

---

**PERHITUNGAN MODEL DWBA DENGAN KOD DWUCK-4:  
TAMPANG LINTANG HAMBURAN NEUTRON ELASTIK DAN INELASTIK  
PADA REAKSI  $^{94}\text{Zr}(n,n)$**

Syafarudin

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir - Badan Tenaga Nuklir Nasional  
Kawasan Puspiptek Serpong, Gedung 80, Tangerang, 15310  
E-mail: [sfrdn@batan.go.id](mailto:sfrdn@batan.go.id)

Diterima editor 11 Januari 2010

Disetujui untuk dipublikasi 25 Pebruari 2010

**ABSTRAK**

**PERHITUNGAN MODEL DWBA DENGAN KOD DWUCK-4: Tampang Lintang Hamburan Neutron Elastik dan Inelastik pada Reaksi  $^{94}\text{Zr}(n,n)$ .** Perhitunganampang lintang reaksi tumbukan neutron dengan target nuklida  $^{94}\text{Zr}$  telah dilakukan menggunakan model hampiran Born – gelombang Tererot DWBA dan kod DWUCK-4. Parameter potensial model optik OMP (*optical model potential*) yang digunakan adalah menurut versi Becchetti-Greenlees, Rapaport dan Walter-Guss. Dari perhitungan diperoleh spektrum tampang lintang total dengan rentang energi tumbuk 1~35 MeV, dan spektrum tampang lintang distribusi energi pada level energi tumbuk 15 MeV. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa ketiga OMP memberikan rekomendasi tampang lintang yang senada baik untuk kurva reaksi elastik ( $n,n$ ) maupun inelastik ( $n,n'$ ). Dari perhitungan spektrum tampang lintang distribusi energi diketahui bahwa kesemua versi OMP memberikan harga tampang lintang maksimum reaksi  $^{94}\text{Zr}(n,n)$ ,  $E_n = 15$  MeV pada kisaran energi hampur yang sama, yaitu 7~8 MeV.

Kata kunci: Perhitungan tampang lintang reaksi nuklir, DWBA, OMP, tumbukan neutron, hamburan neutron.

**ABSTRACT**

**DWBA MODEL CALCULATION USING THE CODE DWUCK-4 : Cross Sections of Elastic and Inelastic Neutron Scattering in the  $^{94}\text{Zr}(n,n)$  reaction.** The calculation of cross section for neutron and  $^{94}\text{Zr}$  nuclide collision has been done using the DWBA model and DWUCK-4 code. The optical model potential (OMP) parameters used for the calculation were based on the Becchetti-Greenlees, Rapaport as well as Walter-Guss versions. A Spectrum of total cross section has been resulted with incoming energy range of 1~35 MeV, and a spectrum of energy distribution of cross section has been resulted at the incoming energy of 15 MeV. The calculation result shows that the three OMPs give similar recommendations on cross section for the elastic reaction ( $n,n$ ) curve, as well as inelastic reaction ( $n,n'$ ). It is understood from the calculated energy distribution of cross section, that all those OMPs indicate the maximum cross section for the  $^{94}\text{Zr}(n,n)$  reaction,  $E_n = 15$  MeV at almostly the same outgoing energy level, i.e. 7~8 MeV.

Keywords: Nuclear reaction cross section calculation, DWBA, OMP, neutron collision, neutron scattering.

**PENDAHULUAN**

Data tampang lintang reaksi inti memegang peranan sentral dalam desain teras reaktor nuklir, mulai dari perhitungan kritikalitas hingga sebaran lepasan produk fisi di lingkungan. Dari sudut pandang fungsi material, elemen penyusun teras dibedakan menjadi nuklida fisil, nuklida produk fisi, nuklida moderator, nuklida reflektor, nuklida pendingin,

nuklida batang kendali, nuklida penyerap neutron, dan nuklida perisai radiasi, yang masing-masing dicirikan berdasarkan pola interaksinya terhadap neutron. Perbedaan karakteristik masing-masing material tersebut terlihat jelas pada spektrum tampang lintang reaksi tumbukan dengan neutron.

Selain reaksi fisi, spektrum tampang lintang neutronik reaksi lainnya seperti hamburan neutron dan pertukaran nukleon mulai memegang penting sejak awal pengembangan aplikasi reaksi berantai untuk pembangkitan energi yang dimotori oleh Enrico Fermi pada tahun 1942. Pada masa itu, satu-satunya cara untuk memenuhi kebutuhan data tampang lintang reaksi yang dikehendaki adalah dengan pengujian langsung menggunakan pemercepat ion yang ditumbukkan ke nuklida yang hendak diamati. Dewasa ini, kegiatan litbang pemenuhan kebutuhan data tampang lintang bukannya menyurut, tetapi justru semakin meningkat karena harus mengimbangi tuntutan kemajuan teknologi sistem reaktor yang pesat dan semakin kompleks. Material fungsional (terutama moderator, reflektor dan pendingin) yang pada mulanya terbatas pada air dan grafit, kemudian meluas ke material lain seperti logam natrium, molten salt, timbal, dan bahkan gas. Di satu sisi, eksperimen reaksi nuklir untuk pengukuran tampang lintang membutuhkan dana yang sangat mahal sehingga tidak semua negara mampu memenuhi kebutuhan tersebut dengan eksperimen. Selain itu, ada sebagian radionuklida produk fisi yang berumur terlalu singkat untuk dapat dilakukan eksperimen reaksi nuklir. Oleh karena itu, peranan perhitungan secara teoritis serta simulasi pemodelan reaksi nuklir menjadi sebuah opsi yang tak terelakkan guna menutupi kekosongan data tampang lintang yang dibutuhkan.

