

## Evaluasi Kinerja Metoda Analisis Pengukuran Neutron (APN)

Zaenal Arifin<sup>1</sup>, Dwi P Sasongko<sup>2</sup>, dan M. Munir<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Laboratorium Elektronika dan Instrumentasi, Jurusan Fisika, FMIPA UNDIP, Semarang

<sup>2</sup>Laboratorium Geofisika, Jurusan Fisika, FMIPA UNDIP, Semarang

<sup>3</sup>Laboratorium Fisika Atom dan Radiasi, Jurusan Fisika, FMIPA UNDIP, Semarang  
Email: zaenalarifin@undip.ac.id

### Abstract

*Evaluation of Neutron Activation Analysis (NAA) methods performance has been done. The objective is to validate the data form these analysis on the determination of the trace element concentration in the waters and sediments. This evaluation covering test of devices stability, background counting, Figure of Merit (FOM), Critical Level (L<sub>c</sub>), Detection Limit (L<sub>D</sub>), Determination Limit (L<sub>Q</sub>) and test of quality result.*

*Result show that device in stabil condition have background counting about 0.0037 to 0.1806 cps, Figure of Merit (FOM) about to 0.0045 to 0.1732 secon. The data result analysis above Critical Level (L<sub>c</sub>), in L<sub>c</sub> about 0.07 to 16.42 ppb. Detection Limit (L<sub>D</sub>) about 0.14 to 32.93 ppb in significant 95% expect Hg obtained L<sub>D</sub> 1.26 ppb. Determination Limit (L<sub>Q</sub>) about 0.44 to 100.10 ppb. Test of quality result show that of standardized difference about 15.17% to above 50% and Precision result analysis about 0.01% to 99.00%.*

**Keywords :** *NAA Methods, Trace element, devices stability, background counting, Figure of Merit (FOM), Critical Level (L<sub>c</sub>), Detection Limit (L<sub>D</sub>), Determination Limit (L<sub>Q</sub>) and test of quality result.*

### Abstrak

*Telah dilakukan evaluasi kinerja Metode APN (Analisi Pengaktifan Neutron). Tujuan penelitian ini adalah evaluasi kinerja metoda APN dengan kasus penerapan pada penentuan unsur kelumit dalam sampel air dan sedimen. Evaluasi kinerja meliputi Uji Kestabilan Alat, Cacah Latar, Figure of Merit (FOM), Critical Level (L<sub>c</sub>), Detection Limit (L<sub>D</sub>), Determination Limit (L<sub>Q</sub>) dan Uji Kualitas Hasil.*

*Hasil penelitian menunjukkan bahwa alat dalam kondisi stabil memiliki cacah latar antara 0,0037-0,1806 cps, Figure of Merit (FOM) antara 0,0045-0,1732 detik. Hasil analisis data di atas Critical Level (L<sub>c</sub>), pada L<sub>c</sub> sekitar 0,07-16,42 ppb. Detection Limit (L<sub>D</sub>) antara 0,14-32,93 ppb secara signifikan 95% kecuali Hg diperoleh L<sub>D</sub> 1,26 ppb. Determination Limit (L<sub>Q</sub>) antara 0,44-100,10 ppb. Uji Kualitas Hasil menunjukkan bahwa perbedaan standar antara 15,17% sampai di atas 50% dan presisi hasil analisis antara 0,01% sampai 99,00%*

**Kata-Kata Kunci :** *Metode APN, Unsur Kelumit, Uji Kestabilan Alat, Cacah Latar, Figure of Merit (FOM), Critical Level (L<sub>c</sub>), Detection Limit (L<sub>D</sub>), Determination Limit (L<sub>Q</sub>) dan Uji Kualitas Hasil.*

### PENDAHULUAN

Metoda pengukuran radioaktivitas (termasuk APN) dalam kajian radioekologi bisaanya menggunakan alat dan teknik ukur yang khusus, karena kemampuan untuk mengukur konsentrasi yang sangat rendah memerlukan pendeteksi radioaktivitas

yang sangat rendah tingkat radiasinya. Hal ini dikarenakan tingkat radioaktivitas unsur kelumit dalam sampel yang sudah diaktivasi sebanding dengan konsentrasinya. Alat yang digunakan harus mempunyai laju cacah latar yang sangat rendah dengan efesiensi pencacahan yang tinggi

sehingga gangguan latar dapat ditekan serendah mungkin [1].

