

OPTIMASI PARAMETER POTENSIAL NUKLIR BAGI REAKSI FUSI ANTAR INTI-INTI BERAT

Viska Inda Variani¹, Vivin Fitrya Ningsih¹, Muhammad Zamrun F.¹,

¹Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Haluoleo, Kampus Bumi Tridharma Anduonohu, Kendari, Sulawesi Tenggara
e-mail : viskadhani@yahoo.co.id

Abstrak

Research and manufacture of optimum nuclear potential parameter optimization program for fusion reactions between heavy cores has been successfully made using Wong formula approach which is supported by Borland Delphi 7.0 visual programming language. The study was conducted specifically on the $^{16}\text{O} + ^{70,72,74,76}\text{Ge}$ system by varying the value of the diversity parameter (a) and setting the depth parameter value (V_0) and the radius (r_0) parameter of six data. The three parameters must be set so as to produce the same V_B value with the reference V_B value. The resulting cross-sectional value of each input data has a different level of accuracy for the energy above V_B . The results of cross-sectional calculations are then compared with the experimental results data. The Chi Square values of each cross-sectional data are interpolated with the input value a to produce a parabolic graph. The minimum peak of the graph represents an optimum value with the lowest Chi Square that can be used to determine the cross-sectional value of the fusion reaction closest to the experimental data.

Keywords: nuclear fusion reaction, Wong formula, cross-reaction, heavy core, Chi Square, interpolation.

1. Pendahuluan

Reaksi fusi nuklir merupakan reaksi penggabungan dua inti atom (inti target dan inti proyektil) menjadi inti atom baru yang lebih berat dengan melepaskan energi atau menyerap energi [1]. Pada inti-inti berat yang terbentuk memiliki neutron lebih banyak dari proton, agar memberikan gaya ikat nuklir lebih kuat dari gaya tolak menolak Coulomb, sehingga inti yang terbentuk tidak pecah [2]. Proses reaksi nuklir terbentuk dari dua potensial yaitu potensial Coulomb dan potensial inti. Gabungan kedua potensial tersebut akan membentuk tanggul potensial yang memiliki puncak maksimum dimana daerah puncak grafik potensial tersebut dikenal tanggul Coulomb. Koordinat puncak maksimum untuk ordinat menyatakan nilai tanggul potensial (V_B) dan absis menyatakan nilai jarak tanggul (R_B).

Penelitian mengenai reaksi nuklir ini telah banyak dilakukan dengan penggunaan metode yang berbeda-beda. Salah satunya adalah dengan menggunakan metode pendekatan formula Wong untuk menghitung nilai tampang lintang reaksi fusi (σ). Tampang lintang reaksi fusi merupakan parameter yang sangat penting untuk terus diteliti dalam studi reaksi fusi yang melibatkan inti berat. Dimana tampang lintang reaksi fusi adalah ukuran probabilitas inti atom proyektil

menembus tanggul potensial inti atom target. Formula Wong untuk menghitung tampang lintang reaksi nuklir adalah sebagai berikut [3].

$$\sigma_r(E) = \left(\frac{R_0^2 \hbar \omega_0}{2E} \right) \ln \left\{ 1 + \exp \left[\frac{2\pi(E - E_0)}{\hbar \omega_0} \right] \right\} \quad (1)$$

Interaksi nuklir antara dua buah inti yang bereaksi bisa didekati dengan potensial yang berbentuk Woods-Saxon :

$$V_N(r) = \frac{-V_0}{1 + \exp \left[(r - R_0)/a \right]}, \quad (2)$$

dengan V_0 adalah parameter kedalaman, r adalah jarak antar inti dan a merupakan parameter kedifusian, sedangkan R_0 adalah total jari-jari dua buah inti yang bereaksi yang diberikan sebagai:

$$R_0 = r_0 (A_P^{1/3} + A_T^{1/3}) \quad (3)$$

A_P dan A_T adalah massa inti proyektil dan massa inti target, serta r_0 adalah parameter radius dari potensial inti. Parameter-parameter potensial nuklir tersebut

secara teknologi dapat diatur sehingga data eksperimen dapat dijelaskan dengan baik. Besar parameter tersebut bukan harga yang pasti tetapi merupakan variasi terhadap energi penembak dan nomor massa inti target [4].