Salah satu teori yang cukup membuahkan hasil dan diadopsi oleh ENDL (*Evaluated Nuclear Data Library*) adalah perhitungan dengan model hampiran Born – gelombang Tererot (DWBA: *distorted wave born approximation*). Teori ini telah teruji sejak beberapa dekade lalu dan hingga sekarang mendapat pengakuan resmi dari NEA (*Nuclear Energy Agency*) dengan diadopsinya sejumlah kod berbasis DWBA, antara lain DWUCK-4/5 [1], DWBA05/DWBB05 [2], dan TALYS-1.0 [3] sebagai model perhitungan yang sejajar dan saling melengkapi dengan model perhitungan nuklir lainnya seperti INCM (*Intra Nuclear nucleon Cascade Model*), PEM (*Pre-Equilibrium Model*), SM (*Statistic Model*), DI (*Direct Interaction*), dan CC (*Coupled Channel*).

Model perhitungan DWBA telah digunakan dalam analisis tampang lintang distribusi angular untuk menyatakan keadaan neutron yang berpindah dari inti bergabung dengan partikel tumbuk membentuk partikel hampur pada reaksi *pickup* neutron  $^{58}\text{Ni}(p,d)^{57}\text{Ni}$ , dan menunjukkan kesesuaian yang tinggi dengan hasil pengukuran [4,5]. Informasi yang diperoleh dari kajian tersebut kemudian diterapkan secara analog terhadap reaksi *pickup* proton (n,d) yang setara guna mengatasi keterbatasan akselerasi dan pengukuran energi neutron [6,7]. Model analisis DWBA yang menggunakan parameter model optik (OMP: *optical model potential*) menunjukkan konsistensi yang tinggi, tidak hanya terhadap reaksi yang melibatkan pertukaran/ perpindahan nukleon, tetapi juga terhadap reaksi yang melibatkan elektron/ positron [8,9] sebagai pembandingan metode perhitungan transpor-elektron dengan metode Monte Carlo [10], bahkan terhadap reaksi yang melibatkan hadron berenergi tinggi [11-13] serta reaksi yang lebih kompleks dan energi tinggi [14,15]. Dengan semakin mudahnya teknologi komputasi kecepatan tinggi dan ketersediaan data dukung utama [16], pengembangan teknologi perhitungan nuklir berbasis perangkat lunak seperti DWBA ini sangat potensial untuk dikembangkan sebagai penelitian dasar iptek nuklir di negara yang memiliki sumber daya IT yang melimpah seperti Indonesia demi mengurangi kesenjangan teknologi nuklir dari negara maju. Hasil dari perhitungan tampang lintang reaksi nuklir berbagai nuklida sangat dibutuhkan untuk melengkapi pustaka data nuklir dari

eksperimen dan dapat diaplikasikan untuk berbagai simulasi seperti MCNP5/X dalam perhitungan kritikalitas dan sebaran fluks neutron berbagai sistem teras reaktor.

## TEORI

Persamaan Schrödinger untuk reaksi hamburan elastik meliputi energi kinetik dan energi potensial interaksi hamburan elastik antara partikel hampur dengan partikel target tanpa terjadi eksitasi internal partikel target.

$$\left\{ -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V \right\} \psi = E \psi \quad (1)$$

Dengan mengasumsikan  $k^2 = \frac{2mE}{\hbar^2}$ , dan  $U(r) = \frac{2m}{\hbar^2} V(r)$  diperoleh bentuk persamaan yang dapat dipecahkan dengan fungsi Green.

$$(\nabla^2 + k^2) \psi = U(r) \psi \quad (2)$$

Di sini, diberikan fungsi Green  $G(r, r')$  yang memenuhi hubungan  $(\nabla^2 + k^2)G(\vec{r}, \vec{r}') = \delta(\vec{r} - \vec{r}')$ ,

$$G(\vec{r}, \vec{r}') = \frac{1}{(2\pi)^3} \int \frac{e^{i\vec{q} \cdot (\vec{r} - \vec{r}')}}{k^2 - q^2} d^3 q = -\frac{e^{ik|\vec{r} - \vec{r}'|}}{4\pi|\vec{r} - \vec{r}'|} \quad (3)$$

Sehingga solusi persamaan (2) menjadi:

$$\begin{aligned} \psi^{(\pm)}(\vec{r}) &= e^{i\vec{k} \cdot \vec{r}} + \int G(\vec{r}, \vec{r}') U(\vec{r}') \psi^{(\pm)}(\vec{r}') d^3 \vec{r}' \\ &= e^{i\vec{k} \cdot \vec{r}} - \frac{1}{4\pi} \int \frac{e^{ik|\vec{r} - \vec{r}'|}}{|\vec{r} - \vec{r}'|} U(\vec{r}') \psi^{(\pm)}(\vec{r}') d^3 \vec{r}' \end{aligned} \quad (4)$$

dengan,  $e^{i\vec{k} \cdot \vec{r}}$  adalah solusi pada saat  $U = 0$ .

### Reaksi Hamburan Elastik

Terhadap persamaan (4), model DWBA menggunakan bentuk penyelesaian dengan pendekatan secara asimptot.

$$|\vec{r} - \vec{r}'| = \sqrt{r^2 + r'^2 - 2\vec{r} \cdot \vec{r}'} \xrightarrow{r \rightarrow \infty} r \left( 1 - \frac{\vec{r} \cdot \vec{r}'}{r^2} \right) \quad (5)$$

$$\vec{k}_f = \frac{\vec{k} \cdot \vec{r}}{r} \quad (6)$$

di mana pada harga  $r$  yang cukup besar  $e^{ik|\vec{r} - \vec{r}'|} \rightarrow e^{ikr} e^{-i\vec{k}_f \cdot \vec{r}'}$ . Persamaan gelombang reaksi hamburan elastik kemudian dianalisis dengan bentuk persamaan:

$$\psi^{(+)}(\vec{k}, \vec{r}) \rightarrow e^{i\vec{k} \cdot \vec{r}} + \frac{f(\theta, \varphi)}{r} e^{ikr} \quad (7)$$