Salah satu metoda analisis yang dapat diterapkan dalam penentuan unsur kelumit di lingkungan perairan dengan akurasi tinggi adalah metoda “ Analisis Pengaktifan Neutron” (APN) [2]. Kendala yang dihadapi apabila metoda ini akan diterapkan untuk menentukan kandungan logam berat di perairan adalah bahwa logam berat sebagai unsur pencemar perairan adalah unsur yang stabil (nonradioaktif) yang tidak memancarkan sinar- $\gamma$  sehingga tidak bisa dideteksi dengan spektrometer- $\gamma$ . Kendala ini bisa diatasi dengan membuat sampel menjadi radioaktif melalui proses pengaktifan neutron. Sampel yang mengandung unsur kelumit yang nonradiokatif ditembak dengan neutron agar menjadi radioaktif sehingga memancarkan sinar- $\gamma$ . Sinar- $\gamma$  ini dianalisis menggunakan spektrometer- $\gamma$  untuk menentukan spektrum tenaga karakteristiknya sehingga dapat diidentifikasi dan dihitung kandungan unsur kelumitnya salam sampel.

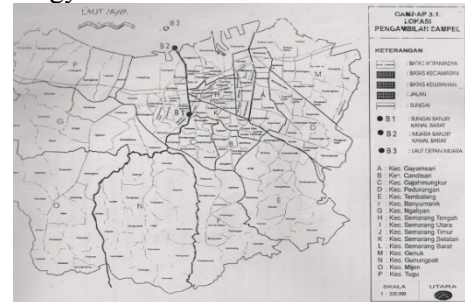
Metoda APN mampu memberikan hasil analisis konsentrasi logam berat dalam orde  $10^{-9}$ - $10^{-12}$  dan mampu menganalisis konsentrasi beberapa logam berat dalam suatu sampel secara bersamaan (serempak/simultan) serta perlu dikaji aspek kinerja metode analisisnya untuk validasi data hasil analisisnya.

Pada penelitian ini metoda yang dievaluasi kinerjanya adalah Metoda APN yang diterapkan pada analisis unsur kelumit di lingkungan, yaitu unsur logam berat ( $Hg^{197}$ ,  $Cr^{51}$ ,  $Co^{60}$  dan  $Fe^{59}$ ) dari sampel lingkungan air dan sedimen.

### METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini, sampel air dan sedimen diambil dari perairan sungai, muara, dan laut, depan muara Banjir Kanal Barat yang terletak di kota Semarang. Preparasi sampel dilakukan di Laboratorium Bidang Tekno Fisika Kimia (BTFK) Pusat Penelitian Teknologi Maju (PPTM) Badan Tenaga

Nuklir Nasional (BATAN) Yogyakarta. Aktivasi sampel dilakukan dengan menggunakan fasilitas Iradiasi *Lazy Susan* Reaktor Nuklir Kartini PPTM BATAN Yogyakarta. Pencacahan dan Analisis metode APN dilakukan di laboratorium BTFK PPTM BATAN Yogyakarta.



Gambar 1. Lokasi Pengambilan Sampel

### Bahan dan Alat Penelitian

1. Sampel lingkungan berupa air sebanyak 5 liter dan sedimen permukaan dasar sebanyak 10 kg dengan pengambilan tiga wilayah sistem sungai, muara dan laut depan Banjir Kanal Barat.
2. Sampel standar multigamma  $Eu^{152}$ ,  $Am^{241}$ , dan  $Cs^{137}$  untuk kalibrasi dan uji kestabilan peralatan spektrometer- $\gamma$
3. Standar Reference Material Buffalo River 2704 dari NBS, CASS 3 dari Promochem, 1641b dari NBS dan standar sintesis dari Fisher sebagai material pembanding untuk analisis kuantitatif sampel (komparatif dan relatif)

### Alat penelitian

1. Dredger, untuk mengambil sedimen permukaan dasar.
2. Neraca digital OHAUS GT 410, untuk menimbang massa sampel
3. Sieve ASTM Specification 100 mesh, untuk menyaring sampel.
4. Lumpang Stainless Steel, untuk pengabuan sampel sedimen.
5. Vial, untuk tempat sampel siap cacah.

