

TRANSMISI NEUTRON OLEH PERAJANG DENGAN CELAH BERBENTUK PARABOLA

R.S. Lasijo, T. Siagian, S.L.M. Wattimena
Pusat Penelitian Teknik Nuklir - Badan Tenaga Atom Nasional

ABSTRAK

TRANSMISI NEUTRON OLEH PERAJANG DENGAN CELAH BERBENTUK PARABOLA. Suatu perajang berkas partikel untuk neutron dengan celah berbentuk cerutu atau parabola dibahas secara sederhana dengan anggapan bahwa bahan terbuat dari penyerap neutron total atau penyerap sempurna. Perajang dengan rotor yang mempunyai kecepatan sudut tetap menghasilkan lintasan neutron yang berbentuk parabola dalam sistem rotor ini. Dari lintasan yang berbentuk parabola ini dapat dihitung energi *cut-off* atau energi minimum neutron yang ditransmisikan oleh perajang, energi transmisi dan energi kritis yaitu energi di atas mana semua neutron dapat ditransmisikan. Selanjutnya didapatkan bahwa transmisi neutron oleh perajang tergantung pada ukuran celah, jari-jari rotor, kecepatan putar rotor, dan energi neutron.

ABSTRACT

NEUTRON TRANSMISSION BY CHOPPER WITH PARABOLIC SLIT. A particle beam chopper for neutrons with cigar shape or parabolic slit is discussed by simply assuming that it is made of materials with total or complete neutron absorption. Chopper with constant angular velocity results in parabolic trajectories for neutron with respect to the rotor system. From the parabolic trajectories it can be determined cut-off or minimum energy that neutrons can be transmitted by chopper, transmission energy, and critical energy above which all neutrons can be transmitted. It can be further found out that transmission of neutrons by chopper depends on size of the slit, radius of rotor, rotation of rotor, and energies of neutrons.

PENDAHULUAN

Neutron yang ditemukan oleh Chadwick pada tahun 1932 [1] adalah merupakan partikel yang tidak bermuatan dan merupakan salah satu komposit yang membentuk inti atom di samping proton. Segera setelah ditemukan, neutron telah menunjukkan sebagai partikel yang serba guna. Karena tidak bermuatan, neutron mudah menembus ke dalam bahan sampai kepada inti atomnya, sehingga neutron dapat dipakai untuk meneliti struktur inti atom bahan. Karena neutron juga mempunyai massa yang sangat kecil, sifat gelombangnya mudah diamati dan dapat dimanfaatkan, antara lain untuk meneliti struktur kristal bahan, dan karena neutron mempunyai *spin intrinsik* yang besarnya maka neutron juga dapat dipakai untuk meneliti struktur magnetik bahan.

Penemuan proses fisi pada tahun 1938 oleh Hahn dan Strassman [2] menempatkan neutron sebagai partikel yang sangat penting dalam pembangkitan energi. Bahkan dalam proses fusi atau proses termonuklir yang dianggap sebagai sumber energi pada masa yang akan datang peranan neutron tidak dapat diabaikan.

Di sisi lain interaksi neutron dengan bahan sulit untuk diramalkan ataupun dianalisis atas dasar teori yang murni. Misalkan tampak lintang suatu reaksi neutron dengan bahan, sangat tergantung kepada energi neutron maupun bahannya, bahkan sering walaupun selisih energinya tidak begitu besar telah terjadi perubahan harga yang sangat menyolok. Karena data-data neutron sangat dibutuhkan di dalam disain, analisis maupun keselamatan yang berhubungan dengan energi nuklir, maka perlu dilakukan pengumpulan data yang banyak dan teliti secara eksperimental. Dalam pengukuran secara eksperimental yang paling kritis adalah pengukuran energi neutron. Karena neutron tidak bermuatan maka cara yang lazim dipergunakan untuk mengukur energi seperti yang dilakukan terhadap partikel bermuatan dengan menggunakan medan magnet dan *nuclear magnetic resonance* (NMR) tidak dapat dilakukan. Salah satu cara yang cukup teliti untuk mengukur energi neutron adalah dengan mengukur waktu terbang atau *time of flight* (TOF), yaitu mengukur waktu yang diperlukan oleh neutron untuk menempuh suatu jarak tertentu. Bila

jarak yang ditempuh L dan waktu yang diperlukan untuk menempuh jarak tersebut t diketahui maka kecepatannya v dapat ditentukan. Bila kecepatannya diketahui maka energinya dapat dihitung dengan rumus $E = 1/2 mv^2$, dengan m = massa neutron.

