banyak partikel yang berada pada berbagai tingkat energi.

Tidak semua interaksi inti merupakan fenomena *pairing*, karena fenomena *pairing* memiliki syarat tertentu. *Pairing* terjadi jika terdapat harmonisasi dua partikel, dua partikel yang dimaksud adalah partikel yang memiliki spin tengahan atau partikel *fermion*. Momentum angular total dari dua buah fermion yang berpasangan akan bernilai nol dan berperilaku seperti partikel boson. Karena hal inilah fenomena *pairing* memperlihatkan gejala-gejala unik di dalam inti seperti superkonduktivitas dan superfluiditas di dalam inti. Fenomena *pairing* terjadi pada sistem dengan kerapatan massa atau keadaan yang sangat tinggi. Contoh ekstrimnya berupa bintang neutron, bintang neutron dapat digambarkan sebagai sebuah objek yang memiliki massa yang sama dengan matahari namun diameternya hanya 10 km.

Teori BCS

Teori fenomena kolektif yang melibatkan sejumlah partikel di dalam inti antara lain dipelopori oleh Bardeen, Cooper, dan Schrieffer pada tahun 1957 silam, teori ini dikenal dengan teori BCS (Bardeen, 1957:162-164). Teori BCS mempersentasikan bagaimana fungsi gelombang dan tingkat energi tertentu dalam pemodelan kulit inti dengan memperhitungkan dampak fenomena *pairing*, sebagai faktor yang mempengaruhi perubahan energi total sistem menjadi lebih kecil. Teori BCS menggambarkan fenomena interaksi *pairing* yang muncul akibat adanya interaksi antara dua partikel pada keadaan waktu yang saling konjugat (s, s'). Hubungan antara partikel yang satu dengan partikel lain digambarkan oleh matriks interaksi $V_{ss'}$ yang menyatakan perubahan keadaan akibat interaksi yang semula berada pada (s', \hat{s}') dan berakhir di keadaan (s, \hat{s}), dengan bentuk persamaan Hamiltonian berupa :

$$H = \sum_s \varepsilon_s n_s + \sum_{ss' > 0} V_{ss'} p_s^* p_{s'} \dots\dots\dots (1)$$

besar energi pun menjadi

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

dengan p_s^*, p_s merupakan operator yang menggambarkan pembentukan dan pemusnahan partikel. Berdasarkan penurunan persamaan energi gap menurut teori BCS diperoleh celah *pairing* tiap level Δ_s (Greiner, 1996: 127) , yaitu :

$$\Delta_s = \frac{1}{2} \sum_{s'>0} \frac{\Delta_{s'}}{\epsilon_{s'}} V_{ss'} \dots\dots\dots (3)$$

Dampak *Pairing* pada Isotop Sn

Isotop suatu unsur dapat terjadi secara alamiah ataupun buatan sebagai hasil reaksi yang terjadi pada inti, isotop Sn telah lama menjadi subjek eksperimen di dalam reaksi nuklir (L. Aissaoui, 2009:39). Hal ini ditunjang karena Sn dapat menyediakan keadaan dengan pengisian atau penambahan neutron yang banyak. Sampai saat ini isotop Sn telah mencapai isotop $^{136}_{50}\text{Sn}$ dengan kondisi state *closing mass*-nya adalah $^{100}_{50}\text{Sn}$, artinya 36 neutron telah berhasil ditambahkan pada isotop $^{100}_{50}\text{Sn}$ dan tidak menutup kemungkinan jumlah neutron yang ditambahkan berhenti pada jumlah tersebut, mengingat eksperimen mengenai isotop Sn masih dilakukan.

Pembentukan isotop Sn yang terjadi mengakibatkan inti isotop Sn kaya akan partikel neutron (Sumaryada, 2007). Penambahan neutron pada isotop Sn akan menimbulkan keadaan-keadaan baru pada bagian permukaan inti isotop. Keadaan-keadaan ini dimodelkan dengan pemodelan lima tingkat energi dengan orbit $g_{1/2}, d_{5/2}, d_{3/2}, s_{1/2}$, dan $h_{11/2}$. Dengan pemodelan ini dan aproksimasi menggunakan teori BCS akan menunjukkan pengaruh fenomena *pairing* terhadap isotop Sn dengan penambahan jumlah neutron tertentu. Pada pemodelan lima tingkat energi, orbit tingkat energi adalah g, d, s, dan h sedangkan nilai 1/2, 5/2, 3/2, dan 11/2 adalah j, jumlah maksimal neutron yang dapat ditambahkan pada orbit adalah $2j + 1$.

