

PERHITUNGAN SENSITIVITAS ANALISIS PIXE 150 keV

Darsono

Puslibang Teknologi Maju, BATAN

ABSTRAKS

PERHITUNGAN SENSITIVITAS ANALISIS PIXE 150 keV. Proton Induced X-ray Emission (PIXE) merupakan teknik analisis unsur yang ampuh yaitu multi unsur, tak merusak, sensitivitas tinggi, dan cepat. Teknik PIXE yang ada sekarang ini umumnya menggunakan energi proton tinggi (orde 2-4 MeV). Dengan energi proton tersebut maka teknik PIXE secara ekonomis tidak dapat bersaing dengan teknik analisis yang semisal keampuhannya. Dari kajian dua literatur menerangkan bahwa cacah latar untuk PIXE energi 300 keV dan 500 keV lebih baik namun batas deteksinya lebih rendah. Dalam rangka mengoptimalkan penggunaan fasilitas akselerator ion 150 kV di P3TM dan dalam rangka penguasaan teknologi analisis menggunakan akselerator maka perlu dilakukan litbang teknologi PIXE energi rendah. Pada penelitian ini dilaporkan bahwa telah dilakukan perhitungan sensitivitas PIXE pada energi proton 150 keV secara simulasi untuk unsur-unsur dari Z=14 sampai dengan Z=50 yang diidentifikasi menggunakan sinar X garis K_{α} . Parameter simulasi meliputi efisiensi detektor, muatan proton dan berat sampel, Dari hasil perhitungan diperoleh bahwa sensitivitas PIXE pada energi 150 keV puluhan kali lebih rendah dibandingkan dengan sensitivitas PIXE pada energi 4 MeV.

ABSTRACT

THE SENSITIVITY CALCULATION OF LOW ENERGY PIXE OF 150 keV. Proton induced X-ray Emission (PIXE) is a powerful tool for multi elemental, nondestructive, fast, and high sensitivity analysis. Nowadays PIXE technique commonly uses proton energy in the order of 2-4 MeV. By using this energy the PIXE technique can not be economically competitive with other analytical techniques which have the same capabilities. Literature study shows that low energy PIXE (300 keV and 500 keV) has better background but higher limit of detection. In the frame work of the optimization of 150 keV accelerator of the R&D Centre for Advanced Technology and of the assessment of analytical technique using accelerator, therefore the R&D of the low PIXE technology is needed. In this research, the sensitivity of 150 keV PIXE has been calculated by simulating for the elements of Z=14 to Z=50. Simulated parameters are detection efficiency, proton charge, and sample weight. The result shows that the sensitivity of 150 keV PIXE is tens order lower than that of 4 MeV PIXE.

PENDAHULUAN

Proton Induced X-ray Emission (PIXE) merupakan teknik analisis unsur yang ampuh yaitu multi unsur, tak merusak, sensitivitas tinggi, dan cepat^[1]. Teknik PIXE yang ada sekarang ini umumnya menggunakan proton energi tinggi (> 2 MeV). Dengan energi proton tersebut maka teknik PIXE secara ekonomis tidak dapat bersaing dengan teknik analisis yang semisal keampuhannya. Misal apabila keunggulan tak merusak tidak dibandingkan maka teknik PIXE secara ekonomi kalah dengan teknik AAS, ICP, dan gas kromatografi.

Beberapa peneliti telah mengembangkan PIXE energi rendah ($E < 1$ MeV)^[2,3]. Szegedi

telah berhasil mengembangkan PIXE pada energi proton 200 keV^[2]. Harsoyo^[3] telah melakukan pengukuran sampel batuan geologi menggunakan PIXE energi 350 keV dan 2500 keV. Dari hasil penelitiannya ternyata menunjukkan bahwa cacah latar untuk PIXE energi rendah lebih baik namun batas deteksinya lebih rendah.