Pada penelitian ini, telah dilakukan optimasi parameter potensial inti dalam perhitungan nilai tampang lintang reaksi fusi untuk beberapa sistem, yakni $^{16}\text{O}+^{70,72}\text{Ge}$. Perhitungan dilakukan dengan menggunakan program metode pendekatan formula Wong. Hasil perhitungan tampang lintang reaksi fusi tersebut dibandingkan dengan data hasil eksperimen peneliti pada *website* NRV milik *Russian Foundation for Basic Research* [5].

2. Metode Penelitian

a. Proses Optimasi Untuk Sebuah Sistem

Pada penelitiannya, Justina (2016) dan Napirah (2016) membuat suatu program penghitung tampang lintang reaksi fusi sebagai fungsi energi bombardir, yakni $\sigma(E)$ [6][7]. Kedua penelitian tersebut menggunakan nilai parameter kedifusian yang sama yaitu $0,63 \text{ fm}$. Pada penelitian ini, program milik Napirah (2016) dikembangkan dengan menambahkan beberapa fitur untuk keperluan optimasi sehingga metode pendekatan formula Wong dapat menjelaskan data eksperimen lebih akurat. Optimasi tersebut dilakukan dengan memvariasikan nilai parameter kedifusian (a) dalam perhitungan potensial total, selanjutnya parameter kedalaman dan parameter radius dapat diatur sedemikian sehingga nilai puncak tanggul potensial (V_B) sama dengan nilai V_B acuan yang dihasilkan oleh Napirah (2016).

Penentuan nilai a diambil berdasarkan pada hasil penelitian sebelumnya milik Napirah (2016). Nilai a yang digunakan untuk sistem $^{16}\text{O} + ^{70}\text{Ge}$ adalah dua angka lebih kecil dan tiga angka lebih besar dari nilai a acuan dengan selisih $0,1 \text{ fm}$ ($0,4 \leq a \leq 0,9$) karena pada rentang nilai a tersebut akan diperoleh nilai a optimum, sedangkan untuk sistem $^{16}\text{O} + ^{72}\text{Ge}$ nilai a yang digunakan adalah enam angka lebih besar dari a acuan dengan selisih $0,1 \text{ fm}$ ($0,7 \leq a \leq 1,2$).

Potensial total yang digunakan untuk sebuah sistem pada program adalah:

$$V(r) = \left(\frac{-V_0}{1 + \exp\left(\frac{r-R_0}{a}\right)} \right) + \left(\frac{Z_p Z_t e^2}{r} \right) \quad (4)$$

Nilai kelengkungan dihitung dengan persamaan berikut

$$\hbar\omega_B = \hbar \left[d^2 V(r) / dr^2 \Big|_{R_B} / \mu \right]^{1/2} \quad (5)$$

Tampang lintang reaksi fusi dihitung dengan formula Wong (persamaan (1)), dan nilai *chi square* dengan persamaan berikut.

$$\chi^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(\sigma_e - \sigma_t)^2}{\Delta \sigma_e^2} \quad (6)$$

Penentuan nilai a optimum menggunakan metode interpolasi lagrange orde 5 dengan persamaan berikut:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n y_i L_i(x) \quad (7)$$

b. Proses Pembuktian Bahwa Nilai a_{optimum} Dapat Menghasilkan Nilai Tampang Lintang Dengan *Chi Square* Terkecil

Nilai a optimum yang telah diperoleh pada prosedur sebelumnya, kemudian di terapkan untuk membuktikan bahwa nilai tampang lintang hasil optimasi dapat menjelaskan data eksperimen. Nilai a yang digunakan pada proses ini adalah satu angka lebih kecil dari nilai a optimum, nilai a optimum itu sendiri dan satu angka lebih besar dari nilai a optimum dengan selisih maksimum $0,1 \text{ fm}$ dari nilai a optimum.

3. Hasil Penelitian dan Pembahasan

Pada penelitian ini, telah dilakukan proses optimasi parameter potensial nuklir untuk memperoleh nilai parameter kedifusian (a) optimum (terbaik) sehingga dapat menghasilkan nilai tampang lintang yang dapat menjelaskan data eksperimen dengan *Chi Square* terendah dari sistem $^{16}\text{O}+^{70,72}\text{Ge}$. Proses perhitungan nilai tampang lintang dilakukan dengan menggunakan metode pendekatan formula Wong sedangkan proses penentuan nilai parameter kedifusian (a) yang optimum dilakukan dengan menggunakan metode Interpolasi Polinom Lagrange orde 5.