Implikasi dari pemodelan lima tingkat energi ini hanya dapat menjelaskan pertambahan neutron sampai isotop $^{132}_{50}\text{Sn}$. Berdasarkan teori BCS yang mempresentasikan hubungan akibat fenomena *pairing* diimplementasikan pada matriks $V_{ss'}$ dengan kata lain matriks $V_{ss'}$ merupakan implementasi dari akumulasi kekuatan interaksi antar tingkat energi yang terjadi di dalam inti.

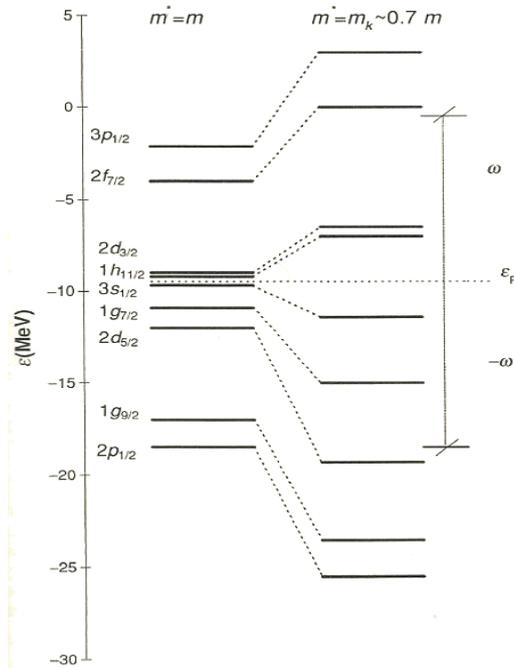
$$V_{ss'} = \begin{bmatrix} -1.4738 & -0.6955 & -0.6713 & -0.3162 & 1.3052 \\ -0.6955 & -0.8843 & -1.0428 & -0.4368 & 1.0027 \\ -0.6713 & -1.0428 & -0.5160 & -0.4503 & 0.5128 \\ -0.3162 & -0.4368 & -0.4503 & -0.8466 & 0.3700 \\ 1.3052 & 1.0027 & 0.5128 & 0.3700 & -1.2305 \end{bmatrix}$$

Matriks $V_{ss'}$ diatas digunakan dalam perhitungan energi total inti pada pemodelan lima tingkat energi yang dilakukan oleh penelitian sebelumnya.

Pemodelan Sembilan Tingkat Energi

Pemodelan isotop Sn yang melebihi dari $^{132}_{50}\text{Sn}$ tidak dimungkinkan dalam pemodelan lima tingkat energi, sehingga diperlukan pemodelan lain yang dapat menampung kelebihan neutron yang diberikan. Pada penelitian ini digunakan pemodelan sembilan tingkat energi yang terinspirasi dari pemodelan tingkat energi berbasis potensial Saxon-woods (Brink DM, 2005 :14-15) yang mampu menampung hingga 54 neutron

($^{154}_{50}\text{Sn}$), sembilan tingkat energi tersebut berupa orbit $2p_{1/2}$, $1g_{9/2}$, $2d_{5/2}$, $1g_{7/2}$, $3s_{1/2}$, $1h_{11/2}$, $2d_{3/2}$, $2f_{7/2}$, dan $3p_{1/2}$.



Gambar 1. Pemodelan sembilan tingkat energi (Brink DM, 2005 :14-15)

METODE

Berdasarkan tujuan yang diinginkan, metode penelitian berupa simulasi mengenai perhitungan energi total isotop Sn dengan menggunakan teori BCS. Pada penelitian ini digunakan pemodelan sembilan tingkat energi yang telah disesuaikan dengan perhitungan BCS. Penyesuaian yang dimaksud adalah parameter-parameter yang dibutuhkan dalam perhitungan menggunakan teori BCS telah disesuaikan dengan pemodelan sembilan tingkat energi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Paramater Input dan Output pada Perhitungan