Dalam rangka mengoptimalkan penggunaan fasilitas akselerator ion 150 kV di P3TM dan dalam rangka penguasaan teknologi analisis menggunakan akselerator maka perlu dilakukan litbang teknologi PIXE energi rendah. Tujuan penelitian ialah mengkaji PIXE energi rendah dan menghitung sensitivitas PIXE untuk energi 150 keV dengan sasaran untuk mendapatkan gambaran kelayakan sistem PIXE 150 keV yang

akan dikembangkan dari akselerator ion yang ada. Sensitivitas adalah kuantitas sinyal sinar X tiap satuan massa unsur tiap satuan kuantitas muatan berkas. Juga sering didefinisikan sebagai kuantitas sinyal sinar X tiap satuan konsentrasi tiap satuan kuantitas muatan berkas. Dalam makalah ini dilaporkan hasil penelitian pengkajian dan perhitungan sensitivitas PIXE pada energi proton 150 keV secara simulasi untuk unsur-unsur dari $Z = 14$ sampai dengan $Z = 50$ yang diidentifikasi menggunakan sinar X garis $K_{\alpha 1}$. Parameter simulasi meliputi efisiensi detektor, muatan proton dan berat sampel, Untuk komparasi dilakukan pula perhitungan sensitivitas PIXE pada energi 4 MeV.

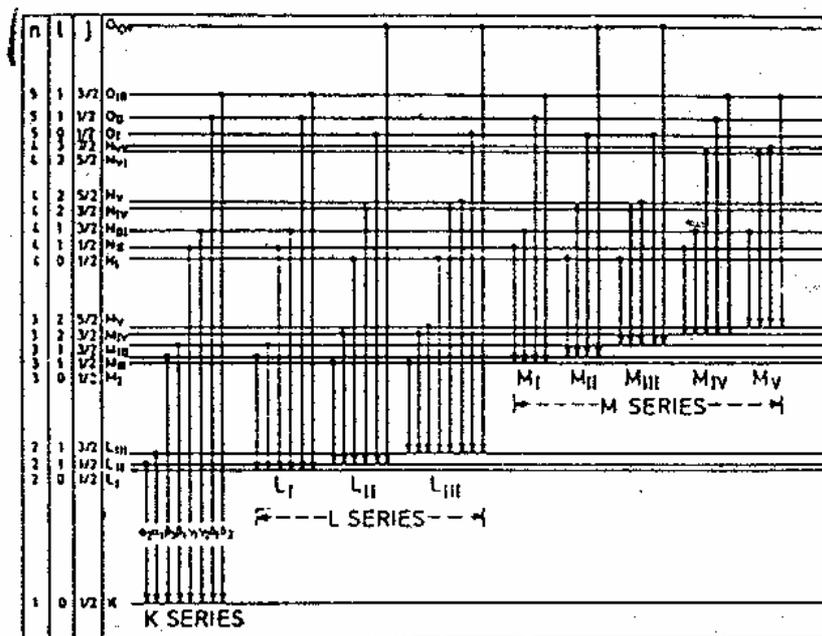
TEORI PIXE (*Proton Induced X-rays Emission*)

Produksi Sinar X

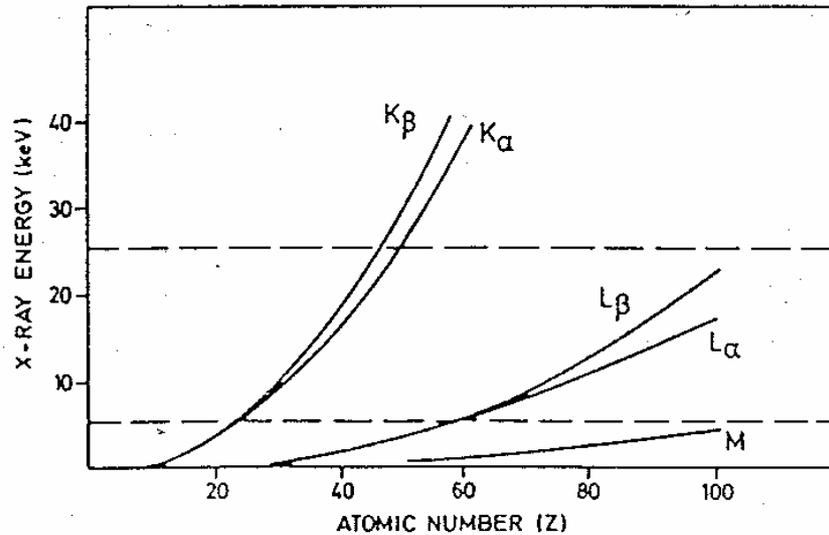
Interaksi proton dengan suatu atom bahan dapat menciptakan lowongan (*vacancy*) elektron pada kelopak atom-bagian dalam melalui proses eksitasi Coulomb sehingga