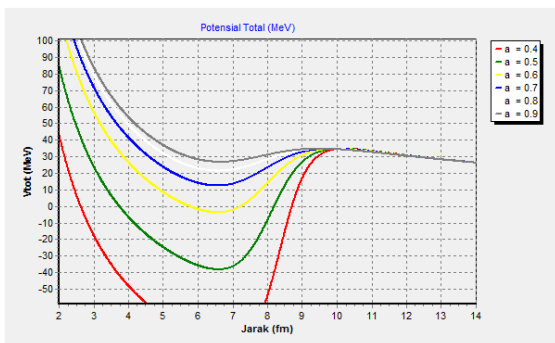
a. Sistem $^{16}\text{O}+^{70}\text{Ge}$

Reaksi fusi nuklir untuk sistem $^{16}\text{O}+^{70}\text{Ge}$ menggunakan nilai parameter kedifusian (a) yang berbeda. Dengan menentukan nilai a yang akan digunakan, maka parameter lainnya seperti nilai parameter kedalaman (V_0) dan nilai r_0 diatur sehingga diperoleh nilai V_B yang sesuai dengan nilai V_B acuan. Berdasarkan persamaan (4), jika nilai a semakin kecil maka nilai V_0 dan jari-jari kedua inti (R_0) harus semakin besar. Nilai dari ketiga parameter tersebut yang digunakan untuk menentukan nilai potensial total, sehingga kemudian dapat diperoleh nilai V_B , R_B dan $\hbar\omega$. Hasil dari penentuan parameter nuklir dapat dilihat pada tabel 1 berikut.

Tabel 1 Hasil penentuan parameter potensial nuklir untuk sistem $^{16}\text{O}+^{70}\text{Ge}$

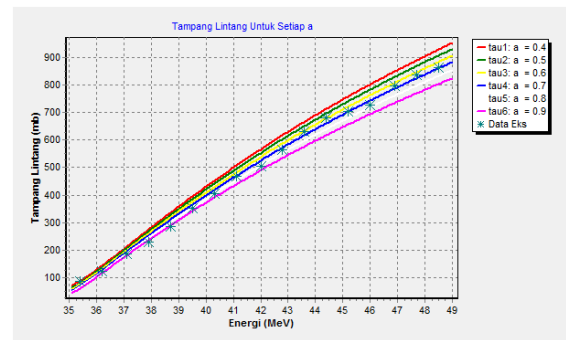
	a (fm)	V_0 (MeV)	r_0 (fm)	R_B (fm)	V_B (MeV)	$\hbar\omega$ (MeV)
Sistem $^{16}\text{O}+^{70}\text{Ge}$	0,4	140,12	1,26	10,20	34,7285	5,0252
	0,5	98,58	1,22	10,08	34,7285	4,4726
	0,6	65,569	1,2	9,95	34,7285	4,0121
	0,7	50,784	1,18	9,82	34,7285	3,5947
	0,8	43,15	1,16	9,66	34,7285	3,2638
	0,9	38,93	1,14	9,49	34,7285	2,9477

Perhitungan potensial inti menghasilkan grafik potensial total sistem sebagai berikut.

Gambar 1. Grafik potensial total sistem $^{16}\text{O}+^{70}\text{Ge}$

Gambar 1 menunjukkan bahwa setiap grafik memiliki puncak maksimum yang merupakan ketinggian tanggul potensial. Berdasarkan grafik nilai potensial total semakin besar (meningkat) seiring dengan semakin besarnya nilai a . Hal ini berarti bahwa semakin besar nilai a yang digunakan maka kedalaman sumur potensial akan semakin kecil. Meskipun keenam grafik memiliki nilai V_B namun jarak antar puncak (R_B) pada grafik berbeda. Masing-masing grafik memiliki nilai $\hbar\omega$ yang dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (5). Besarnya nilai $\hbar\omega$ dipengaruhi oleh nilai V_B dan nilai R_B , karena dalam hal ini nilai V_B untuk keenam inputan a besarnya sama maka nilai kelengkungan sangat bergantung pada nilai R_B . Dimana semakin kecil jarak tanggul maka tingkat kelengkungannya akan semakin kecil pula dengan nilai a yang semakin besar.

