

PEMBUATAN PROGRAM KOMPUTER UNTUK
ANALISIS SPEKTRUM AKTIVASI NEUTRON KOMPARATIF

Mohammad Dhandhang Purwadi *)

ABSTRAK

RANCANG-BANGUN PROGRAM KOMPUTER UNTUK ANALISIS SPEKTRUM AKTIVASI NEUTRON KOMPARATIF. Analisis kimia kualitatif dan kuantitatif dengan metode Analisis Aktivasi Neutron (AAN) adalah suatu utilisasi penting dalam pemanfaatan reaktor riset nuklir, yang perlu dipacu pengembangan dan aplikasinya untuk meningkatkan utilitas reaktor. Aplikasi AAN di Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy (RSG-GAS) dengan teknik AAN komparatif membutuhkan perangkat lunak khusus untuk analisis spektrum gamma banyak unsur (dalam sekali analisis) yang belum diperjualbelikan secara umum. Analisis AAN komparatif di RSG-GAS dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak untuk analisis unsur tunggal dan kemudian mengolah hasilnya secara manual. Cara ini akan sangat menurunkan kualitas hasil analisisnya. Untuk mengatasi persoalan tersebut, dalam penelitian ini telah dirancang dan dibuat program komputer khusus untuk AAN komparatif. Dalam analisis spektrum digunakan metode penelusuran tak linear. Untuk meningkatkan kualitas penelusuran spektrum, sebelum spektrum dianalisis dilakukan perbaikan rasio sinyal terhadap derau dan operasi dekonvolusi. Program komputer yang telah dibuat dengan menggunakan bahasa grafis (*G language*) diberi nama PASAN-K (Program Analisis Spektrum Aktivasi Neutron Komparatif). Hasil pengujian PASAN-K dengan menggunakan spektrum *benchmark* IAEA menunjukkan bahwa PASAN-K dapat berfungsi normal dengan kesalahan kurang dari 10 %.

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF THE COMPUTER CODE FOR COMPARATIVE NEUTRON ACTIVATION ANALYSIS. The qualitative and quantitative chemical analysis with Neutron Activation Analysis (NAA) is an importance utilization of a nuclear research reactor, and this should be accelerated and promoted in application and its development to raise the utilization of the reactor. The application of Comparative NAA technique in G.A. Siwabessy Multi Purpose Reactor (RSG-GAS) needs special (not commercially available yet) softwares for analyzing the spectrum of multiple elements in the analysis at once. The application carried out using a single spectrum software analyzer, and comparing each result manually. This method really degrades the quality of the analysis significantly. To solve the problem, a computer code was designed and developed for comparative NAA. Spectrum analysis in the code is carried out using a non-linear fitting method. Before the spectrum analyzed, it was passed to the numerical filter which improves the signal to noise ratio to do the deconvolution operation. The software was developed using the G language and named as PASAN-K. The testing result of the developed software was benchmark with the IAEA spectrum and well operated with less than 10 % deviation.

Kata kunci: kode komputer, spektrometri gamma, AAN, AAN komparatif

*) Peneliti BPTR, P2TRR - BATAN

PENDAHULUAN

Salah satu utilisasi penting dari suatu reaktor riset nuklir adalah pemanfaatan neutron untuk analisis kimia kualitatif dan kuantitatif, yaitu dengan metode analisis aktivasi neutron (AAN). AAN adalah merupakan suatu metode analisis kimia yang unggul karena mempunyai sensitivitas serta presisi yang tinggi. Keandalan, presisi dan akurasi AAN dalam menganalisis suatu cuplikan padat, cair maupun gas menyebabkan penggunaan AAN di bidang industri presisi serta analisis pencemaran lingkungan berkembang pesat. Dalam program peningkatan efisiensi pemanfaatan reaktor riset nuklir, litbang AAN merupakan suatu kegiatan yang penting, dan harus tetap dipacu untuk meningkatkan tingkat utilitas reaktor riset nuklir.