mengakibatkan atom dalam keadaan terionisasi. Pada atom terionisasi ini akan terjadi transisi elektron dari kelopak atom bagian luar ke kelopak atom bagian dalam disertai pancaran sinar X karakteristik suatu atom bahan. Pancaran sinar X karakteristik dapat terdiri dari spektrum garis K, L, M yang berhubungan dengan transisi elektron ke kelopak K, L, M atom bahan. Gambar 1 memperlihatkan transisi elektron garis K dan L pada diagram tingkat energi atom sedangkan Gambar 2 memperlihatkan ketergantungan sinar X karakteristik terhadap nomor atom^[1].

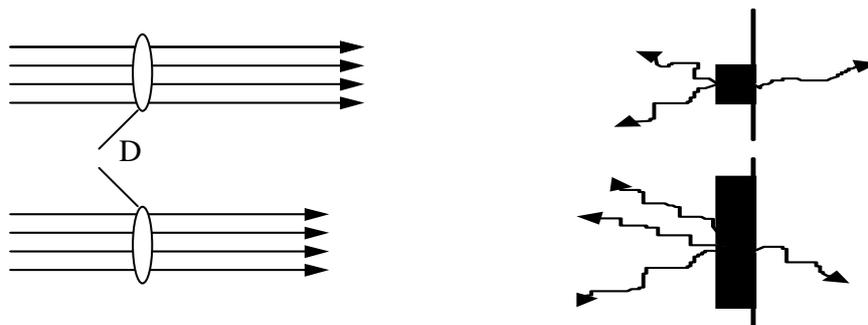
Fraksi pancaran sinar X karakteristik pada masing-masing transisi tersebut disebut hasil pendaran (*fluorescence yield*). Produksi intensitas sinar X berbanding langsung dengan perkalian tampang lintang ionisasi dan hasil pendaran. Jumlah atom dalam bahan berbanding langsung dengan intensitas sinar X karakteristik atom tersebut. Dengan demikian jika intensitas sinar X karakteristik suatu atom dapat diukur maka jumlah atom di dalam bahan dapat ditentukan.



Gambar 1. Skema transisi sinar X yang diperbolehkan pada diagram tingkat energi atom.



Gambar 2. Ketergantungan energi sinar X garis K dan L terhadap nomor atom.



Gambar 3. Skematik PIXE cuplikan tipis dengan dua keadaan cuplikan yang berbeda dengan tampak lintang berkas proton sama.

Formulasi PIXE Untuk Cuplikan Tipis :

Pengertian **tipis** ialah bahwa energi proton ketika mempenetrasi cuplikan tidak banyak yang hilang juga sinar-X tidak banyak teratenuasi. Hasil sinar X karakteristik suatu unsur dalam cuplikan ditentukan oleh tampak lintang ionisasi pada energi proton datang E_0 . Jadi pengertian tipis disini sangat tergantung energi proton dan matrik cuplikan yang akan menentukan berkurangnya energi proton dan atenuasi sinar X. Sebagai contoh untuk cuplikan dengan matrik Karbon yang dapat mewakili cuplikan biologi, jika dikehendaki degradasi energi 1% pada $E = 2,5 \text{ MeV}$ maka diperlukan tebalnya cuplikan sekitar $0,1 \text{ mg/cm}^2$. Umum-

nya tebal sampel standar terdiri dari lapisan sangat tipis ($20 - 50 \mu\text{g/cm}^2$) unsur-unsur atau komponen yang dievaporasikan ke *Mylar foil* atau *Nuclepore filter*