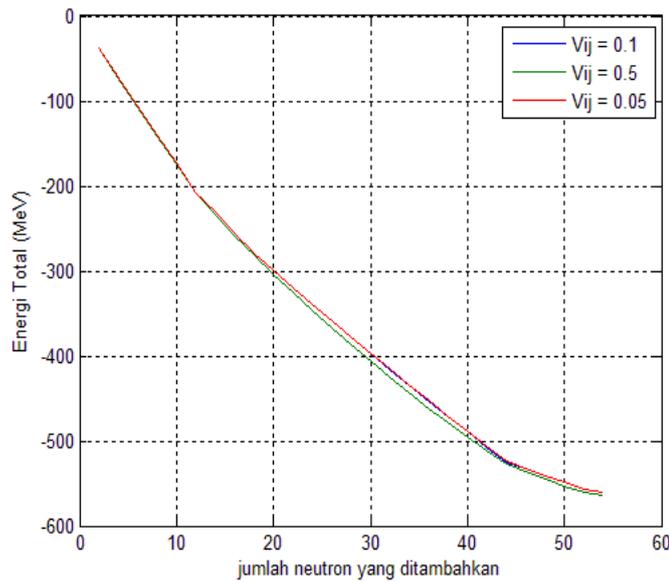
Selama perhitungan besar energi total diperlukan parameter input berupa jumlah neutron yang akan ditambahkan ke dalam isotop Sn, jelas pada pemodelan sembilan tingkat energi ini jumlah neutron yang ditambahkan hanya bernilai 2 sampai 54 partikel. Energi pembentukan satu partikel dari vakum atau yang disebut dengan potensial kimia merupakan salah satu parameter input yang dibutuhkan dalam perhitungan, potensial kimia pada perhitungan berupa rentang nilai energi. Dalam perhitungan penggunaan asumsi berupa $V_{SS'}$ bernilai konstan, hal ini berarti bahwa interaksi yang terjadi antara tingkat energi yang satu dengan tingkat energi bernilai sama. Besar nilai $V_{SS'}$ digolongkan menjadi dua bagian, bagian $V_{SS'}$ yang bernilai kecil, yaitu $V_{SS'} = 0.05$ MeV, 0.10 MeV, dan 0.50 MeV. Serta bagian $V_{SS'}$ yang bernilai besar, yaitu $V_{SS'} = 1.00$ MeV, 2.00 MeV, dan 5.00 MeV.

Sedangkan output dari perhitungan tidak hanya besar energi total inti, salah satunya adalah energi partikel tunggal, besar energi ini merupakan energi yang menunjukkan keadaan sistem dalam keadaan normal, artinya keadaan ini tidak mempengaruhi dampak *pairing* sebagai faktor koreksi besar energi total sistem,

perbedaan akibat *pairing* ini diimplementasikan sebagai celah *pairing* pada output perhitungan. Output lainnya berupa besar potensial kimia yang digunakan pada perhitungan dan *occupation number* atau kemungkinan keberadaan partikel neutron di masing-masing tingkat energi. Pada output perhitungan besar energi total berupa nilai energi relatif terhadap $^{124}_{50}\text{Sn}$, hal ini dikarenakan energi total $^{124}_{50}\text{Sn}$ dari hasil eksperimen memiliki nilai kesalahan yang paling kecil.

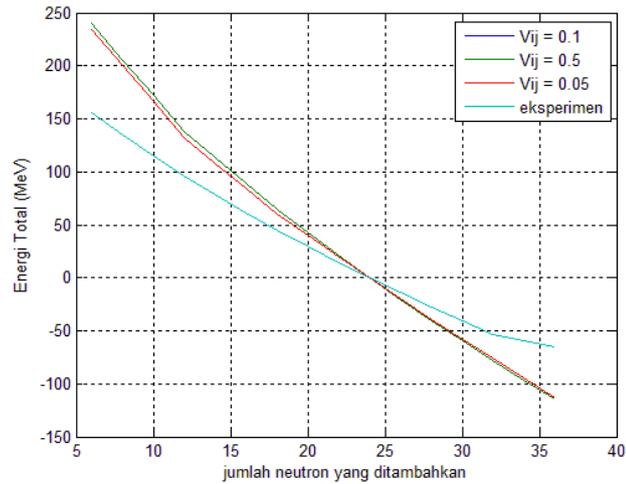
Output Perhitungan dengan $V_{SS'}$ Bernilai Kecil

Variasi pada perhitungan ini adalah penggunaan matriks $V_{SS'}$ yang bernilai kecil, hasil energi total dapat dilihat dari Gambar 2. Nilai V_{ij} yang dimaksud dalam gambar adalah nilai $V_{SS'}$. Semakin besar jumlah neutron yang ditambahkan ke dalam inti Sn, energi total sistem semakin besar juga.