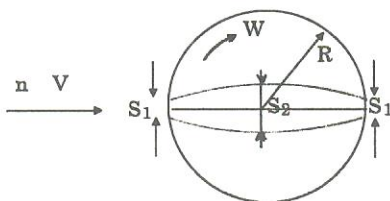
Pengukuran dengan cara TOF ini akan menjadi lebih sederhana bilamana arus neutron yang diukur berbentuk pulsa. Neutron yang berasal dari reaktor nuklir pada umumnya berupa berkas yang kontinu. Supaya sumber neutron ini menjadi sumber yang berbentuk pulsa maka berkas neutron yang kontinu dilewatkan pada suatu alat yang disebut perajang berkas partikel (particle beam chopper). Perajang ini dapat bermacam-macam, yang paling banyak dipakai berbentuk silinder yang diberi lubang dan dapat diputar pada sumbunya. Dengan diputarnya silinder yang berlubang tersebut maka jalan partikel akan bergantian membuka dan menutup sehingga berkas yang kontinu setelah melewati perajang akan berbentuk pulsa-pulsa.

Lubang atau celah tempat neutron lewat dapat bermacam-macam bentuknya. Yang paling sederhana adalah yang berbentuk lurus, membuatnya mudah, tetapi dianggap kurang efisien karena transmisinya kecil. Bentuk celah yang lain adalah bentuk parabola atau bentuk cerutu. Bentuk parabola ini sesuai dengan bentuk lintasan neutron di dalam sistem rotor perajang yang berputar sehingga mempunyai efisiensi yang cukup baik.

Dalam bab-bab berikut akan dibahas perajang berkas neutron dengan celah yang berbentuk cerutu ini dengan anggapan-anggapan yang paling sederhana yaitu berkas neutron yang datang berbentuk berkas neutron yang sejajar, bahan perajang dibuat dari bahan penyerap neutron total, dan lintasan neutron yang dibahas berada di dalam dan di sekitar celah perajang saja.

ENERGI MINIMUM (CUT-OFF)

Misalkan sebuah neutron dengan kecepatan v bergerak memasuki celah sebuah rotor



Gambar 1. Gerak sebuah neutron terhadap rotor

dari suatu alat perajang partikel yang berbentuk cerutu seperti terlihat pada Gambar 1.

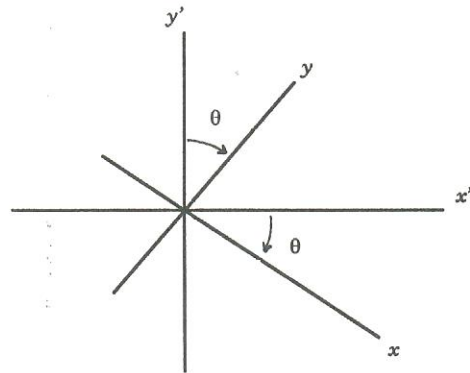
Rotor yang berjari-jari R berputar pada porosnya dengan kecepatan sudut tetap w . Diameter celah pada kedua tepinya besarnya S_1 dan pada pusatnya besarnya S_2 .

Bila sistem laboratorium (lab) dimana neutron bergerak disebut $x'y'$ dan sistem rotor yang berputar disebut xy , dengan pusat kedua sistem koordinat dipilih terletak pada pusat rotor, maka hubungan antara sistem lab dan sistem rotor dapat ditulis

$$x' = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (1)$$

$$y' = -x \sin \theta + y \cos \theta \quad (2)$$

dengan θ sudut antara sistem $x'y'$ dan sistem xy seperti tertera pada Gambar 2.