Pada saat ini telah berkembang beberapa teknik AAN untuk analisis kimia. Diantara beberapa teknik AAN, teknik AAN komparatif adalah salah satu teknik AAN yang sederhana, mudah untuk diaplikasikan tetapi kualitas hasil analisisnya tetap tinggi. Teknik AAN yang diterapkan di Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy (RSG-GAS) pada saat ini adalah teknik AAN komparatif. Analisis kandungan unsur dalam teknik AAN komparatif dilakukan dengan cara membandingkan (komparasi) spektrum gamma cuplikan dengan spektrum gamma unsur standar yang telah diketahui kuantitasnya. Oleh karena itu dalam AAN komparatif, pekerjaan analisis didominasi oleh analisis spektrum (spektrometri) gamma dari berbagai unsur yang berkaitan dalam jumlah yang cukup banyak, lebih kurang lima puluh unsur. Di RSG-GAS penanganan spektrometri untuk sejumlah unsur biasanya dilakukan satu per satu, dan kemudian diikuti dengan sejumlah perhitungan tangan. Kondisi ini akan menyebabkan kualitas metode AAN menurun jauh dalam hal ketelitian dan waktu analisis. Kualitas metode AAN akan dapat dipertahankan bila terdapat suatu perangkat lunak yang didisain khusus untuk AAN komparatif. Perangkat lunak yang banyak dijual secara komersial hampir seluruhnya untuk analisis spektrum unsur tunggal, tidak didisain untuk analisis spektrum banyak unsur seperti yang dijumpai pada AAN komparatif.

Untuk menanggulangi persoalan analisis spektrum unsur dengan jumlah yang banyak pada AAN komparatif, dalam penelitian ini dibuat suatu program komputer yang dirancang khusus untuk analisis spektrum banyak unsur dalam sekali analisis seperti yang dikehendaki oleh para analis AAN komparatif. Program komputer ini disusun dengan bahasa garfis (*G Language*) dan dinamai "Program Analisis Spektrum Aktivasi Neutron Komparatif" (PASAN-K). Pengenal setiap spektrum dilakukan dengan penelusuran tak linear (*non-linear fitting*) untuk dua puncak sinyal bertumpuk. Dengan teknik ini program akan dapat mengenali dua buah puncak sinyal yang menyatu membentuk satu puncak sinyal majemuk. Untuk memperbaiki rasio sinyal terhadap derau (*Signal to Noise ratio, S/N ratio*), spektrum mentah terlebih dahulu dikoreksi dengan filter numerik. Filter numerik ini tidak hanya berfungsi memperbaiki karakter rasio sinyal terhadap derau, tetapi juga melakukan penguraian puncak sinyal majemuk secara sederhana dengan prinsip dekonvolusi agar puncak-puncak sinyal lebih mudah dikenali. Penentuan daerah analisis selebar lebih kurang dua kali lebar puncak sinyal dilakukan dengan bantuan turunan kedua dari spektrum.

Dengan pembuatan dan pengembangan PASAN-K diharapkan akan diperoleh suatu perangkat lunak yang dapat menangani spektrum AAN komparatif yang berjumlah cukup banyak dalam sekali analisis secara otomatis (tidak adak perhitungan manual dengan tangan). Dengan menggunakan bahasa grafis PASAN-K diharapkan akan menjadi lebih akrab dengan pengguna (*user friendly*) baik dalam tampilan maupun sumber programnya. Pemrosesan spektrum secara digital dalam implementasi perhitungan numerik dipilih dengan harapan akan memudahkan pengembangan program komputer ini di kemudian hari dalam rangka memenuhi keinginan dan kebutuhan pengguna. PASAN-K secara otomatis akan menganalisis semua spektrum yang ada sehingga dapat melakukan analisis kualitatif dan kuantitatif dengan metode komparatif.

TEORI DAN METODOLOGI

Metode Analisis Aktivasi Neutron Komparatif

Suatu unsur radioaktif (radioisotop) akan memancarkan radiasi yang spesifik dan unik. Sifat radioaktivitas unsur yang unik ini dapat dimanfaatkan untuk mengenali jenis unsur pemancarnya. Dari pengenalan sifat radioaktivitas unsur tersebut dapat dilakukan penentuan jenis unsur (analisis kualitatif) dan kandungannya (analisis kuantitatif).

Sifat radioaktivitas yang dipakai sebagai sarana untuk melakukan analisis kualitatif adalah energi radiasi sinar gamma. Setiap unsur radioaktif akan memancarkan sinar gamma dengan energi yang spesifik dan unik, dengan demikian jika energi gamma yang dipancarkan oleh suatu radioisotop diukur dan kemudian dapat dikenali, maka unsur pemancarnya akan segera dapat ditentukan.