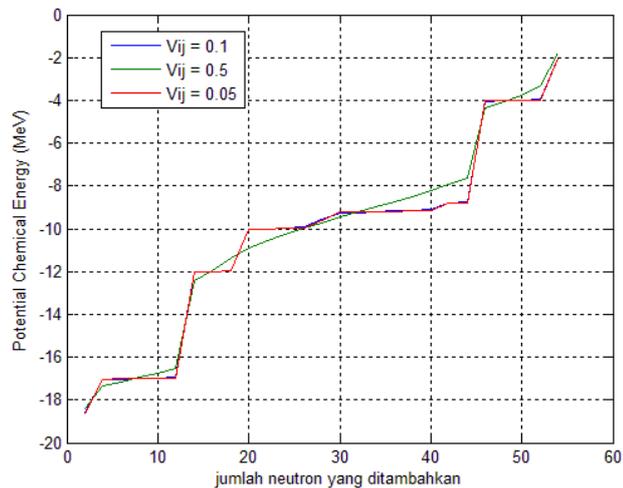
Gambar 2. Hubungan antara jumlah neutron yang ditambahkan dengan energi total inti pada $V_{SS'}$ bernilai kecil dari $^{102}_{50}\text{Sn}$ sampai dengan $^{154}_{50}\text{Sn}$

Hasil perhitungan besar energi total baik menggunakan $V_{SS'}$ yang bernilai 0.05 MeV, 0.10 MeV maupun 0.50 MeV masih memperlihatkan perbedaan dengan hasil eksperimen, perbedaan tersebut terlihat pada gambar 3. Se jauh ini perbedaan yang paling kecil dengan eksperimen adalah perhitungan dengan menggunakan $V_{SS'} = 0.05$ MeV.



Gambar 3. Hubungan antara jumlah neutron yang ditambahkan dengan energi total inti pada $V_{ss'}$ bernilai kecil $^{106}_{50}\text{Sn}$ sampai dengan $^{136}_{50}\text{Sn}$

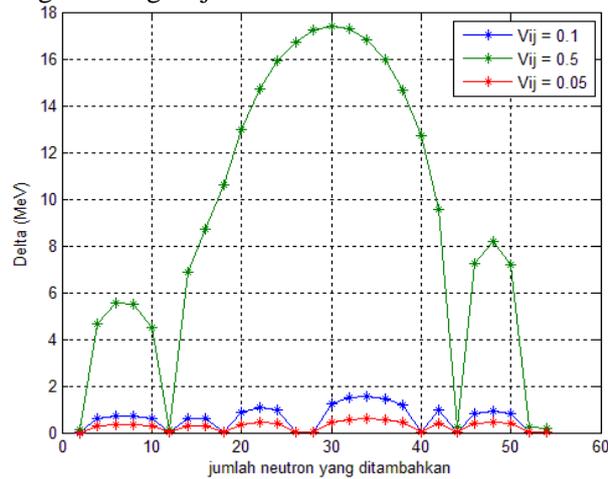
Penggunaan variasi $V_{ss'}$ yang bernilai kecil tidak terlalu memperlihatkan perbedaan yang signifikan terhadap perhitungan besar energi total. Namun hasil yang berbeda pada output potensial kimia. Perbedaan tersebut cukup terlihat pada Gambar 4 antara output potensial kimia dengan perhitungan menggunakan $V_{ss'}$ bernilai 0.50 MeV dengan $V_{ss'}$ yang bernilai 0.10 MeV ataupun 0.05 MeV.