6. Kelongsong Polyethylen, wadah sampel yang akan ditembaki neutron.
7. Jerigen, untuk tempat sampel air
8. Pipet, untuk mengambil sampel/standar (cair).
9. Fasilitas Lazy Susan Reaktor Nuklir Kartini, sebagai sumber neutron.
10. Tustel merk Yashica, untuk merekam spektrum.
11. Perangkat Spektrometer- $\gamma$ , untuk mencacah sampel setelah iradiasi.

Penentuan lokasi sampling ditetapkan secara purposive di tiga titik, masing-masing titik dipilih dengan pertimbangan mewakili sungai, muara dan laut depan muara Banjir Kanal Barat

Disetiap titik pengambilan sampel, air diambil dari tiga titik secara vertical pada kedalaman 0,2y, 0,6y dan 0,8y (y=kedalaman perairan). Sampel air di ketiga titik vertikal tersebut dicampur jadi satu dan kemudian ditambahkan 1 ml HCl pekat atau HNO<sub>3</sub> untuk setiap liter sampel air [3]. Sedimen di ambil dengan menggunakan dredger sebanyak 3 kali untuk membuat sebuah sampel, kemudian sedimen dimasukkan ke dalam wadah bersih, dengan mencatat tanggal dan lokasi pengambilan pada label sampel [3].

Sampel air yang terkumpul dimasukkan ke dalam vial sebanyak 2 ml. untuk sampel sedimen terlebih dahulu dibersihkan dari bahan-bahan pengotor (palstik, akar-akar dll) kemudian dikeringkan dalam oven 105<sup>o</sup>C dan diuapkan dengan lampu pemanas untuk mereduksi kandungan air. Setelah kering, sampel dihomogenkan dengan cara digerus atau dihaluskan dengan lumpang dan dilakukan pengayakan 100 mesh secara bertahap. Hasil homogenisasi dimasukkan ke dalam vial masing-masing sampel ditimbang sebanyak 0,1 gram kemudian diberi label untuk tiap-tiap pengambilan sampel [4].

Setelah sampel disiapkan dengan baik di dalam kapsul/kelongsong polyethelene, maka sampel siap untuk

diiradiasi di dalam fasilitas Lazy Susan Reaktor Nuklir Kartini. Untuk keperluan analisis logam berat ini, proses iradiasi dilaksanakan pada daya 100 kW, lamanya waktu iradiasi untuk tiap kapsul adalah 12 jam dengan fluks neutron  $1.0 \times 10^{11} \text{ ncm}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Pada iradiasi sampel ini digunakan neutron termal, yang bertenaga sekitar 0,025 eV. Hal ini disebabkan karena logam berat yang akan dianalisis memiliki tampang lintang serapan neutron yang dapat bereaksi dengan neutron termal.

Prosedur pencacahan yang dilakukan menggunakan spektrometer- $\gamma$  dengan seperangkat komputer adalah melakukan pencacahan standar multigamma Eu<sup>152</sup> dan Am<sup>241</sup> yang digunakan untuk kalibrasi menentukan analisis kualitatif dan kuantitatif. Kemudian dilakukan pencacahan radiasi latar yaitu pencacahan yang dilakukan dengan menggunakan vial kosong untuk mendapatkan cacah dari radiasi latar sebagai koreksi perhitungan cacah sampel. Selanjutnya pencacahan sampel yang diletakkan diatas detektor dengan jarak 2 cm.

Sebelum dilakukan analisis spektrum, terlebih dahulu dilakukan kalibrasi tenaga untuk tujuan analisis kualitatif spektrometer- $\gamma$ . Pencacahan sampel dilakukan pada kondisi alat yang tepat sama dengan kondisi kalibrasi. Analisis kuantitatif bertujuan menentukan besarnya aktivitas dan kadar dari radionuklida dalam sampel. Pada penelitian ini, untuk analisis kuantitatif digunakan untuk metode penentuan secara mutlak dan nisbi [5].

### Metode Evaluasi Kinerja APN

#### Uji Kestabilan Alat

Kestabilan pengukuran alat ukur di uji secara statistik memakai metoda chi kuadrat dengan menguji hasil pencacahan sumber radioaktif standar secara berulang-ulang dalam kondisi peralatan yang sama [1]. Persamaan yang digunakan adalah :

$$\chi^2 = (1/X) \sum (X_i - Y)^2 \quad (1)$$

dengan X<sub>i</sub> adalah hasil cacah ke-i, X adalah cacah rerata

Hasil perhitungan nilai  $\chi^2$  kemudian dibandingkan dengan distribusi kebolehjadian  $\chi^2$  pada tabel chi kuadrat. Hasil uji alat dianggap stabil jika nilai  $\chi^2$  hasil perhitungan lebih besar atau sama dengan nilai  $\chi^2$  dari tabel pada taraf signifikansi 95%.