Proses yang dilakukan selanjutnya adalah perhitungan nilai tampang lintang sebagai fungsi energi bombardir ($\sigma_r(E)$). Hasil yang diperoleh dari proses ini yaitu grafik energi terhadap tampang lintang sebagai berikut.

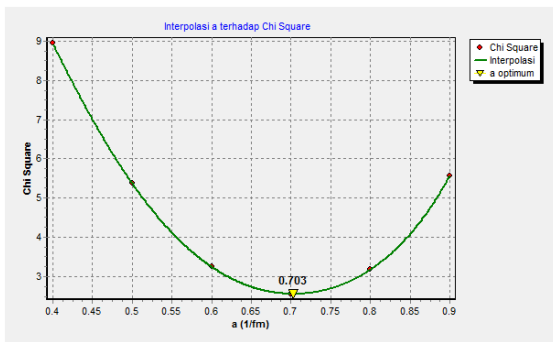
Gambar 2. Grafik tampang lintang sistem $^{16}\text{O}+^{70}\text{Ge}$

Berdasarkan persamaan (1) tampang lintang reaksi sangat dipengaruhi oleh jarak dan ketinggian tanggul, kelengkungan serta besarnya energi yang digunakan untuk menembus tanggul potensial. Semakin besar energi yang diberikan maka nilai tampang lintang juga akan semakin besar, artinya peluang terjadinya reaksi nuklir pada sistem tersebut semakin besar. Hasil perhitungan tampang lintang untuk setiap inputan a diplot dalam sebuah chart bersama dengan nilai tampang lintang hasil eksperimen, oleh karena itu pada gambar 2 terlihat 6 buah grafik hasil optimasi program dan sebuah grafik hasil eksperimen. Jelas terlihat bahwa keseluruhan nilai tampang lintang berbanding terbalik dengan nilai a . Dimana semakin besar nilai inputan a , nilai tampang lintang yang dihasilkan semakin kecil. Hasil ini sesuai dengan persamaan formula Wong yang digunakan dan mengacu pada hubungan antara nilai $\hbar\omega$ dan nilai a .

Hasil perhitungan *Chi Square* untuk sistem $^{16}\text{O}+^{70}\text{Ge}$ dapat dilihat pada tabel 2 dan gambar 3 berikut.

Tabel 2 Hasil perhitungan *Chi Square* untuk masing-masing nilai a pada sistem $^{16}\text{O}+^{70}\text{Ge}$

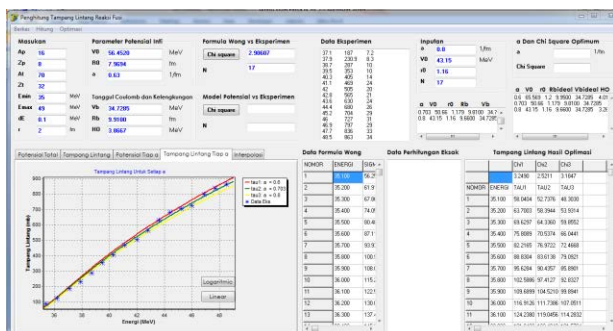
	Parameter kedifusian (a)(fm)	<i>Chi Square</i>
Sistem $^{16}\text{O}+^{70}\text{Ge}$	0,4	8,9464
	0,5	5,3764
	0,6	3,2490
	0,7	2,5617
	0,8	3,1847
	0,9	5,5641



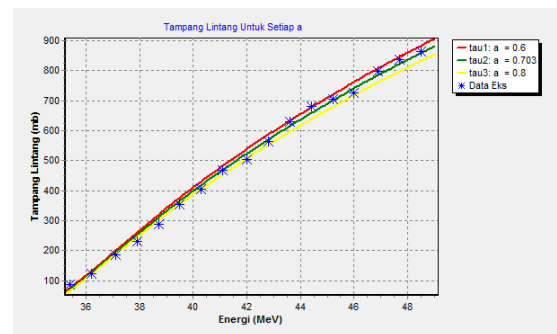
Gambar 3. Grafik Interpolasi polinom lagrange orde 5 antara a dan $Chi Square$ untuk sistem $^{16}O+^{70}Ge$