Gambar 4. Hubungan antara jumlah neutron yang ditambahkan dengan potensial kimia pada $V_{ss'}$ kecil

Potensial kimia dengan menggunakan $V_{ss'}$ bernilai 0.10 MeV atau 0.05 MeV menghasilkan pola kurva yang hampir berimpit, terdapat enam buah tangga sepanjang kurva. Sedangkan pada $V_{ss'}$ bernilai 0.50 MeV, tangga yang terbentuk sepanjang kurva hanya tiga buah. Tangga-tangga ini mempersentasikan perilaku-perilaku partikel pada

tiap tingkat energi, misalnya enam buah tangga yang terbentuk mengartikan bahwa partikel berkumpul seolah-olah hanya membentuk enam tingkat energi saja dikarenakan perbedaan energi antara satu tingkat dengan tingkat yang lain tidak terlalu besar. Begitu juga pada penggunaan $V_{SS'}'$ bernilai 0.50 MeV, karena besar interaksi akibat *pairing* cukup besar sehingga partikel seolah-olah hanya membentuk tiga tingkat energi saja, hal ini terlihat jelas pada Gambar 5 dimana pemodelan sembilan tingkat energi dapat dianggap menjadi tiga tingkat energi saja.

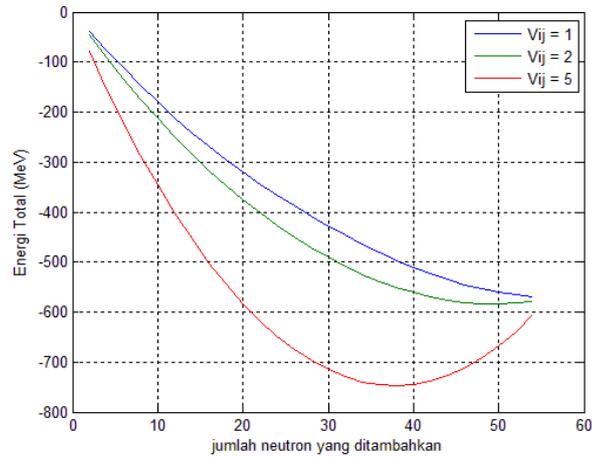


Gambar 5. Hubungan antara jumlah neutron yang ditambahkan dengan celah *pairing* pada $V_{SS'}'$ kecil

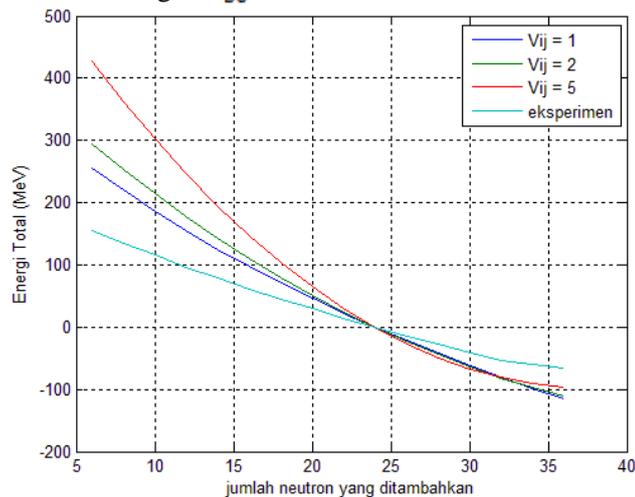
Pembentukan enam atau pun tiga tingkat energi juga terlihat pada output celah *pairing*. Puncak-puncak pada Gambar 5 mempresentasikan perilaku yang sama yang ditunjukkan oleh Gambar 4, jumlah puncak pada Gambar 5 ini lah yang memperlihatkan secara jelas bahwa pada perhitungan dengan penggunaan $V_{SS'}'$ yang bernilai 0.50 MeV akan terbentuk seolah tingkat energinya hanya ada tiga. Sedangkan pada $V_{SS'}'$ kecil lainnya tingkat energi yang terbentuk berupa enam tingkat energi saja.

Output Perhitungan dengan $V_{SS'}'$ Bernilai Besar

Penggunaan $V_{SS'}'$ bernilai besar menganggap bahwa interaksi yang terjadi akibat *pairing* cukup besar, akibatnya output dari perhitungan menunjukkan perbedaan. Hasil perhitungan besar energi total dapat dilihat pada Gambar 6. Pada $V_{SS'}' = 5.00$ MeV memperlihatkan adanya perubahan kelungkgungan dari kurva, sepanjang jumlah neutron yang ditambahkan lebih besar dari 32 mengakibatkan energi total menjadi lebih besar. Hal ini mengartikan bahwa ketika interaksi antar tingkat energi besar, semakin banyak jumlah partikel neutron yang ditambahkan pada inti Sn, maka dampak *pairing* terhadap perubahan energi total inti menjadi melemah.