**Cacah Latar**

Cacah latar yang berasal dari radionuklida dalam yang ada di dalam bahan detektor, bahan penahan radiasi, bahwa wadah sampel, bahan sekitar dan sinar kosmis digunakan untuk mendapatkan cacah terkoreksi (cacah netto). Penurunan cacah latar sangat diperlukan untuk memperbesar FOM.

**Figure of Merit (FOM)**

Besaran yang digunakan untuk memperlihatkan kemampuan alat ukur adalah *Figure of Merit (FOM)* memakai persamaan [6]. :

$$FOM = E^2 / B \quad (2)$$

dengan E adalah efisiensi pencacahan (%), B adalah laju cacah latar (cps)

**Critical Level (Lc)**

Batas keputusan (Lc) merupakan besaran yang dipakai untuk menilai hasil pencacahan yang dinyatakan dengan terdeteksi atau tidak dengan persamaan [6] :

$$Lc = 1,64 \sigma_b \quad (3)$$

dengan Lc adalah batas keputusan (cps),  $\sigma_b$  adalah standar deviasi blangko (cps)

**Detection Limit (LD)**

*Detection limit* merupakan besaran yang dipakai untuk menilai kemampuan sistem pada kondisi tertentu [6]. Cacah terendah yang dapat dideteksi dengan tingkat signifikansi 95% menggunakan persamaan :

$$L_D = 3,29 \sigma_b \quad (4)$$

dengan  $L_D$  adalah batas deteksi terendah (cps),  $\sigma_b$  adalah standar deviasi blangko (cps)

**Determination Limit (LQ)**

*Determination limit* merupakan besaran yang dipakai untuk menilai

kemampuan kerja minimum sistem dengan menggunakan persamaan [6]:

$$L_Q = 10 \sigma_b \quad (5)$$

Dengan  $L_Q$  adalah batas kerja terendah (cps),  $\sigma_b$  adalah standar deviasi blangko (cps)

**Uji Kualitas Hasil**

Untuk menguji kualitas hasil penelitian diperlukan pengukuran kadar suatu unsur dalam material acuan yang diperlukan sebagai sampel yang tidak diketahui kadarnya. Hasil pengukuran rerata kadar unsur analisis dan sertifikat tersebut dibandingkan dengan harga standar deviasi unsur analisis dan sertifikat sehingga diperoleh angka penyimpangan dari kadar analisis dengan kadar dalam sertifikat menggunakan persamaan [7] :

$$Z_i = (C_i - C_{ref}) / \sqrt{\sigma_i^2 + \sigma_{ref}^2} \quad (6)$$

dengan  $Z_i$  adalah angka penyimpangan dari sertifikat,  $C_i$  adalah kadar unsur analisis (ppm),  $C_{ref}$  adalah kadar unsur analisis dalam sertifikat (ppm),  $\sigma_i$  adalah standar deviasi kadar unsur analisis,  $\sigma_{ref}$  adalah standar deviasi kadar unsur analisis dalam sertifikat.

Untuk pencacahan berulang-ulang dapat mengetahui nilai keseksamaan (presisi) dengan menggunakan persamaan [8]:

$$CV = \sigma / \mu \quad (7)$$

dengan CV adalah Koefesien Variasi,  $\sigma$  adalah standar deviasi,  $\mu$  adalah rerata hasil.

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

Kalibrasi peralatan pencacahan- $\gamma$  dilakukan dengan dua macam kalibrasi yakni kalibrasi tenaga dan kalibrasi efisiensi. Kalibrasi dilakukan dengan mencacah sumber standar  $Eu^{152}$  (umur paro 13,1 tahun), aktivitas awal (15-06-1979) sebesar 1,975E+5 dps dan aktivitas saat pengukuran (24-12-1999) sebesar 66686,5 dps dan sumber standar  $Am^{241}$  (umur paro 432,6 tahun), aktivitas awal (02-08-1977) sebesar 155 dps serta aktivitas saat pengukuran (24-12-1999) sebesar 150 dps. Hasil kalibrasi tenaga yang disajikan Tabel 1. dan hasil

kalibrasi efesiensi yang disajikan pada Tabel 2.