Gambar 2. Hubungan sistem koordinat $x'y'$ (lab) dan sistem koordinat

Karena celah pada umumnya dibuat berukuran kecil bila dibandingkan dengan ukuran jari-jari rotor R , maka sudut juga berukuran kecil. Untuk sudut yang kecil persamaan (1) dan (2) dapat ditulis

$$x' = x + y' \theta \quad (1')$$

$$y' = -x \theta + y' \quad (2')$$

Transformasi inversi dari persamaan (1') dan (2'), yaitu hubungan xy sebagai fungsi dari $x'y'$, adalah

$$x = x' - y' \theta \quad (3)$$

$$y = x' \theta + y' \quad (4)$$

Dalam sistem koordinat lab, lintasan neutron berbentuk garis lurus dan dapat dinyatakan sebagai

$$y' = \alpha x' + b \quad (5)$$

Bila neutron pada waktu melewati ordinat y' berada pada posisi sudut θ_0 , maka pada saat neutron berada pada posisi x' , posisi sudut θ dapat ditulis

$$\theta = \theta_0 + \frac{w}{v} x' \quad (6)$$

Karena sudut θ kecil serta sumbu x' dan sumbu x dapat dianggap sejajar, maka secara aproksimasi dapat pula ditulis

$$\theta = \theta_0 + \frac{w}{v} x \quad (7)$$

Dari persamaan (5) dan (3) diperoleh

$$\begin{aligned} x &= x' - (\alpha x' + b) \theta \\ &= x' (1 - \alpha) - b \theta \end{aligned} \quad (8)$$

Bila lintasan neutron diambil sejajar dengan sumbu x' maka harga α akan dapat diabaikan terhadap 1 sehingga persamaan (8) dapat ditulis

$$x = x' - b\theta \quad (8')$$

dan membandingkan persamaan (8') dengan persamaan (3) didapat

$$y' = b \quad (9)$$

Bila harga-harga x' dan y' dari persamaan (8') dan (9) dimasukkan ke dalam persamaan (4) didapat

$$y = x\theta + b\theta^2 + b \quad (10)$$

Masukkan harga θ pada persamaan (7) ke dalam persamaan (10), dengan mengabaikan harga-harga yang relatif kecil didapat

$$y = \left(b \frac{w^2}{v^2} + \frac{w}{v} \right) x^2 + \theta_0 \left(1 + 2b \frac{w}{v} \right) x + b \quad (11)$$

Persamaan (11) tidak lain adalah persamaan sebuah parabola. Kecepatan tangensial rotor pada tepi celah adalah

$$v_T = R_w \quad (12)$$

Pada umumnya $\frac{v_T}{v} < 1$ maka

$$\frac{R_w}{v} \ll 1 \text{ atau } \frac{w}{v} \ll 1 \quad (13)$$

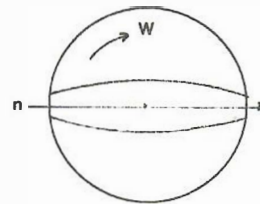
Bila perputaran rotor dan kecepatan neutron diambil positif maka didapatkan

$$\frac{w}{v} \gg \frac{w^2}{v^2} \quad (14)$$

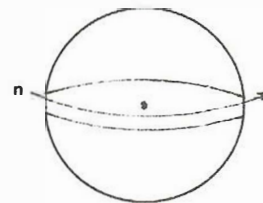
Karena b juga berukuran kecil maka dari persamaan (14) didapat

$$b \frac{w^2}{v^2} + \frac{w}{v} > 0 \quad (15)$$

Persamaan (15) menunjukkan bahwa lintasan neutron bila dipandang dari sistem celah rotor berupa parabola yang memiliki harga ekstrim berbentuk harga minimum. Jadi neutron yang dalam sistem lab berbentuk lurus (lihat Gambar 3a) maka dalam sistem rotor berbentuk parabola dengan titik minimum di tengah rotor (lihat Gambar 3b).