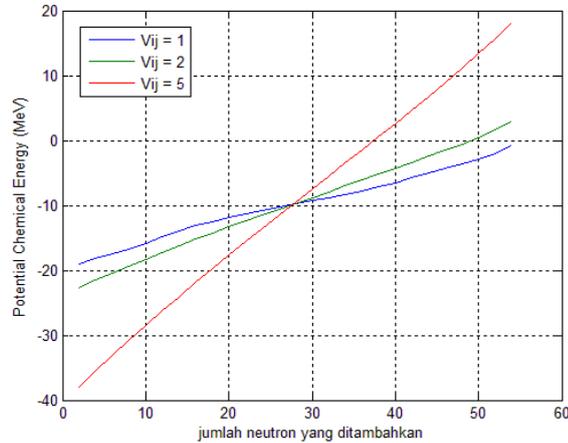
Gambar 6. Hubungan antara jumlah neutron yang ditambahkan dengan energi total inti pada $V_{ss'}$ bernilai besar dari $^{102}_{50}\text{Sn}$ sampai dengan $^{154}_{50}\text{Sn}$



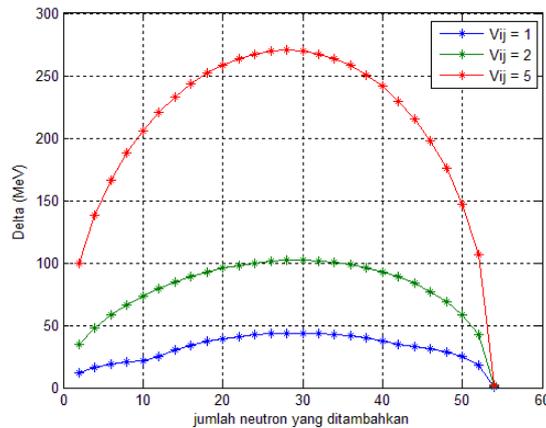
Gambar 7. Hubungan antara jumlah neutron yang ditambahkan dengan energi total inti pada $V_{ss'}$ bernilai besar $^{106}_{50}\text{Sn}$ sampai dengan $^{136}_{50}\text{Sn}$

Sama halnya dengan $V_{ss'}$ bernilai kecil, pada perhitungan besar energi total dengan $V_{ss'}$ bernilai besar masih ada perbedaan dengan hasil eksperimen yang terlihat pada Gambar 7. Hasil perhitungan besar energi total dengan menggunakan $V_{ss'}$ bernilai 1.00 MeV dan 2.00 MeV menghasilkan perbedaan yang kecil dengan eksperimen pada daerah isotop $^{106}_{50}\text{Sn}$ sampai dengan $^{132}_{50}\text{Sn}$. Namun pada isotop $^{134}_{50}\text{Sn}$ dan $^{136}_{50}\text{Sn}$, $V_{ss'}$ bernilai 5.00 MeV lah yang menghasilkan perbedaan yang paling kecil terhadap eksperimen. Hal ini menunjukkan bahwa pada $^{106}_{50}\text{Sn}$ sampai dengan $^{132}_{50}\text{Sn}$, potensial interaksi dengan nilai kecil lebih cocok untuk menjelaskan fenomena *pairing* pada keadaan jumlah neutron yang ditambahkan sampai 32 partikel. Sedangkan potensial interaksi dengan nilai besar lah yang lebih cocok jika neutron yang ditambahkan lebih besar dari 32.

Penggunaan $V_{ss'}$ bernilai besar membuat partikel yang seharusnya terlihat sembilan tingkat energi seolah-olah menjadi satu kesatuan. Hal ini ditunjukkan dengan bentuk kurva potensial kimia yang linear dan kurva celah *pairing* yang hanya memiliki satu puncak saja seperti yang terlihat pada Gambar 8 dan Gambar 9.