Tinjau Gambar 3, pada gambar yang atas cuplikan tipis dengan massa suatu unsur M dilingkupi seluruhnya oleh berkas proton yang intensitasnya homogen dengan diameter D sedangkan gambar yang bawah hanya sebagian. Oleh karena itu formulasi hasil sinar X karakteristik terdeteksi untuk garis K_α atau L_α yang dihasilkan oleh berkas proton sejumlah N_p yang datang tegak lurus cuplikan tipis harus memperhitungkan faktor diameter berkas seperti ditunjukkan pada persamaan 1 :

$$Y(Z) = \frac{N_p M(Z) \sigma_z(E) \omega_z b_z \varepsilon_z N_{av}}{D A_z} \quad (1)$$

dengan Z dan A_z nomor dan massa atom suatu unsur, $\sigma_z(E)$ tampang lintang ionisasi proton pada energi E , ω_z hasil pendaran garis K atau L , b_z nisbah pendar sinar X garis K_α atau L_α , ε_z efisiensi deteksi absolut, N_{av} bilangan Avogadro.

Persamaan (1) diatas ditulis menjadi persamaan (2)

$$Y(Z) = k(Z) N_p M(Z) \quad (2)$$

dengan faktor sensitivitas analisis

$$k(Z) = \frac{\sigma_z(E) \omega_z b_z \varepsilon_z N_{av}}{D A_z} \quad (3)$$

Formulasi PIXE Untuk Cuplikan Tebal

Untuk targert tebal harus memperhatikan energi yang hilang selama penetrasi dan atenuasi sinar X yang dihasilkan dibawah permukaan cuplikan. Jadi pada cuplikan tebal hasil sinar X karakteristik suatu unsur dalam cuplikan ditentukan dari integrasi tampang lintang ionisasi dan faktor atenuasi sinar X untuk semua energi proton dari E sampai nol.

Untuk berkas proton datang membentuk sudut α dan detektor membentuk sudut β terhadap normal cuplikan seperti pada Gambar 4 maka hasil sinar X karakteristik terdeteksi ditunjukkan pada persamaan (4)

$$Y(Z) = k(Z) N_p M(Z) \quad (4)$$

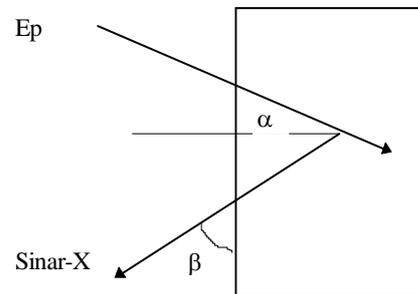
dengan faktor sensitivitas :

$$k(Z) = \frac{\omega_z b_z \varepsilon_z N_{av}}{A_z} \int_E \frac{\sigma_z(E)}{S(E)} T_z(E) dE \quad (5)$$

dengan faktor transmisi foton dari kedalaman target

$$T_z(E) = \exp \left[- \left(\frac{\mu}{\rho} \right) \frac{\cos \alpha}{\sin \beta} \int \frac{dE}{S(E)} \right] \quad (6)$$

dengan μ koefisien atenuasi sinar X suatu bahan dan ρ densitas bahan. Keterangan besaran lainnya sama dengan PIXE cuplikan tipis.



Gambar 4. Skematik PIXE cuplikan tebal.