Tabel 1. Data kalibrasi Tenaga Eu<sup>152</sup>

Nomor Salur (X)	Tenaga keV (Y)
245	121,78
490	244,69
688	344,28
1548	778,90
1919	963,43
2214	1112,08
2801	1408,03

Data kalibrasi tenaga pada Tabel 1. menghasilkan persamaan garis kalibrasi tenaga :

$$Y = 0,5032 X - 1,6189, r = 0,9999$$

hubungan linier antara tenaga dan nomor salur ini sebenarnya hanya merupakan suatu pendekatan sehingga perlu ditambah dengan faktor koreksi ketidaklinieran. Dalam analisis spektrum gamma, faktor kalibrasi ketidaklinieran ini tidak dibahas karena rendahnya laju cacah yang terukur dan rumitnya perhitungan statistik. Demikian juga halnya dengan tenaga standar yang dibaca dari tabel isotop ternyata mempunyai ketidakpastian dan nomor salur tunduk pada ralat yang timbul dari fluktuasi statistik sinyal pulsa.

Tabel 2. Data Kalibrasi Efesiensi Am<sup>241</sup> dan Eu<sup>152</sup>

Tenaga (keV)	cps	Yield	Efesiensi	Log Tenaga (X)	Log Efesiensi (Y)
60.00	7.820	0.360	0.145	1.778	-0.839
121.78	1303.390	0.282	0.069	2.086	-1.159
244.68	157.997	0.074	0.032	2.389	-1.493
344.2	412.90	0.2	0.	2.	-1.630

8	7	64	023	537	
778.90	75.200	0.130	0.009	2.891	-2.062
963.43	64.143	0.145	0.007	2.984	-2.178
1112.08	49.920	0.134	0.006	3.006	-2.251
1408.03	64.300	0.207	0.005	3.014	-2.332

Data kalibrasi efesiensi pada tabel 2. menghasilkan persamaan regresi  $Y = -1.112 X + 1.155, r = 0,999$ . Linieritas hubungan ini dapat diterapkan untuk tenaga sebesar 60 keV sampai 1408 keV. Kestabilan alat ukur perlu di uji berulang-ulang dalam kondisi yang sama dan hasilnya diuji secara statistik dengan metoda chi kuadrat. Hasil kalibrasi peralatan untuk menentukan kestabilan peralatan dan efesiensi detektor koaksial Ge(Li) Ortec Model 7010 untuk pencacahan gamma dengan standar Cs<sup>137</sup> bertenaga 661,35 keV yang disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Uji Kestabilan Alat

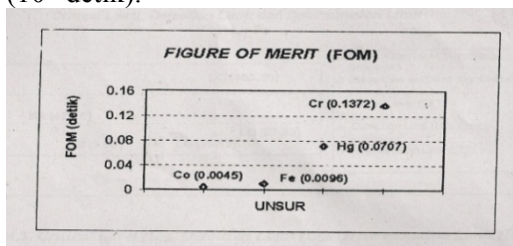
Cacah sumber standar Cs <sup>137</sup>	Tabel $\chi^2$
4307	3,84
4225	5,99
4320	7,81
4245	9,48
4306	11,07
4232	12,59
4205	14,06
4239	15,50
4225	16,91
4136	18,30
$\chi^2$ hitung = 6,52	

Tabel 3 memperlihatkan bahwa dari sepuluh kali pengukuran pada kondisi yang sama (tegangan operasi 2000 V) diperoleh hasil  $\chi^2$  hitung = 6,52 >  $\chi^2$  tabel = 3,48 pada taraf signifikansi 95% sehingga kondisi alat dianggap stabil.