Gambar 8. Hubungan antara jumlah neutron yang ditambahkan dengan potensial kimia pada $V_{ss'}$ besar



Gambar 9. Hubungan antara jumlah neutron yang ditambahkan dengan celah *pairing* pada $V_{ss'}$ besar

Besar potensial kimia pada umumnya bernilai negatif, namun pada perhitungan dengan $V_{ss'}$ bernilai 2.00 MeV dan 5.00 MeV terdapat potensial kimia yang bernilai positif. Hal ini berarti sistem tidak perlu lagi mengambil energi dari vakum untuk menciptakan satu partikel, melainkan melepas energi yang dimiliki sistem untuk menstabilkan jumlah partikel yang sesuai.

Dari keseluruhan variasi $V_{ss'}$ yang paling mendekati hasil eksperimen adalah $V_{ss'}$ yang bernilai konstan 0.05 MeV. Sayangnya, hasil perhitungan ini tidak lebih baik dari penggunaan pemodelan lima tingkat energi. Oleh karena itu, untuk meningkatkan akurasi diperlukan metode lain dalam menentukan $V_{ss'}$.

PENUTUP

Simpulan

Fenomena *pairing* di dalam inti mengakibatkan energi total inti semakin kecil dibanding dengan keadaan normalnya, dampak *pairing* ini merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi kestabilan pada inti berat. Penggunaan pemodelan sembilan tingkat energi dengan asumsi interaksi antar tingkat energi bernilai sama dapat menghasilkan perhitungan besar energi total hingga isotop $^{154}_{50}\text{Sn}$, meskipun output yang dihasilkan masih berbeda dengan eksperimen. Dengan memvariasikan besar V_{SSI} dan melihat perbedaan hasil perhitungan tiap variasi V_{SSI} tersebut, ternyata untuk rentang jumlah neutron yang ditambahkan kurang dari 32 potensial interaksi yang cocok adalah V_{SSI} yang bernilai kecil. Sebaliknya untuk jumlah neutron yang ditambahkan melebihi 32 partikel, maka potensial interaksi yang cocok justru yang bernilai besar.

Saran

Adanya perbedaan antara besar energi total dari hasil eksperimen dengan hasil perhitungan dengan pemodelan sembilan tingkat energi menjadi permasalahan yang belum terselesaikan. Penggunaan asumsi potensial interaksi bernilai konstan pun belum cukup menggambarkan perilaku partikel neutron yang sebenarnya di dalam inti, oleh karena itu potensial interaksi berupa matriks V_{SSI} perlu dicari dengan pendekatan lain, seperti menggunakan metode optimasi. Penggunaan metode ini diharapkan dapat memperkecil perbedaan perhitungan energi ikat dengan hasil eksperimen.

DAFTAR PUSTAKA

- Bardeen, L. N. Cooper, and J. R. Schrieffer. (1957). **Microscopic Theory of Superconductivity**. Phys. Rev. 106 : 162-164.
- Beiser, Arthur. (1982). **Konsep Fisika Modern**. The Houw Liong. penerjemah; Carol Manik. editor. Jakarta:Erlangga. Terjemahan dari: *Concepts of Modern Physics, 3rd Edition*. Hlm : 122.
- Brink DM, Broglia RA. (2005). **Nuclear Superfluidity Pairing in Finite Systems**. New York: Cambridge University Press. Hlm : 14-15.
- F. Andreozzi, L. Coraggio, A. Covello, A. Gorgano, dan A. Porrino. (1996). **Pairing effects in Sn Isotopes**, Z. Phys. A 354, 253-260
- Greiner W, Maruhn JA. (1996). **Nuclear Models**. Springer. New York. Hlm : 127.
- L. Aissaoui, F. Berrachi, dan D. Boumala. (2009). **Pairing Gap Energy Correction in Shell Model for the Neutron-Rich Tin Isotopes**. Brazilizn Journal of physics (4) : 39.
- S. Krane, Kenneth. (1982). **Fisika Modern**. Hans JW .penerjemah; Sofia Niksolihin. editor. Jakarta : UI Press. Terjemahan dari: *Modern Physics*. Hlm : 4.
- Sumaryada, Tony Ibnu. (2007). **Pairing Correlations and Phase Transitions in Mesoscopic Systems**. [disertasi]. Florida, USA : The Florida State University.