Parameter lain dari sifat radioaktivitas adalah aktivitas radioisotop, yaitu sifat yang menunjukkan banyaknya sinar gamma yang dipancarkan oleh radioisotop pada energi tertentu. Aktivitas radioisotop akan sebanding dengan jumlah atom pemancarnya. Jadi, dengan diketahuinya aktivitas radioisotop, maka jumlah atom (selanjutnya dapat dikonversi ke kandungan unsur radioisotop) dapat ditentukan (analisis kuantitatif).

Dalam AAN komparatif, cuplikan yang dianalisis dan unsur standar yang telah diketahui jenis dan kandungannya secara bersamaan, dalam satu tempat, dibuat menjadi radioaktif dengan cara menyinarinya dengan neutron dalam sebuah reaktor riset nuklir. Setelah unsur dalam cuplikan dan unsur standar menjadi radiaktif (radioisotop), kemudian dilakukan pengukuran. Hasil pengukuran adalah berupa spektrum sinar gamma. Dengan membandingkan spektrum unsur standar terhadap spektrum cuplikan, maka jenis dan kandungan unsur dalam cuplikan dapat ditentukan, yaitu :

$$m_e = \frac{A_e}{A_s} m_s = \frac{L_e \cdot e^{\lambda_e \cdot t_{de}} (1 - e^{-\lambda_e \cdot t_{ca}})}{L_s \cdot e^{\lambda_s \cdot t_{ds}} (1 - e^{-\lambda_s \cdot t_{cs}})} m_s \quad (1)$$

dengan m_i , A_i , L_i , λ_i , t_{di} dan t_{ci} masing-masing menunjukkan massa, aktivitas, luas puncak foton, konstanta peluruhan, waktu peluruhan dan waktu pengukuran aktivitas. Subkrip i menunjukkan e untuk unsur yang dianalisis (belum diketahui kuantitasnya) dan s untuk unsur standar.

Pengenalan Puncak Foton Spektrum Gamma

Pada suatu analisis spektrum gamma atau spektrometri gamma, pengenalan puncak sinyal spektrum (puncak foton) adalah suatu hal yang mutlak, karena dengan telah dikenalnya suatu puncak foton dalam spektrum dengan baik maka semua parameter puncak foton dapat ditentukan dengan tepat dan teliti. Ketelitian penentuan parameter puncak foton termasuk luas puncak, pada akhirnya akan mempengaruhi kualitas analisis.

Spektrum gamma suatu unsur diperoleh dari pengukuran radioaktivitas cuplikan teraktivasi dengan menggunakan perangkat elektronik yang disebut *Multi Channel Analyzer* (MCA). Hasil pengukuran adalah berupa data spektrum gamma. Spektrum gamma hasil pengukuran radioaktivitas cuplikan mengandung kesalahan yang terwujud sebagai derau (*noise*) pada spektrum yang berupa sinyal digital. Derau yang timbul akan mengganggu analisis dan harus dieliminasi. Salah satu cara untuk menekan derau adalah dengan memperbaiki rasio sinyal terhadap derau. Proses ini sering disebut sebagai proses penghalusan spektrum.

Untuk menaikkan rasio sinyal terhadap derau, dalam pengembangan program komputer PASAN-K digunakan filter numerik Golay-Savitzky, yang dapat dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut.

$$\tilde{c}(n) = \frac{1}{N_m} \sum_{i=-m}^m C_i c(n+i) \quad (2)$$

dengan $c(n)$, $\tilde{c}(n)$ adalah jumlah cacah dan cacah tersaring pada kanal ke- n . Nilai dari N_m dan C_i untuk suatu harga m tertentu ditentukan dengan deret polinomial yang di usulkan oleh Golay-Savitzky^[1], tetapi dapat pula ditentukan dengan fungsi Gauss. Dalam perangkat lunak PASAN-K disediakan nilai parameter tersebut untuk $m = 2, 3, 4$ yang dihitung berdasarkan polinomial Golay-Savitzky dan Gauss.