Hasil optimasi dikatakan mendekati data eksperimen apabila nilai $Chi Square$ -nya kecil (mendekati nol). Nilai $Chi Square$ untuk setiap inputan a lebih jelas dapat dilihat pada gambar 3. Grafik tersebut berbentuk parabola karena pada titik a tertentu nilai $Chi Square$ kembali naik. Untuk mengetahui titik a lain yang berada diantara titik-titik yang diketahui, dilakukanlah tahap interpolasi polinom lagrange orde 5 menggunakan persamaan (7). Interpolasi merupakan metode numerik yang digunakan untuk mengetahui titik-titik diantara beberapa titik yang telah diketahui nilainya. Dalam kasus ini nilai a merupakan fungsi x dan nilai $Chi Square$ merupakan fungsi y . Metode interpolasi lagrange merupakan metode yang tepat untuk kasus ini, dapat dilihat pada gambar 3, grafik hasil interpolasi terlihat lebih *smooth* dan dapat mengikuti kontur dari grafik sebelumnya. Grafik yang berbentuk parabola tersebut memiliki puncak minimum yang merupakan nilai a optimum dengan $Chi Square$ terendah, dimana nilai a optimum yang telah diperoleh sebesar 0,703 fm dengan $Chi Square$ sebesar 2,5612.

Langkah terakhir untuk sistem ini yaitu penerapan nilai a optimum dalam penentuan nilai tampang lintang. Nilai a yang digunakan untuk langkah ini yaitu 0,6 fm, 0,703 fm dan 0,8 fm, nilai V_0 yang digunakan untuk a optimum yaitu 50,66 MeV dengan r_0 sebesar 1,179 fm. Keluaran dari proses ini yaitu grafik tampang lintang yang dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 4. Hasil dari penerapan nilai a optimum untuk sistem $^{16}O+^{70}Ge$



Gambar 5. Grafik dari penerapan nilai a optimum untuk sistem $^{16}O+^{70}Ge$

Gambar 4 menunjukkan tampilan untuk seluruh proses penerapan nilai a optimum dalam menentukan tampang lintang. Lebih jelas dapat dilihat pada gambar 5, berdasarkan grafik tersebut telah dibuktikan bahwa nilai a optimum yang diperoleh dapat menghasilkan nilai tampang lintang yang dapat menjelaskan data hasil eksperimen dengan $Chi Square$ sebesar 2,5211.

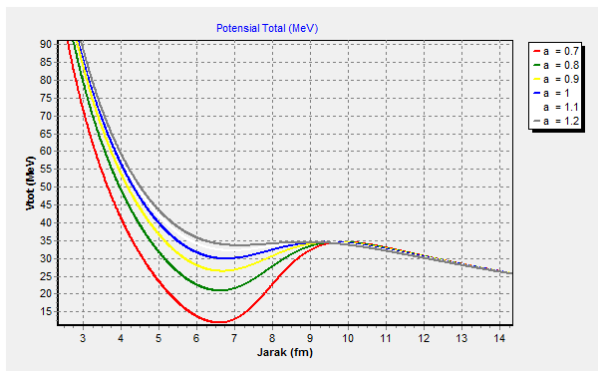
b. Sistem $^{16}O+^{72}Ge$

Reaksi fusi nuklir untuk sistem $^{16}O+^{72}Ge$ menggunakan nilai a yang berbeda dari sistem sebelumnya. Penentuan nilai a untuk sistem ini diambil dari enam angka setelah nilai a acuan dengan selisih maksimal 0,1 fm ($0,7 \leq a \leq 1,2$). Penentuan nilai a ini disesuaikan dengan masing-masing sistem. Dengan langkah yang sama maka diperoleh nilai parameter potensial nuklir sebagai berikut :

Tabel 3 Hasil penentuan parameter potensial nuklir untuk sistem $^{16}O+^{72}Ge$

	a (fm)	V_0 (MeV)	r_0 (fm)	R_B (fm)	V_B (MeV)	$\hbar\omega$ (MeV)
Sistem $^{16}O+^{72}Ge$	0,7	50,935	1,18	9,87	34,5456	3,5872
	0,8	43,225	1,16	9,72	34,5456	3,2411
	0,9	38,955	1,14	9,55	34,5456	2,9315
	1	36,574	1,12	9,36	34,5456	2,6362
	1,1	35,357	1,1	9,14	34,5456	2,3396
	1,2	34,9396	1,08	8,86	34,5456	2,0076