PERHITUNGAN SENSITIVITAS

Dalam penelitian ini sensitivitas analisis untuk PIXE cuplikan tipis saja yang dihitung karena dengan energi rendah sebesar 150 keV maka proton tidak mampu menembus cuplikan terlalu dalam, hanya orde puluhan mikro meter. Dengan kata lain sinar X yang dihasilkan hampir seluruhnya berasal dari permukaan cuplikan. Dari definisi sensitivitas pada bab pendahuluan dan mengubah persamaan (2) dengan memasukan $Q = N_p e$ dan $m(z) = M(z)/D$ maka faktor sensitivitas menjadi

$$k(Z) = \frac{\sigma_z(E) \omega_z b_z \varepsilon_z N_{av}}{e A} \quad (7)$$

Q dan e adalah kuantitas muatan berkas proton dan muatan elementer elektron sedangkan $m(z)$ massa persatuan luas. Faktor sensitivitas pada persamaan (7) menentukan sensitivitas PIXE. Untuk menentukan sensitivitas PIXE diperlukan data-data parameter pada persamaan (7). Parameter tampang lintang ionisasi merupakan fungsi energi proton dan energi ionisasi. Efisiensi absolut detektor merupakan fungsi energi sinar X . Hasil pendaran merupakan fungsi nomor atom. Nisbah pendar sinar X ditentukan bersesuaian dengan energi karakteristik sinar X garis tertentu untuk suatu unsur. Nomor massa bersesuaian dengan jenis unsur, sedangkan yang lainnya merupakan konstanta.

Pada penelitian ini yaitu dalam rangka mengkaji kelayakan PIXE energi rendah dan mengingat ketersediaan data parameter yang diperlukan pada persamaan (7) maka sensitivitas PIXE yang dihitung berdasarkan energi sinar X garis K saja. Hasil pendaran sinar X diambil dari Bambynek, W., dkk.^[4] yang berasal dari data eksperimen yang kemudian dibuat persamaan semi empiriknya. seperti pada persamaan (8) dengan koefisien fitting $B_0=3,7 \times 10^{-2}$; $B_1=3,15 \times 10^{-2}$; $B_2=5,44 \times 10^{-5}$; $B_3=-1,25 \times 10^{-6}$

$$\left[\frac{\omega k}{l - \omega k} \right]^{1/4} = \sum_{i=0}^3 B_i Z^i \quad (8)$$

Tampang lintang ionisasi diambil dari Johansson and Johansson^[5] yang telah memformulasikan hubungan antara model BEA (*Binnary encounter approximation*) dan data eksperimen seperti ditunjukkan pada persamaan (9)

$$\ln(\sigma_k U_k^2) = \sum_{n=0}^5 b_{k,n} \left[\ln\left(\frac{E}{\lambda U_k}\right) \right]^n \quad (9)$$

dengan E energi proton, U_k energi ionisasi dan $\lambda = 1836,1514$ yang merupakan nisbah massa proton terhadap massa. Parameter fitting $b_0 = 2,0471$; $b_1 = -0,47448$; $b_2 = -0,65905 \times 10^{-2}$; $b_3 = 0,9319 \times 10^{-1}$; $b_4 = 0,46063 \times 10^{-1}$; $b_5 = 0,60853 \times 10^{-2}$.

Untuk E dan U_k dalam satuan eV makaampang lintang ionisasi σ_k dalam satuan 10^{-14} cm^2 . Besarnya harga U_k diambil dari acuan^[1]. Efisiensi absolut detektor Si(Li) dapat dimodelkan^[6] seperti ditunjukkan pada persamaan (10)

$$\varepsilon = \frac{\Omega}{4\pi} \exp\left[-\sum_{i=1}^3 \mu_i d_i\right] F_{esc} [1 - \exp(-\mu_{Si} D)] \quad (10)$$