Tabel 4. Figure Of Merit (FOM)

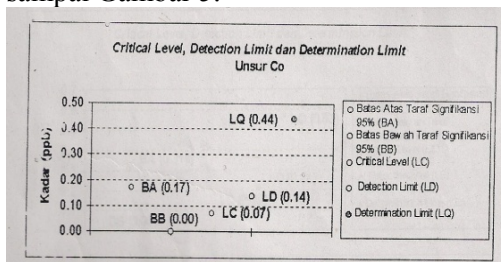
No.	Besaran	Kuantitas
1.	Cacah Latar	
	a. Hg-197	0,1810 cps
	b. Cr-51	0,0040 cps
	c. Fe-59	0,0037 cps
	d. Co-60	0,0067 cps
2.	Efisiensi Pencacahan	
	a. Hg-197	0,1130 %
	b. Cr-51	0,0230 %
	c. Fe-59	0,0060 %
	d. Co-60	0,0055 %
3.	FOM	
	a. Hg-197	0,0707 dtk
	b. Cr-51	0,1372 dtk
	c. Fe-59	0,0096 dtk
	d. Co-60	0,0045 dtk

Besaran untuk memperlihatkan kemampuan alat ukur atau *Figure Of Merit (FOM)* diperoleh hasil yang disajikan Tabel 4. dan Gambar 1. memperlihatkan bahwa alat mampu mulai mendeteksi pada orde milidetik ( $10^{-3}$  detik).

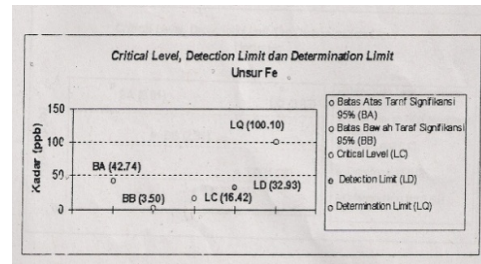


Gambar 1. *Figure Of Merit (FOM)*

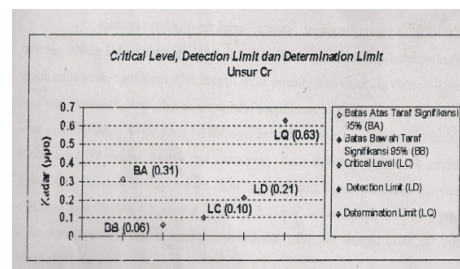
Besaran untuk memperlihatkan kemampuan sistem pengukuran pada kondisi tertentu meliputi *Critical Level (L<sub>C</sub>)*, *Detection Limit (L<sub>D</sub>)*, *Determination Limit (L<sub>Q</sub>)*. Hasil yang diperoleh disajikan dalam Gambar 2. sampai Gambar 5.



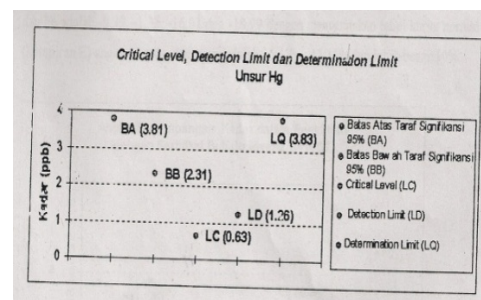
Gambar 2. *Critical Level (L<sub>C</sub>)*, *Detection Limit (L<sub>D</sub>)*, *Determination Limit (L<sub>Q</sub>)* Unsur Co.



Gambar 3. *Critical Level (L<sub>C</sub>)*, *Detection Limit (L<sub>D</sub>)*, *Determination Limit (L<sub>Q</sub>)* Unsur Fe.



Gambar 4. *Critical Level (L<sub>C</sub>)*, *Detection Limit (L<sub>D</sub>)*, *Determination Limit (L<sub>Q</sub>)* Unsur Cr.



Gambar 5. *Critical Level (L<sub>C</sub>)*, *Detection Limit (L<sub>D</sub>)*, *Determination Limit (L<sub>Q</sub>)* Unsur Hg.

Kondisi pada pengukuran dengan tegangan operasi 2000 Volt memperlihatkan bahwa *Critical Level (L<sub>C</sub>)* dan *Detection Limit (L<sub>D</sub>)*, kadar terendah masih pada taraf signifikansi 95% kecuali untuk pendeteksian unsur Hg *Critical Level (L<sub>C</sub>)* dan *Detection Limit (L<sub>D</sub>)* dibawah taraf signifikansi 95% ini dikarenakan cacah latar Hg cukup besar 0,1806 cps, berbeda dengan cacah latar Fe, Cr, Co berkisar 0,0037 sampai 0,0067 cps. Data yang diperoleh memperlihatkan bahwa hasil analisis lebih besar dari nilai Lc yang disajikan pada Gambar 4.2. sampai Gambar 4.5. untuk *Determination Limit (L<sub>Q</sub>)* yang digunakan diperoleh tingkat ketelitian

pengukuran mengukur dengan orde  $10^{-2}$  ppb hingga  $10^2$  ppb.