Di sini,  $f(\theta, \varphi)$  adalah amplitudo hamburan (*scattering amplitude*), dan jika dianalogikan dengan persamaan (4) diperoleh hubungan berikut:

$$f(\theta, \varphi) = -\frac{m}{2\pi\hbar^2} \int V(\vec{r}') e^{-i\vec{k}_f \cdot \vec{r}'} \psi^{(+)}(\vec{r}') d^3 \vec{r}' \quad (8)$$

Pada saat amplitudo hamburan kecil, sisi kanan suku kedua pada persamaan (7) mendekati nol sehingga persamaan (8) menjadi,

$$f(\theta, \varphi) \approx -\frac{m}{2\pi\hbar^2} \int V(\vec{r}) e^{i\vec{q}\cdot\vec{r}} d^3r \quad (9)$$

$$\vec{q} = \vec{k}_i - \vec{k}_f$$

Karena ini adalah kasus hamburan elastik maka indeks gelombang keadaan awal dan akhir adalah sama  $|\vec{k}_f| = |\vec{k}_i| = k$ , sehingga,

$$q^2 = k_i^2 + k_f^2 - 2k_i k_f \cos \theta \quad (10)$$

$$= \left\{ 2k \sin \frac{\theta}{2} \right\}^2$$

Di samping itu, karena untuk kasus gaya pusat inti,  $V(\vec{r}) = V(r)$  dan amplitudo hamburan tidak tergantung pada sudut  $\varphi$ , maka persamaan (9) dapat disederhanakan menjadi:

$$f(\theta) = -\frac{m}{\hbar^2 k \sin \frac{\theta}{2}} \int V(r) r \sin(qr) dr \quad (11)$$

Dengan memanfaatkan hubungan

$$\psi^{(-)} * (\vec{k}, \vec{r}) = \psi^{(+)}(-\vec{k}, \vec{r}) \quad (12)$$

tampang lintang reaksi hamburan elastik dapat dihitung menggunakan rumus di bawah ini.

$$\left( \frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{DWE} = |f(\theta)|^2 = \frac{m^2}{\hbar^4 k^2 \sin^2 \frac{\theta}{2}} \left| \int V(r) r \sin(qr) dr \right|^2 \quad (13)$$

Korelasi antara tampang lintang reaksi dengan energi tumbuk direpresentasikan oleh indeks gelombang awal  $k$  yang kuantitasnya berbanding lurus dengan akar energi tumbuk.

### Reaksi Hamburan Inelastik

Jika dalam sistem reaksi hamburan (a,X) di mana partikel **a** menumbuk target **X** dan menyebabkan eksitasi internal pada salah satu atau kedua partikel, maka perhitungan tampang lintang harus diperlakukan sebagai reaksi hamburan inelastik. Hamiltonian untuk proses reaksi hamburan inelastik melibatkan energi kinetik partikel **a** dan partikel **X** ( $H_a$  dan  $H_X$ ), potensial interaksi  $V_{aX}$  dan energi kinetik relatif antar partikel **a-X** adalah:

$$H = -\frac{\hbar^2}{2\mu} \nabla_r^2 + H_a + H_X + V_{aX}(r) \quad (14)$$

Di sini  $\mu$  adalah massa diam partikel tumbuk dalam sistem pusat massa. Dengan pendekatan yang serupa dengan kasus hamburan elastik, diperoleh persamaan tampang lintang diferensial untuk reaksi hamburan inelastik sebagai berikut:

$$\left( \frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{DWI} = \frac{k_f}{k_i} |f_{if}(\theta)|^2 \quad (15)$$

$$= \frac{k_f}{k_i} \frac{\mu^2}{(2\pi\hbar^2)^2} \left| \int d\vec{r}' e^{i(\vec{k}_i - \vec{k}_f) \cdot \vec{r}'} \int d\eta_a d\eta_X \varphi_f^*(a) \varphi_f^*(X) V_{aX} \varphi_i(a) \varphi_i(X) \right|^2$$

Di sini,  $\eta_a$  dan  $\eta_X$ , masing-masing adalah koordinat internal untuk partikel **a** dan **X**,  $\varphi_i$  dan  $\varphi_f$  adalah persamaan gelombang individu untuk kanal masuk dan keluar,  $V_{aX}$  adalah potensial interaksi kedua partikel, dan  $f_{if}(\theta)$  adalah amplitudo hamburan inelastik.

Di dalam kod DWUCK-4 tampang lintang reaksi hambur inelastik dihitung berdasarkan persamaan (15).

Hubungan antara energi hambur  $E'$  dan energi tumbuk  $E$  dinyatakan sebagai fungsi energi yang terserap oleh partikel hambur dan target (masing-masing adalah  $\varepsilon_{fa}$  dan  $\varepsilon_{fx}$ ).

$$\begin{aligned} k_f &= \sqrt{\frac{2\mu}{\hbar^2} E'} \\ E' &= E - \varepsilon_{fa} - \varepsilon_{fx} \end{aligned} \quad (16)$$

### Model Potensial Optik (OMP: *Optical Model Potential*)

Model potensial optik dikembangkan dari fenomena serapan berkas cahaya yang melewati benda optik semi transparan. Sebagai efek dari indeks bias dan transparansi media optik, dari berkas cahaya yang masuk hanya sebagian yang diteruskan, sedang sebagian yang lain tidak diteruskan karena mengalami pemantulan, pembiasan dan penyerapan oleh media optik. Untuk dapat memenuhi kondisi fenomena tersebut parameter potensial  $V(r)$  atau  $V_{ax}(r)$  dalam persamaan (13) dan (15) dikembangkan menjadi bentuk bilangan kompleks dan dinyatakan secara umum sebagai fungsi  $U'(r)$ .