Gambar 3a. Sistem lab ($x'y'$)



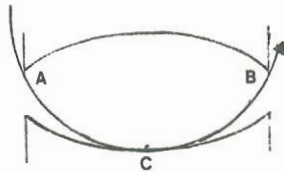
Gambar 3b. Sistem rotor (xy)

Gambar 3. Lintasan neutron dalam sistem lab (a) dan sistem rotor (b).

Persamaan parabola secara umum dalam sistem rotor dapat ditulis berbentuk

$$y = Ax^2 + Bx + C \quad (16)$$

Neutron-neutron yang ditransmisikan adalah neutron-neutron yang dapat melewati celah rotor. Supaya dapat melewati celah neutron harus memiliki kecepatan minimum sedemikian rupa sehingga bila pada waktu memasuki celah neutron berada pada pinggiran celah di A maka waktu keluar berada di pinggiran celah yang lain B (lihat Gambar 4), sedangkan pada waktu berada di tengah-tengah celah neutron berada di titik terbawah C.



Gambar 4. Lintasan neutron dengan kecepatan minimum untuk transmisi.

Persamaan (16) dengan syarat-syarat batas tersebut di atas akan diperoleh

$$A = \frac{S_2 + S_1}{2R^2}; B = -\frac{S_2 + S_1}{2R}; C = \frac{1}{2} S_1 \quad (17)$$

Maka persamaan (16) dapat ditulis

$$y = \frac{S_2 + S_1}{2R^2} x^2 - \frac{S_2 + S_1}{2R} x + \frac{1}{2} S_1 \quad (18)$$

Membandingkan persamaan (18) dengan persamaan (11) didapat kecepatan minimum

$$v_M = \frac{2wR^2}{S_2 + S_1} \quad (19)$$

sehingga didapat energi minimum atau sering disebut energi *cut-off*:

$$E_c = \frac{1}{2} m V_M^2 = \frac{2m\omega^2 R^4}{(S_2 + S_1)^2} \quad (20)$$

dengan m massa dari neutron.

Karena kecepatan sudut dari rotor

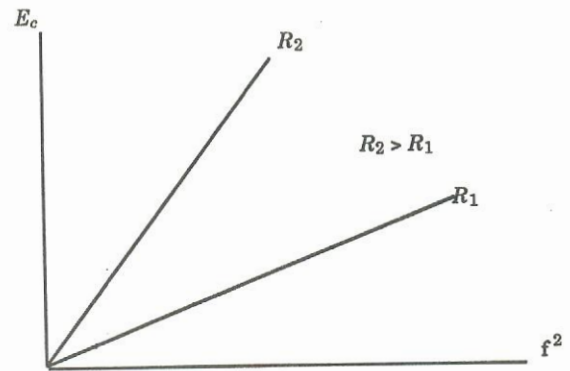
$$\omega = 2\pi f \quad (21)$$

dengan f frekuensi atau besarnya putaran rotor, maka energi *cut-off* bila diplot terhadap f^2 akan berbentuk garis lurus dengan kemiringan

$$\alpha = \frac{8m\pi^2 R^4}{(S_2 + S_1)^2} \quad (22)$$

Persamaan (22) menunjukkan bahwa jari-jari rotor dan lebar celah mempengaruhi kecepatan energi *cut-off* terhadap perubahan putaran rotor. Gambar 5 menunjukkan plot dari

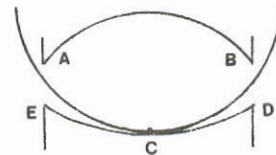
energi *cut-off* terhadap f^2 dengan jari-jari R_1 dan R_2 ($=2R_1$).



Gambar 5. Plot energi E_c terhadap frekuensi pangkat dua.

ENERGI KRITIS

Untuk neutron-neutron yang memiliki energi di atas suatu energi tertentu yang disebut energi kritis E_k , semuanya akan dapat ditransmisikan oleh perajang. Energi kritis ini terjadi bila pada waktu memasuki celah neutron tepat berada pada titik A, maka pada waktu berada di tengah celah berada di titik C, dan pada waktu meninggalkan celah berada di titik D (lihat Gambar 6).



Gambar 6. Lintasan neutron untuk energi kritis.