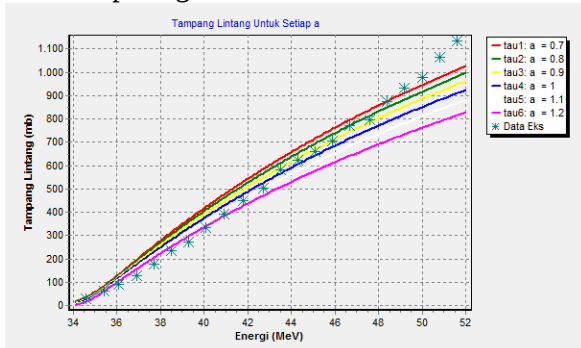
Tabel 3 menunjukkan hasil dari penentuan parameter potensial nuklir, data pada tabel tersebut kemudian digunakan untuk menentukan atau membuat grafik potensial total. Grafik potensial total merupakan jumlah dari potensial inti dan potensial Coulomb. Grafik tersebut dapat dilihat pada gambar 6 berikut:



Gambar 6. Grafik potensial total ($V(r)$) untuk sistem $^{16}\text{O}+^{72}\text{Ge}$

Gambar 6 menunjukkan grafik dari keenam potensial total. Masing-masing potensial total memiliki puncak maksimum yang sama tetapi dengan nilai R_B yang berbeda. Pada grafik dapat dilihat bahwa tingkat kelengkungannya sedikit lebih kecil dari sistem sebelumnya, hal ini berarti bahwa besarnya nilai a mempengaruhi tingkat kelengkungan dari suatu grafik potensial total.

Proses selanjutnya yaitu menentukan nilai tampang lintang untuk masing-masing inputan a . Langkah dari proses ini sama dengan proses pada sistem sebelumnya. Grafik dari semua tampang lintang untuk sistem ini dapat dilihat pada gambar 7 berikut:



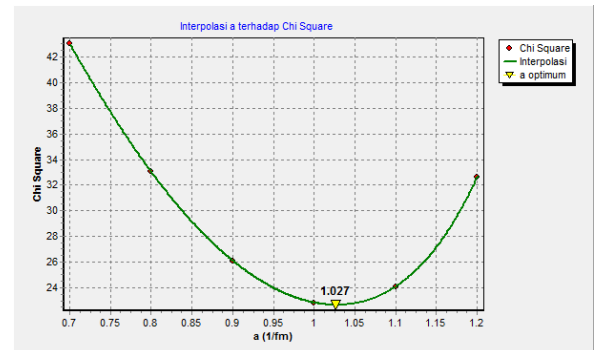
Gambar 7. Grafik tampang lintang untuk sistem $^{16}\text{O}+^{72}\text{Ge}$

Hasil optimasi dikatakan mendekati data hasil eksperimen apabila *Chi Square* yang dihasilkan dari perbandingan keduanya bernilai kecil (mendekati 0). Untuk sistem ini, masing-masing *Chi Square* dapat dilihat pada tabel 4 berikut:

Tabel 4 Hasil perhitungan *Chi Square* untuk masing-masing nilai a pada sistem $^{16}\text{O}+^{72}\text{Ge}$

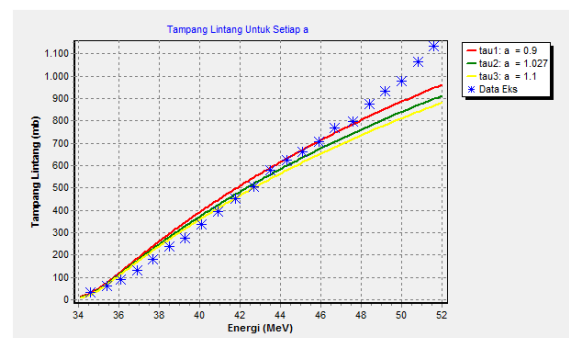
Sistem $^{16}\text{O}+^{72}\text{Ge}$	Parameter kedifusian (a)(fm)	<i>Chi Square</i>
	0,7	43,0742
	0,8	33,0571
	0,9	26,0957
	1,0	22,8024
	1,1	24,0828
	1,2	32,5980