dengan Ω sudut ruang detektor, μ_i dan d_i masing-masing adalah koefisien atenuasi dan tebal jendela Berilium, lapisan elektroda emas, dan lapisan mati detektor Si(Li). F_{esc} faktor koreksi sinar X yang hilang melalui *escape peak* sedangkan μ_{Si} dan D adalah koefisien atenuasi dan tebal kristal Si(Li). Untuk menghitung efisiensi detektor pada energi sinar X tertentu diasumsikan bahwa detektor mempunyai karakteristik sbb: tebal jendela (d_1) = 25 μm , tebal elektroda (d_2) = 0,02 μm , tebal lapisan mati (d_3) = 0,1 μm , tebal kristal (D) = 5 mm

dengan luasan = 40 mm^2 , dan $F_{esc} = 0,5\%$ sedangkan data koefisien atenuasi untuk masing-masing bahan diambil dari acuan^[1].

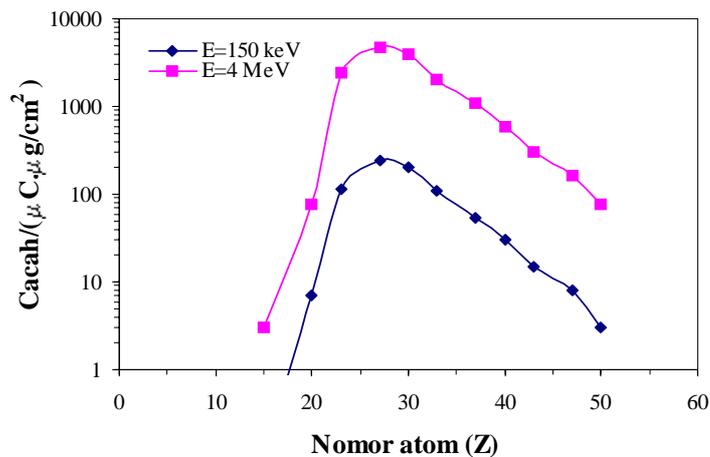
Dengan menghitung persamaan (8), (9), dan (10) untuk tiap jenis unsur pada energi proton tertentu kemudian memasukkan hasilnya bersamaan dengan konstanta fisis lainnya ke persamaan (7) maka sensitivitas PIXE dapat ditentukan. Konstanta fisis pada persamaan (7) diambil dari acuan^[1]. Mengingat hanya beberapa unsur yang dihitung guna mendapatkan data kelayakan PIXE energi rendah maka sebagai alat bantu untuk menghitung digunakan program *Microsoft Excel*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Beberapa jenis unsur dari $Z = 15$ sampai dengan $Z = 50$ dihitung sensitivitasnya secara simulasi dengan asumsi-asumsi seperti pada bab perhitungan sensitivitas. Tabel 1 merupakan hasil perhitungan sensitivitas untuk beberapa unsur masing-masing untuk energi proton 150 keV dan 4 MeV. Sensitivitas PIXE energi tinggi dalam hal ini digunakan sebagai pembanding. Untuk memudahkan dalam membandingkan Tabel 1 dibuat grafik seperti pada Gambar 5.

Tabel 1. Data sensitivitas analitik PIXE secara perhitungan untuk berbagai unsur.

Nomor dan Simbol Atom	Sensitivitas Analitik PIXE (Cacah/ $\mu\text{C} \cdot \mu\text{g}/\text{cm}^2$)	
	Ep = 150 keV	Ep = 4 MeV
15(P)	0.1	2
20(Ca)	7	70
23(V)	115	2400
27(Co)	240	4600
30(Zn)	200	4000
33(As)	110	2000
37(Rb)	55	1100
40(Zr)	30	600
43(Tc)	15	300
47(Ag)	8	160
60(Nd)	3	78



Gambar 5. Sensitivitas analitik PIXE secara perhitungan.