Uji kualitas hasil dapat dinyatakan dengan penyimpangan yang menunjukkan perbedaan nilai kadar dari hasil analisis dengan nilai dalam sertifikat diperoleh angka penyimpangan unsur Cr, Fe, Hg dan Co adalah 0,65, 1,84, -4,61 sampai 10,63 untuk sampel sertifikat CASS3 dari Promochem dan 1641b dari NBS dengan menggunakan tabel kurva normal angka penyimpangannya adalah 24,22%, 46,71% dan lebih besar 50%. Angka penyimpangan sampel sertifikat Buffalo River 2704 dari NIST unsur Co, Hg, Cr dan Fe adalah -0,39, -1,35, -16,01 dan -18,99 dengan menggunakan tabel kurva normal angka penyimpangannya adalah 15,11%, 41,15% dan lebih besar 50%.

#### KESIMPULAN DAN SARAN

Evaluasi kinerja metoda Analisis Pengaktifan Neutron dari aspek metodologis meliputi uji kestabilan alat, *Figure Of Merit (FOM)*, *Critical Level (Lc)*, *Detection Limit (L<sub>D</sub>)*, *Determination Limit (L<sub>Q</sub>)*. Uji kestabilan alat yang dilakukan diperoleh hasil  $\chi^2_{hitung}$  lebih besar  $\chi^2_{tabel} = 3,84$  ini memperlihatkan bahwa alat dalam keadaan stabil. Kemampuan alat ukur atau *Figure Of Merit (FOM)* yang digunakan mampu mendeteksi mulai orde  $10^{-3}$ s (milisekon) karena cacah latar yang ada kecil. Untuk *Critical Level* dan *Detection Limit* mempunyai kadar terendah pada taraf signifikansi 95% kecuali unsur Hg di bawah standar signifikansi 95% disebabkan cacah latar Hg cukup besar. *Critical Level* memperlihatkan hasil pencacahan mampu terdeteksi sampai 0,07 ppb dan *Detection Limit* mampu 0,14 ppb dan hasil analisis diperoleh lebih besar dari nilai *Critical Level*. *Determination Limit* diperoleh ketelitian pengukuran hingga orde  $10^{-2}$  sampai  $10^2$  ppb. Presisi hasil analisis berkisar 0,01% sampai 99%.

Perlu dilakukan penelitian selanjutnya mengenai analisis metoda

APN yang diharapkan mampu menilai baik atau tidaknya metoda ini.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Nareh, M dan Sutarmam.1993. *Metoda Pengukuran Aktivitas Tingkat Rendah* Pusat Standarisasi dan Penelitian Keselamatan Radiasi-BATAN, Jakarta
- [2]. Agus Taftazani, Sumining, Rosidi., 1996. *Analisis Pengaktifan Neutron untuk Cuplikan Geologi, Biologi dan Produk Industri*. Makalah pada seminar Regional Fisika Jawa Timur, 12 Oktober 1996, Malang, Jawa Timur.
- [3]. Nareh, M dan Shaleh, A.C. 1993. *Sampling dan Preparasi Contoh*. Pusat Standarisasi dan Penelitian Keselamatan Radiasi-BATAN, Jakarta
- [4]. IAEA., 1989. *Measurement of Radionuclides in Food and Environment*. Technical Report Series No 295. International Atomic Energy Agency. Vienna
- [5]. Susetyo, W., 1988. *Spektrometri Gamma dan Penerapannya dalam Analisis Pengaktifan Neutron* Gajah Mada University Press, Yogyakarta
- [6]. Currie L.A., 1968. *Analytical Chemistry* Analytical Chemistry Division, National Bureau of Standards, vol 4, No 3, March 1968, Washington, D.C.
- [7]. Amer, H.A., 1998. *Investigation of Bioindicator Fucus vesiculosus and its Application in Biomonitoring Programs* Institut für Chemie und Dynamik der Geosphäre 7 : Angewandte Physikalische Chemie
- [8]. Tan, K.H., 1996. *Soil Sampling, Preparation, and Analysis* Marcel Dekker Inc. Madison Avenue, New York