Tabel 4 menunjukkan nilai *Chi Square* untuk masing-masing tampang lintang dengan inputan nilai a yang berbeda. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 8 berikut:

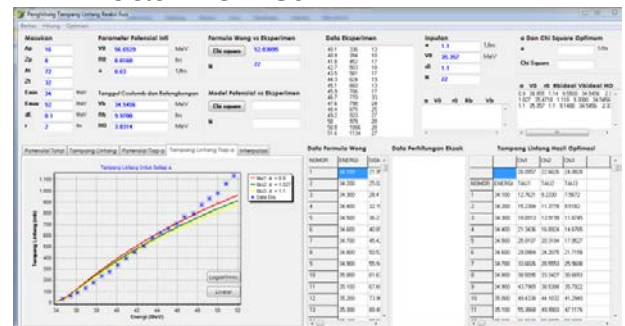


Gambar 8. Grafik hasil interpolasi untuk sistem $^{16}\text{O}+^{72}\text{Ge}$

Berdasarkan gambar 8 terdapat puncak minimum dari grafik hasil interpolasi. Puncak minimum tersebut merupakan nilai a optimum untuk sistem ini dengan *Chi Square* sebesar 22,6300. Setelah nilai a optimum diketahui, maka selanjutnya nilai tersebut dapat diterapkan untuk menentukan nilai tampang lintang reaksi menggunakan tiga nilai inputan a . Nilai a yang digunakan untuk memperjelas nilai tampang lintang hasil optimasi untuk sistem ini adalah 0,9 fm, 1,027 fm dan 1,1 fm, nilai V_0 yang digunakan untuk a optimum adalah 35,4718 MeV dengan r_0 sebesar 1,118 fm. Hasil dari proses ini dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 9. Grafik dari penerapan nilai a optimum untuk sistem $^{16}\text{O}+^{72}\text{Ge}$



Gambar 9. Hasil dari penerapan nilai a optimum untuk sistem $^{16}\text{O}+^{72}\text{Ge}$

Gambar penerapan di atas menunjukkan bahwa hasil nilai a optimum yang diperoleh sudah cukup bagus meskipun $Chi Square$ nya belum mendekati nilai $Chi Square$ sempurna (sama dengan 0). Nilai $Chi Square$ yang dihasilkan sebesar 22,6626.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil optimasi, dapat disimpulkan bahwa Metode pendekatan formula Wong dapat menjelaskan nilai tampang lintang reaksi fusi antar inti-inti berat dengan nilai parameter kedifusian (a) tertentu pada energi diatas V_B . Masing-masing sistem memerlukan nilai a optimum yang berbeda untuk menghasilkan nilai tampang lintang yang dapat menjelaskan data hasil eksperimen dengan $Chi Square$ terendah.

Daftar Pustaka

- [1]. Pasaribu, A. P., 2014, *Reaksi Fusi*, Universitas Kristen Indonesia, Jakarta.
- [2]. Rismiyanto, dkk, 2000, *Buku Pintar Nuklir*, BAPETEN, Jakarta.
- [3]. Wong, C. Y., 1973, Interaction Barrier in Charged-Particle Nuclear Reactions, *Phys. Rev. Lett.*, **31(12)**, 766.
- [4]. Silakhuudin dan Kasmudin, 2005, *Peningkatan Ketepatan Perhitungan Tampang Lintang Reaksi Neutron Cepat dan Proton pada Program ALICE*, Risalah Lokakarya Komputasi dalam Sains dan Teknologi Nuklir XVI.
- [5]. Aguilera, E. F., Kolata, J. J., dan Tighe, R. J., 1995, Nuclear Structure Effects in the Sub-barrier Fusion of $^{16}\text{O} + ^{70,72,73,74,76}\text{Ge}$, *Phys. Rev. C*, **52**, 3103.
- [6]. Justina, 2016, *Simulasi Numerik Tampang Lintang Reaksi Fusi Nuklir Yang Melibatkan Inti-Inti Ringan*, Skripsi, Universitas Halu Oleo, Kendari.
- [7]. Napirah, M., 2016, *Telaah Reaksi Fusi Nuklir Menggunakan Model Penetrasi Tanggul Satu Dimensi*, Skripsi, Universitas Halu Oleo, Kendari.