Dari Gambar 3 terlihat bahwa sensitivitas analitik PIXE pada energi proton 150 keV lebih rendah dibandingkan pada energi proton 4 MeV, hal ini dikarenakan bahwa besarnyaampang lintang ionisasi atom mengecil untuk energi proton yang mengecil. Besarnya sensitivitas PIXE pada energi proton 4 MeV puluhan kali lebih besar dibandingkan dengan sensitivitas PIXE pada energi proton 150 keV. Untuk PIXE pada energi normal (2,5 MeV s/d 4 MeV) batas deteksinya orde ppm sampai dengan ppb^[1]. Mengingat sensitivitas terkait dengan batas deteksi yaitu berbanding terbalik maka tentunya dengan melihat data pada Tabel 1 batas deteksi untuk PIXE 150 keV dapat diperkirakan orde puluhan ppm sampai dengan ratusan ppm. Batas deteksi PIXE 150 keV dapat diperbaiki yaitu dengan cara menaikkan besarnya arus proton namun tentunya harus diperhitungkan efek pemanasan dari cuplikan yang diiradiasi. Dari segi cacah latar secara logis untuk PIXE energi rendah akan memberikan cacah latar yang rendah karena kemungkinan terjadinya sinar X bremsstrahlung yang dihasilkan pada prtoton energi rendah (keV) lebih sedikit dibandingkan pada energi tinggi (MeV). Disamping itu sinar gamma energi rendah yang dihasilkan oleh interaksi nuklir pada cuplikan, yang terjadi akibat interaksi proton energi tinggi, untuk PIXE energi rendah kemungkinannya sangat kecil terjadi.

KESIMPULAN

Dari data hasil perhitungan sensitivitas PIXE energi 150 keV bahwa PIXE energi rendah dapat dikembangkan walaupun sensitivitasnya lebih rendah dibandingkan dengan PIXE energi orde MeV. Untuk memperbaiki sensitivitas PIXE energi 150 keV agar kompetisi dengan PIXE energi orde MeV maka diperlukan arus proton yang lebih besar yaitu orde mikro amper dan efisiensi detektor yang lebih tinggi. Kekhawatiran bertambahnya cacah latar akibat kenaikan arus perlu dibuktikan secara eksperimen mengingat sinar X bremsstrahlung yang dihasilkan pada prtoton energi rendah (keV) lebih sedikit dibandingkan pada energi tinggi (MeV).

DAFTAR PUSTAKA

- [1] JOHANSSON, S.A.E., AND CAMPBELL, J.L., *PIXE: A Novel Technique For Elemental Analysis*, John Wiley and Sons Ltd., 346p., 1988.
- [2] SZEGEDI, S., *Some Application Of The Small Neutron Generator*, IAEA TCM on Application of Accelerator Based Neutron Source in Debrecen Hungary at 5-8 October 1999.

- [3] HARSOYO, *Analisa Batuan Dengan PIXE 350 keV dan 3,5 MeV*, Jurnal jursusan fisika, II/1991 No.7.
- [4] BAMBYNEK, W., ET.AL., *Revs. Mod. Phys.*, 44, 716, 1972.
- [5] JOHANSSON, S.A.E., AND JOHANSSON, T.B., *Nucl. Instr. Meth.*, 137,473, 1976.
- [6] CAMPBELL J.I., AND MCGHEE, P.L., *Nucl. Instr. Meth.*, A248, 393, 1986.

TANYA JAWAB

Abu Bakar Gozhali

- *Only a few element yields a good sensitivity using PIXE at 150 keV by simulation why?*

Darsono

- Sensitivity is proportional to ionization cross-section, and this cross-section decreases with decreasing energy of proton.

Irianto

- *Bagaimanakah cara menentukan sensitivitas dari hubungan cacah/ $\mu\text{C}\cdot\mu\text{g}/\text{cm}^2$ terhadap nomor atom (Z) pada Gambar 3.*

Darsono

- Sensitivitas analitik (k) ditentukan dari persamaan (7). Dari persamaan (7) terlihat sensitivitas analitik fungsi Z. Untuk harga Z tertentu maka besarnya σ , ω , ε dan A tertentu, maka untuk berbagai harga Z (berbagai unsur) akan diperoleh harga $k(Z)$.