Potensial optik untuk partikel elementer secara umum dapat dinyatakan dengan fungsi di bawah ini:

$$U'(r) = -Vf(r, a_V, r_V) - iW_V f(r, a_{WV}, r_{WV}) + i4a_I W_D \frac{d}{dr} f(r, a_I, r_I) \quad (17)$$

$$+ V_{LS} \left( \frac{\hbar}{m_\pi c} \right)^2 \left( \frac{1}{r} \frac{d}{dr} f(r, a_{LS}, r_{LS}) \right) (\vec{L} \cdot \vec{S}) + V_{Coulomb}$$

$$f(r, a_i, r_i) = \frac{1}{1 + \exp\{(r - r_i A^{1/3})/a_i\}} \quad (18)$$

Di sini,  $f(r, a_i, r_i)$  adalah *form factor* tipe Woods-Saxon dan untuk neutron,  $V_{Coulomb} = 0$ . Dalam interaksi neutron dengan inti atom, sebagian neutron dihamburkan dan sebagian lagi tertangkap oleh inti dan memunculkan reaksi inti dengan partikel hambur selain neutron atau setelah mengalami proses reaksi yang panjang akhirnya kembali menjadi neutron. Kemunculan partikel tumbuk sebagai partikel hambur ditentukan oleh bagian riil dari resultan perhitungan potensial, sedangkan perubahannya menjadi kanal reaksi lain ditentukan oleh bagian imajiner. Antara bagian riil dan bagian imajiner potensial diketahui memiliki pola hubungan dispersi yang tetap [17], yang dapat digunakan sebagai batasan untuk mengurangi ketidakpastian saat pencarian nilai empiris parameter OMP.

### Parameter Perhitungan DWUCK-4

Format penulisan *input file* DWUCK-4 mengikuti aturan bahasa pemrograman FORTRAN77. Satu set parameter *input file* terdiri dari 7 blok (*input block*) yang berisi minimal 1 baris, yang secara keseluruhan menyatakan sebuah kondisi perhitungan (*1 run*). Pada baris pertama *input file* ditulis 17 barisan angka yang disebut *control integers*, yang masing-masing berfungsi sebagai opsi perhitungan dan/atau keluaran. Sejumlah kondisi perhitungan dapat dikumpulkan berurut dalam 1 *input file* kemudian DWUCK-4 akan membaca dan menjalankan perhitungan secara sekuensial sampai terbaca 9 pada posisi angka ke-1 dalam *control integers*. Untuk penjelasan lebih lanjut mengenai format *input file* DWUCK-4 dapat merujuk manual DWUCK-4 [1].

Persamaan (10) sebagai persamaan umum potensial neutron atau proton mengandung tiga bentuk potensial, yaitu Woods-Saxon volume (suku ke-1 dan ke-2), Woods-Saxon permukaan (suku-3), serta Woods-Saxon turunan kedua-untuk spin orbit (suku ke-4). Sehingga harga OPTION yang harus digunakan untuk menyatakan semua bentuk potensial dalam persamaan (10) tersebut adalah: +1,+2, dan -4 (Gambar 1, bagian arisir). Urutan penulisan baris potensial boleh tertukar asal baris OPTION dan parameter terkait tetap konsisten.

Sebagai akomodasi berbagai bentuk persamaan potensial, untuk gelombang masuk, gelombang tererot, dan *form factor*, pada *input file* DWUCK-4 disediakan tempat pada baris kedua dan seterusnya, masing-masing dalam *input block* 5, 6, dan 7. Satu baris potensial selalu dimulai dengan OPTION yang diikuti oleh parameter potensial yang terkait. Harga negatif OPTION menunjukkan akhir pembacaan bentuk persamaan parameter yang harus dijumlahkan secara koheren. Hubungan antara harga OPTION dengan bentuk potensial adalah sebagai berikut:

OPTION = +1	Woods-Saxon volume
OPTION = +2	Woods-Saxon permukaan (turunan pertama)
OPTION = +3	Woods-Saxon turunan kedua
OPTION = +4	Spin-orbit untuk Woods-Saxon volume
OPTION = +5	Spin-orbit untuk Woods-Saxon permukaan

Selain kelima opsi di atas, masih ada 7 opsi lagi yang bisa digunakan tetapi tidak disajikan di sini karena hanya digunakan untuk kasus-kasus khusus.

```

10010100000010000 EN= E.EE MeV, 94Zr (n,n) OMP versi ANU
+25.00 +05.00 +02.00
+40+01+01+00
+00.10 +00.00 +15.00 +00.00 +00.00
+E +01.0086+00. +93.9063+40. +01.250 +00.000
+00.000 +01.0
+01. -VR +rR +aR +00. -WV +rW +aW
+00.
+02. +00.000 +01.260 +00.580 +00. +4WD +rD +aD
+00.
-04. -4Vso +rso +aso +01. +00.000 +00.000
+00.000 +01.
QV +01.0086+00. +93.9063+40. +01.250 +00.000
+00.000 +01.0
+01. -VR +rR +aR +00. -WV +rW +aW
+00.
+02. +00.000 +01.260 +00.580 +00. +4WD +rD +aD
+00.
-04. -4Vso +rso +aso +01. +00.000 +00.000
+00.000 +01. BE +01.0086+00.
+93.9063+40. +01.250 +00.000 +00.000 +00.0
+02. -VR +rR +aR +00. -WV +rW +aW
+00.
-03. +00.000 +01.260 +00.580 +00. +4WD +rD +aD
+00.
g

```

Gambar 1. Format *input file* perhitungan dengan kod DWUCK-4 untuk perhitungan spektrum tampang lintang reaksi  $^{94}\text{Zr}(n,n)$ .

#### Akurasi Hasil Perhitungan DWUCK-4

Akurasi hasil perhitungan model DWBA ditentukan oleh 2 unsur utama, yaitu validitas asumsi mekanisme reaksi, dan kualitas OMP yang digunakan dalam perhitungan. OMP diperoleh sebagai kompilasi sejumlah pengukuran tampang lintang reaksi bersangkutan secara eksperimen, yang dikembangkan secara umum untuk batasan massa atom dan energi tertentu. Oleh karena itu, kualitas OMP dapat diverifikasi melalui statistik data eksperimen yang dijadikan landasan. Sedangkan, validitas asumsi mekanisme reaksi berkaitan erat dengan proses reaksi yang bersangkutan serta memberikan konsekuensi langsung pada bentuk potensial yang harus diperhitungkan.