Bila syarat-syarat batas ini dimasukkan ke dalam persamaan (16) akan diperoleh harga-harga:

$$A = \frac{S_2 - S_1}{2R^2}; B = \frac{S_2 - S_1}{2R}; C = \frac{1}{2} S_1 \quad (23)$$

Persamaan (16) menjadi

$$y = \frac{S_2 - S_1}{2R^2} x^2 - \frac{S_2 - S_1}{R} x + \frac{1}{2} S_1 \quad (24)$$

Membandingkan persamaan (22) dan persamaan (11) didapat kecepatan kritis

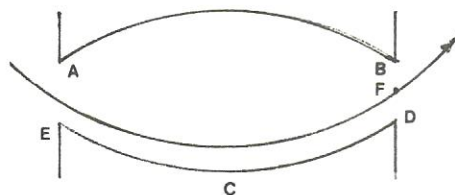
$$v_K = \frac{2 w R^2}{S_2 - S_1} \quad (25)$$

dan energi kritis

$$E_K = \frac{2 m w^2 R^4}{(S_2 - S_1)^2} \quad (26)$$

ENERGI TRANSMISI

Di samping energi *cut-off* dan energi kritis didefinisikan pula energi transmisi yaitu energi yang berada di antara kedua energi tersebut. Syarat-syarat batas energi transmisi ini adalah bila neutron pada waktu masuk celah berada pada titik E maka pada waktu sampai di tengah celah berada pada titik C, dan pada waktu meninggalkan celah berada pada titik tengah celah F (lihat gambar 7)



Gambar 7. Lintasan neutron untuk energi transmisi.

Dari syarat-syarat batas ini didapatkan harga-harga A, B, dan C dari persamaan (16), yaitu

$$A = \frac{2 S_2 - S_1}{4R^2}; B = -\frac{4 S_2 - 3S_1}{4R}; C = -\frac{1}{2} S_1 \quad (27)$$

sehingga persamaan (16) dapat ditulis menjadi

$$y = \frac{2S_2 - S_1}{4R^2} x^2 - \frac{4 S_2 - 3S_1}{4R} x - \frac{1}{2} S_1 \quad (28)$$

Membandingkan persamaan (2b) dengan persamaan (11) didapat kecepatan transmisi

$$v_T = \frac{4 w R^2}{2S_2 - S_1} \quad (29)$$

dan energi transmisi

$$E_T = \frac{8 m w^2 R^4}{(2S_2 - S_1)^2} \quad (30)$$

TRANSMISI NEUTRON OLEH PERAJANG

Pada pembahasan dalam bab yang terdahulu telah diambil anggapan bahwa bahan rotor terdiri dari penyerap neutron total artinya semua neutron yang mengenai bahan rotor akan diserap oleh bahan sehingga hanya neutron-neutron yang tidak menumbuk bahan saja yang dapat ditransmisikan oleh perajang. Anggapan ini tetap dipakai dalam bab ini. Anggapan lain adalah bahwa berkas neutron terdiri dari arus neutron yang mempunyai lintasan yang sejajar, jadi semua neutron dalam sistem lab bergerak dalam lintasan yang berupa garis lurus dan sejajar satu sama lain.

Transmisi $T(E)$ yang merupakan fungsi dari energi neutron E oleh perajang yang mempunyai celah berbentuk cerutu dengan diameter pinggir sebesar S_1 dan diameter pusat celah sebesar S_2 dapat dinyatakan sebagai berikut [3]:

$$T(E) = \frac{8}{3} T_1^2 - 8 T_1 + \frac{16}{3} \sqrt{T_1} \text{ untuk } E_C < E < E_T$$

$$T(E) = 1 - \frac{8}{3} T_1^2 \text{ untuk } E_T < E < E_K$$

dengan

$$T_1 = \sqrt{\frac{m}{2E}} \frac{wR^2}{S_1} - \frac{S_2 - S_1}{2S_1} \quad (31)$$