Besarnya arti peranan OMP dalam perhitungan nuklir model DWBA, menjadi alasan utama banyak dilakukannya eksperimen pengukuran tampang lintang berbagai reaksi penting, dalam rangka pencarian definisi terbaik dan terakurat untuk menyatakan parameter OMP dalam fungsi umum massa atom dan energi tumbuk. Di antara penelitian terkait yang hingga kini tetap representatif digunakan sebagai parameter global OMP untuk neutron adalah versi Becchetti-Greenlees [18], Walter-Guss [19] dan Rapaport [20]. Untuk menjamin validitas data hasil perhitungan, perlu diperhatikan ruang lingkup yang tepat saat penentuan versi OMP mana yang akan dipilih.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Perhitungan

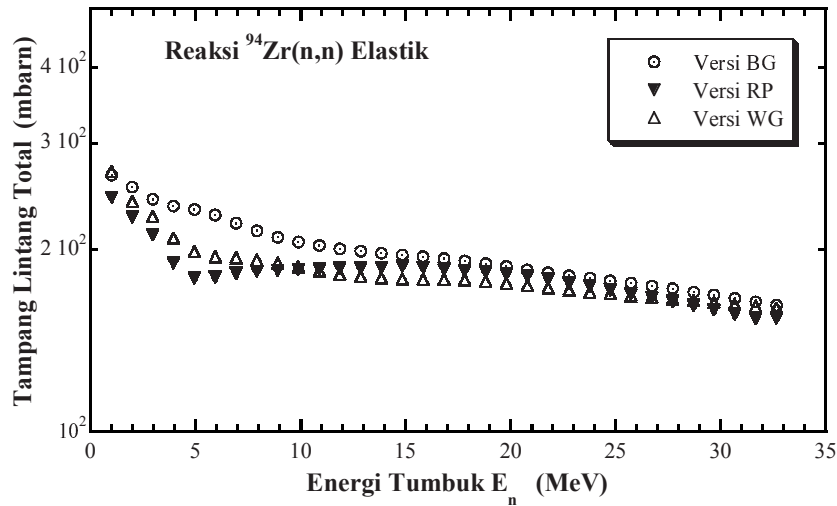
Terkait dengan pemenuhan kebutuhan data nuklir untuk simulasi perhitungan (termasuk MCNP5/X), dibutuhkan 3 jenis spektrum tampang lintang neutron dengan kegunaan masing-masing. Pertama adalah spektrum tampang lintang total per energi tumbuk, yang menunjukkan karakteristik hubungan antara probabilitas reaksi pada tiap-tiap level energi tumbuk. Kedua adalah spektrum distribusi energi tampang lintang, yang menunjukkan karakteristik sebaran probabilitas reaksi pada rentang energi hambur tertentu untuk satu level energi tumbuk. Ketiga adalah spektrum distribusi angular dari tampang lintang, yang menunjukkan karakteristik bentuk kurva tampang lintang terhadap sudut hamburan. Satu *input file* perhitungan DWUCK-4, menyatakan satu kondisi energi masuk dan kondisi energi hambur yang keluarannya dihitung dalam sejumlah sudut hamburan. Sehingga, untuk menghitung satu kondisi tampang lintang distribusi angular cukup dilakukan dengan sekali eksekusi DWUCK-4 dengan satu set *input file*. Sedangkan untuk membuat spektrum tampang lintang total dan spektrum tampang lintang distribusi energi harus dilakukan perhitungan DWUCK-4 berulang kali, dengan variasi energi tumbuk  $E$  dan energi ikat  $BE$ .

Dalam analisis ini, pertama dilakukan perhitungan reaksi tumbukan neutron dengan salah satu nuklida penyusun material bahan bakar nuklir, yaitu  $^{94}\text{Zr}$  dengan keluaran spektrum tampang lintang energi total. Parameter OMP yang digunakan adalah menurut versi Becchetti-Greenlees [18], Walter-Guss [19], dan Rapaport [20]. Sesuai dengan irisan ruang lingkup ketiga versi OMP tersebut, rentang energi tumbuk neutron untuk perhitungan spektrum adalah 1 ~ 35 MeV. Paket parameter yang digunakan untuk perhitungan DWUCK-4 ditunjukkan dalam Gambar 1.

Harga parameter OMP yang digunakan pada *input block* 5, 6, dan 7 pada prinsipnya berbeda. Tetapi, dalam hamburan elastis, di mana persamaan gelombang akhir konsisten dengan persamaan gelombang awal, maka harga parameter pada *input block* 5 dan 6 sama. Sedangkan harga parameter OMP pada *input block* 7 tidak berdampak dalam kasus hamburan elastik dan baru akan berpengaruh jika energi ikat tidak nol, dengan kata lain terjadi proses transfer nukleon dalam reaksi tersebut. Harga parameter potensial terkait (VR,

rR, aR, WV, rW, aW, WD, rD, aD, Vso, rso, aso) dihitung berdasarkan formula yang dimaksud dalam beberapa versi OMP [18-20] sebagai fungsi energi tumbuk dan/ atau jari-jari massa atom target.

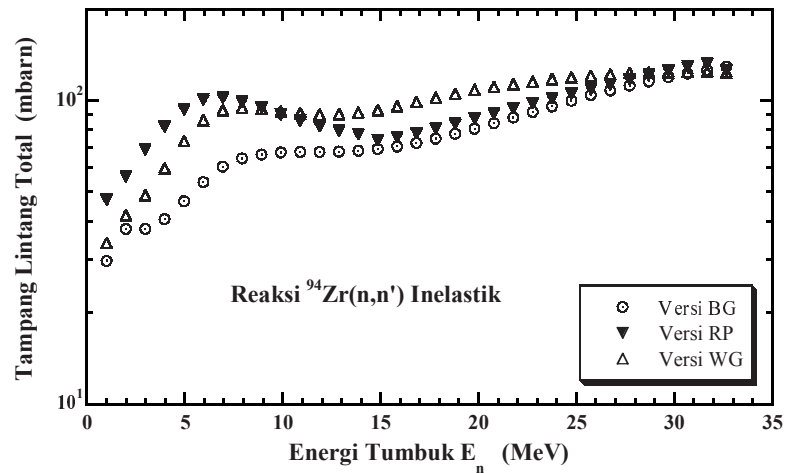
Untuk perhitungan spektrum tampang lintang distribusi energi, pada prinsipnya sama dengan kasus pertama tetapi sudut pandangnya sedikit berbeda. Dalam kasus ini, perhitungan difokuskan pada satu titik energi hambur yaitu  $E = 15.00$  (MeV), dan tampang lintang dihitung pada sejumlah titik energi hambur dengan interval 1 MeV. Perubahan harga energi hambur dalam perhitungan tersebut dinyatakan sebagai harga QV. Dalam hal ini, BE tetap nol.



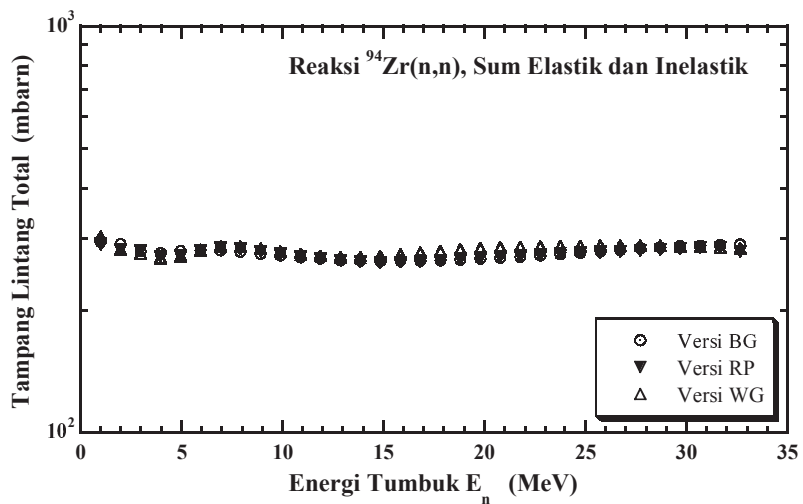
Gambar 2. Hasil perhitungan spektrum tampang lintang total untuk reaksi elastik (n,n) pada tumbukan neutron dengan  $^{94}\text{Zr}$  menggunakan kod DWUCK-4 dan parameter OMP versi Becchetti-Greenlees (BG), Rapaport (RP), dan Walter-Guss (WG).

Gambar 2 adalah hasil perhitungan spektrum tampang lintang total untuk reaksi elastik  $^{94}\text{Zr}(n,n)$  dengan rentang energi tumbuk (*incoming energy*)  $E_n = 1 \sim 35$  MeV menggunakan parameter OMP versi Becchetti-Greenlees, Rapaport dan Walter-Guss, masing-masing ditunjukkan oleh BG, RP, dan WG. Sumbu mendatar adalah energi tumbuk neutron dalam satuan MeV diplot dengan skala linear, sedangkan sumbu tegak adalah tampang lintang total dalam satuan *mbarn* dengan skala logaritmik. Gambar 3 adalah spektrum yang sama dengan Gambar 2 tetapi untuk reaksi inelastik (n,n'). Sedangkan Gambar 4 adalah spektrum tampang lintang total gabungan reaksi elastik dan inelastik.



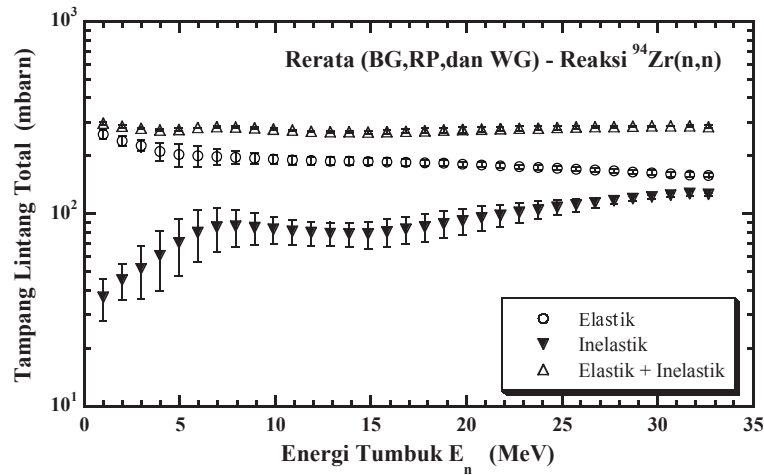


Gambar 3. Hasil perhitungan spektrumampang lintang total untuk reaksi inelastik (n,n') pada tumbukan neutron dengan <sup>94</sup>Zr menggunakan kod DWUCK-4

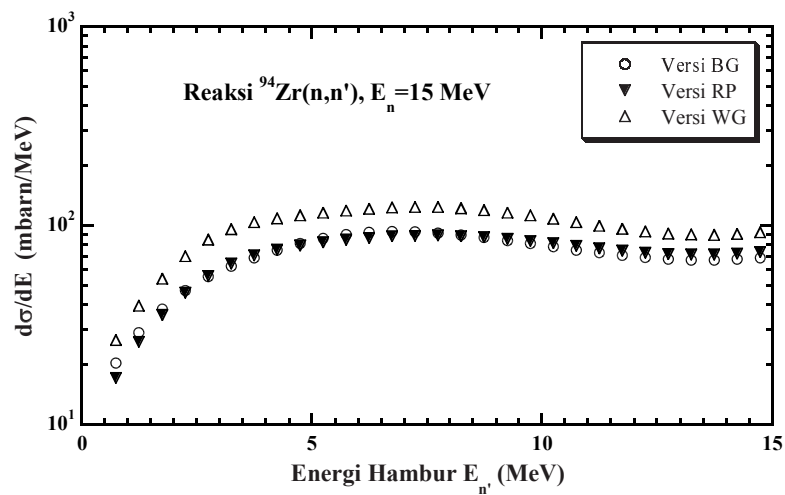


Gambar 4. Hasil penjumlahan spektrum pada Gambar 2 dan Gambar 3.