PERHITUNGAN DAN PEMBAHASAN

Perhitungan telah dilakukan dengan menggunakan harga-harga sebagai berikut

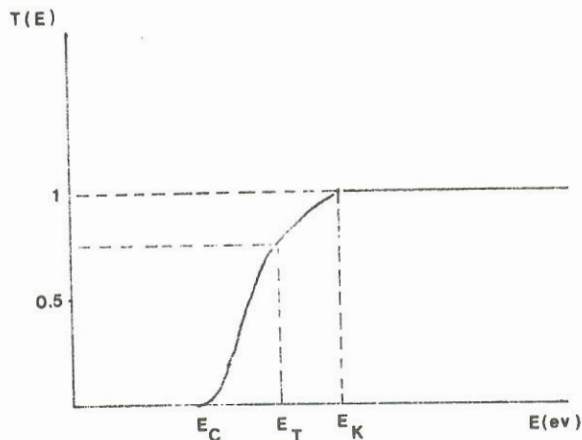
$$S_1 = 0,02 \text{ cm}$$

$$S_2 = 0,10 \text{ cm}$$

$$R = 15,80 \text{ cm}$$

$$\text{dan } f = 5000 \text{ cm}$$

Plot dari $T(E)$ terhadap energi neutron E tertera pada Gambar 8, dengan $E_C = 2.48 \text{ eV}$, $E_T = 4.41 \text{ eV}$ dan $E_K = 5.59 \text{ eV}$.



Gambar 8. Plot transmisi $T(E)$ terhadap energi neutron E .

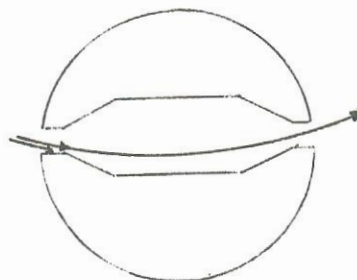
Kurva dengan bentuk yang sama telah pula diperoleh untuk perputaran rotor yang berbeda yaitu $f = 6000, 8000,$ dan 12000 rpm, dengan E_C, E_T dan E_K seperti ditunjukkan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Harga-harga E_C, E_T dan E_K untuk beberapa harga f .

f	2250	5000	6000	8000	12000
E_C (eV)	0,50	2,48	3,57	6,35	14,28
E_T (eV)	1,10	4,41	6,35	11,29	25,40
E_K (eV)	1,13	5,58	8,04	14,29	32,15

Untuk celah yang bentuknya tidak tepat berbentuk parabola, misalnya berbentuk seperti pada Gambar 9, maka neutron yang datang dekat pada pinggiran celah sebelah bawah, tidak akan dapat ditransmisikan karena diserap oleh bahan, akibatnya jumlah transmisinya akan lebih kecil.

Sebaliknya bila bahan bukan terbuat dari penyerap neutron total, yang sering disebut penyerap kelabu, maka sebagian neutron yang



Gambar 9. Lintasan neutron dengan celah tidak berbentuk parabola

mengenai bahan rotor masih dapat melewati celah sehingga intensitas neutron yang ditransmisikan akan lebih besar.

Anggapan penyerap kelabu sebenarnya mendekati keadaan yang sebenarnya karena di sini tampang lintang reaksi neutron terhadap bahan harganya berhingga. Tetapi perhitungannya menjadi sangat kompleks karena tampang lintang reaksi sangat tergantung pada energi neutron, dan perlu pula diketahui geometri celah yang teliti, demikian juga susunan bahan dari rotornya secara terperinci.

KESIMPULAN

Dari pembahasan pada bab yang terdahulu telah ditunjukkan bahwa analisis transmisi neutron oleh perajang dengan celah yang berbentuk cerutu menjadi sangat sederhana bila dipergunakan anggapan bahwa bahan rotor terbuat dari penyerap total dan lintasan berbentuk parabola. Hasilnya pun cukup memadai untuk perancangan dan pembuatan suatu perajang untuk menghasilkan suatu sumber neutron yang berbentuk pulsa yang diambil dari reaktor nuklir.

DAFTAR PUSTAKA

1. J. Chadwick, Proc. Roy. Soc. (London), A 136 (1932) 692.
2. O. Hahn and F. Strassman, Naturwissenschaften 26(1938)755.
3. Asmussen and H.G. Priesmeyer, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A249(1986)148.