Gambar 5 adalah spektrum rerata untuk ketiga versi OMP pada Gambar 2, 3, dan 4. *Error bar* dihitung dari nilai simpangan baku dari ketiga spektrum. Gambar 6 adalah spektrumampang lintang distribusi energi, dengan sumbu tegak adalahampang lintang hamburan neutron dari reaksi <sup>94</sup>Zr(n,n) pada level energi tumbuk 15 MeV, dan sumbu mendatar energi hamburan neutron (*outgoing energy*). Spektrum dihitung menggunakan parameter OMP versi Becchetti-Greenlees, Rapaport, dan Walter-Guss, masing-masing ditunjukkan oleh lingkaran, segitiga terbalik hitam, dan segitiga kosong.



Gambar 5. Nilai rerata spektrum tampang lintang total reaksi tumbukan neutron  $^{94}\text{Zr}(n,n)$  dari tiga versi OMP yang berbeda (BG, RP, dan WG).



Gambar 6. Hasil perhitungan spektrum tampang lintang distribusi energi menggunakan 3 versi parameter OMP.

### Pembahasan

Hasil perhitungan DWUKC-4 untuk tampang lintang reaksi hamburan neutron dengan atom target  $^{94}\text{Zr}$  pada rentang energi tumbuk 1~35 MeV menggunakan parameter OMP versi Becchetti-Greenlees, Rapaport, dan Walter-Guss menunjukkan perbedaan yang cukup signifikan baik pada kurva elastik seperti Gambar 2, maupun kurva inelastik pada

Gambar 3. Secara umum perbedaan yang paling kompleks terlihat pada area energi rendah ( $1 \sim 14$  MeV), khususnya yang ditunjukkan oleh kurva inelastik versi Rapaport. Untuk area energi yang lebih tinggi ( $> 14$  MeV) perbedaan terlihat monoton hanya pada skala. Fakta yang berbeda terlihat pada kurva total hamburan (elastik + inelastik, gambar 4), yang menunjukkan konsistensi umum untuk ketiga versi OMP baik secara kuantitatif maupun kualitatif.

Trend kurva tampang lintang hamburan elastik yang semakin menurun seiring peningkatan energi tumbuk telah diprediksi dengan jelas oleh Pers. (13), di mana harga tampang lintang berbanding terbalik dengan harga energi tumbuk ( $E \sim k^2$ ). Sedangkan kurva tampang lintang reaksi hamburan inelastik diprediksi oleh Pers. (15) sebagai kombinasi kompleks antara energi tumbuk dan energi hambur, di mana secara hasil terlihat peningkatan harga tampang lintang seiring dengan kenaikan energi tumbuk ataupun energi hambur pada area energi rendah, tetapi kenaikan tersebut semakin melemah menuju stagnasi pada area energi (hambur atau tumbuk) tinggi setelah energi tumbuk 7,5 MeV dan energi hambur 5 MeV. Dari hasil perhitungan diketahui bahwa tampang lintang total reaksi hamburan elastik dan inelastik stagnan pada kisaran 300 mbarn.

Pada kurva inelastik area energi tumbuk hingga 8,7 MeV, kurva Rapaport berada di atas kurva Walter-Guss dan diikuti kurva Becchetti-Greenlees. Pada area energi 8,7~35 MeV, terjadi pergeseran posisi antara kurva Walter-Guss dan kurva Rapaport, sedangkan kurva Becchetti-Greenlees tetap berada paling bawah. Pada kurva elastik pada Gambar 2 juga terjadi pertukaran posisi antara kurva Rapaport dan kurva Walter-Guss pada titik 10,8 MeV di mana kurva Rapaport yang pada area rendah berada pada posisi paling bawah bergeser ke posisi kedua. Pada spektrum elastik ini kurva Becchetti-Greenlees berada paling atas di rentang energi 1~15 MeV. Pada kurva inelastik Becchetti-Greenlees terjadi diskontinuitas pada titik 2 MeV yang tidak ditemukan pada kurva versi lainnya, hal ini terjadi karena efek *switching* parameter (WV) pada area energi rendah.

Dari kurva ketiga versi OMP tersebut, meskipun terdapat perbedaan skala dan trend kurva tampang lintang, tetapi karena perbedaan ketiganya masih dalam rentang toleransi maka sulit untuk mengusulkan rekomendasi kurva versi tunggal. Untuk itu diambil nilai rerata dari ketiga kurva yang dirangkum dalam Gambar 5. *Error bar* pada masing-masing titik energi dihitung berdasarkan simpangan baku ketiganya.

Untuk spektrum tampang lintang distribusi energi reaksi yang sama dengan energi tumbuk 15 MeV seperti ditunjukkan dalam Gambar 6, ketiga versi OMP menunjukkan trend yang sangat mirip, terutama kurva Rapaport dan kurva Walter-Guss. Untuk kurva Becchetti-Greenlees, secara umum lebih tinggi rata-rata 1,6 kali lipat dibandingkan harga yang ditunjukkan baik oleh kurva Rapaport maupun kurva Walter-Guss. Untuk harga tampang lintang maksimum, ketiga versi OMP sepakat, berada pada kisaran energi hambur antara 7 dan 8 MeV.

Secara umum fraksi reaksi inelastik menunjukkan trend yang semakin meningkat seiring dengan kenaikan energi hambur, di sisi lain fraksi reaksi elastik menunjukkan trend yang semakin menurun. Sedangkan jumlah fraksi tampang lintang hamburan neutron elastik dan inelastik relatif stagnan terhadap perubahan energi hambur untuk rentang energi 1~35 MeV.

## KESIMPULAN

Telah dilakukan perhitungan tampang lintang reaksi  $^{94}\text{Zr}(n,n)$  menggunakan kod DWUCK-4 menggunakan parameter OMP versi Becchetti-Greenlees, Rapaport, dan Walter-Guss.

Dengan mengaplikasikan perhitungan berulang kali untuk rentang energi tumbuk 1 ~ 15 MeV berhasil diperoleh spektrum tampang lintang total reaksi elastik (n,n) dan reaksi inelastik (n,n') untuk ketiga versi OMP tersebut. Ketiga versi OMP tersebut menghasilkan trend kurva tampang lintang total baik reaksi elastik maupun inelastik secara umum sama, tetapi terjadi pertukaran posisi antara kurva versi Rapaport dan Walter-Guss pada titik 8,7 MeV dan 10,8 MeV, masing-masing untuk reaksi inelastik dan elastik. Dari ketiga versi tersebut, kurva Becchetti-Greenlees berada pada posisi paling bawah untuk reaksi inelastik, dan paling atas untuk reaksi elastik. Untuk kurva gabungan reaksi elastik dan inelastik, ketiga versi OMP menunjukkan kesamaan secara umum.

Dengan mengaplikasikan perhitungan berulang kali untuk rentang energi hambur, yang di dalam parameter DWUCK-4 diakomodasi oleh harga QV berhasil diperoleh spektrum tampang lintang distribusi energi untuk reaksi  $^{94}\text{Zr}(n,n)$  dengan energi tumbuk 15 MeV menggunakan parameter OMP Becchetti-Greelees, Rapaport, dan Walter-Guss. Penggunaan parameter OMP versi Rapaport menunjukkan hasil perhitungan yang sangat dekat dengan versi Walter-Guss. Dari segi trend kurva, ketiga OMP menunjukkan kesamaan secara umum. Untuk energi tumbuk 15 MeV, harga tampang lintang maksimum berada pada energi hambur dengan kisaran 7 hingga 8 MeV.

## DAFTAR PUSTAKA

1. P.D. Kunz. WUCK-4, a DWBA reaction code. University of Colorado, Boulder, Colorado 1987. Unpublished.
2. J. Raynal. Perspectives on nuclear data for the next decade. *DWBA05 Proceedings of the P(ND)<sup>2</sup> Workshop Bruyeres-le-Chatel*. Perancis; 26-28 September 2005.
3. A.J. Koning *et al.* TALYS-1.2 A nuclear reaction program. User Manual; 22 Desember 2009.
4. Syafarudin. Analisis spektrum tampang lintang reaksi langsung untuk perhitungan neutronik reaktor generasi lanjut. Prosiding seminar nasional pengembangan energi nuklir. Jakarta; 25 Juni 2009.
5. Syafarudin. Continuum spectra in one-nucleon transfer reactions --- (p,d) reactions at medium energy region. *J. Nucl. Sci. and Technol. Suppl 2002*; Vol. 1: 377.
6. S.A. Sultana *et al.* Analysis of continuum spectra of (n,d) reactions with direct reaction model. *Proceedings of the 2003 symposium on nuclear data (JAERI-Conf 2003-005)*; 2003..
7. S.A. Sultana *et al.* Continuum spectra analysis of (p,d) and (n,d) reactions on bi in several tens of mev energy region. *Proceedings of the 2004 Symposium on Nuclear Data (JAERI-Conf 2005-005)*; 2005:p. 143
8. F. Salvat. Optical-model potential for electron and positron elastic scattering by atoms. *Phys. Rev.* 2003; A 68: 012708.
9. A.S. Kheifets *et al.* DWBA-G calculations of electron impact ionization of noble gas atoms. *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 2008;41: 145201
10. A. Jablonski dan C.J. Powell, *Surf. Sci.* 2000; 463: 29.

11. I. Ahmad *et al.* Optical model potential of 800 mev/c  $k^+$ -meson for  $^{12}\text{C}$  and  $^{40}\text{Ca}$  by the method of inversion. *Pramana - J. Phys.* 2005; 65: 523
12. A.A. Ebrahim dan S.A.E. Khallaf, *Phys. Rev.* 2002; C 66: 044614
13. H.F. Arellano dan H.V. von Geramb. Microscopic analysis of  $k^+$ -nucleus elastic scattering based on  $k^+$ -nucleon phase shifts. *Phys. Rev.* 2005; C 72: 025203.
14. E.Sh. Soukhovitskii *et al.*, *Phys. Rev.* 2005; C 72: 024604.
15. C.A. Bertulani, C.M. Campbell, and T. Glasmacher. A computer program for nuclear scattering at intermediate and high energies. *Comp. Phys. Comm.* 2003; p. 152- 317.
16. T. Belgya *et al.*. Handbook for calculations of nuclear reaction data. Reference Input Parameter Library-2. IAEA-TECDOC-1506; 2006.
17. R. Capote *et al.* A general numerical solution of dispersion relations for the nuclear optical model. *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* 2001; 27: B15.
18. F.D. Becchetti, Jr. dan G.W. Greenlees. Nucleon-nucleus optical-model parameters,  $A > 40, E < 50 \text{ MeV}$ . *Phys. Rev.*, 1969; vol.182: 1190.
19. R.L. Walter and P.P. Guss. Nuclear data for basic and applied science. Gordon and Breach Press 1986; vol.2: 1079.
20. J. Rapaport *et al.*, *Nucl. Phys.* 1979; A330: 15.