Perbaikan rasio sinyal terhadap derau dengan penghalusan spektrum tidak boleh dilakukan secara berlebihan, harus proporsional. Penghalusan berlebihan akan menghasilkan spektrum yang benar-benar halus, tetapi informasi yang sesungguhnya jadi bergeser, akibatnya penentuan parameter puncak foton jadi tidak akurat lagi. Penentuan nilai m sangat mempengaruhi tingkat penghalusan, semakin tinggi nilai m mengakibatkan penghalusan yang berlebihan.

Penentuan Pusat Puncak Foton

Setelah keberadaan puncak foton dalam spektrum gamma dikenali, maka untuk mengenali lebih jauh tentang parameter karakteristik dari puncak misalnya letak puncak (koordinat) dalam kanal dan nilai FWHM (*Full Width Half Maximum*), perlu

ditetapkan rentang daerah puncak foton (*region of interest*, ROI). Dalam PASAN-K, untuk menetapkan ROI, pertama kali yang dilakukan adalah menetapkan pusat puncak (*centroid*). Penetapan centroid dilakukan dengan metode titik potong nol suku turunan linear, yaitu:

$$p = m + \frac{\Delta n_m}{\Delta n_m - \Delta n_{m+1}} \quad (3)$$

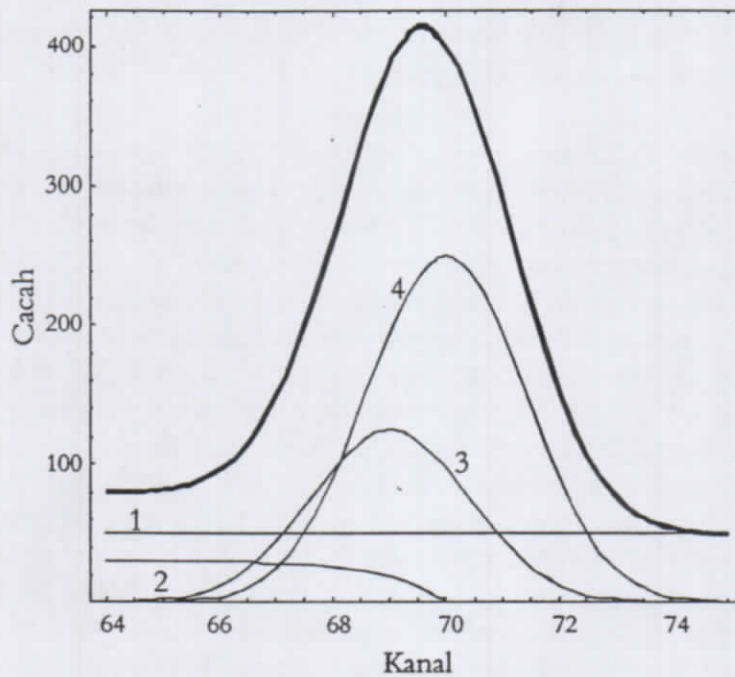
$$\Delta n_m = \frac{1}{a} \sum_{k=-K}^K k \cdot c_{m+k} \quad (4)$$

dengan a konstanta pembobot (nilainya 10 untuk $K = 2$, dan 28 untuk $K = 3$), c_m adalah cacah pada kanal ke- m , K biasanya diambil nilai 2 atau 3.^[2] m adalah kanal yang berada tepat satu kanal disebelah kiri titik potong nol suku turunan linear (Δn). p adalah kanal tempat *centroid* berada.

Setelah pusat puncak ditetapkan batas akhir dan awal puncak dapat ditentukan dengan pertimbangan nilai FWHM dari hasil kalibrasi. Penentuan batas awal dan akhir daerah puncak tidak perlu terlalu akurat, kesalahan satu sampai dengan dua kanal dalam penetapan daerah batas tidak akan mempengaruhi hasil akhir secara berarti jika p sudah ditentukan dengan akurat.

Penelusuran tak linear

Penelusuran tak linear (*nonlinear fitting*) adalah suatu proses untuk menelusuri puncak yang berada dalam rentang ROI. Dari penelusuran tak linear ini akan diperoleh nilai-nilai dari parameter puncak foton. Keakuratan dari proses penelusuran untuk mendapatkan parameter puncak foton tergantung dari fungsi penelusur (*fitting function*) yang digunakan. Fungsi penelusur yang dipakai dalam PASAN-K adalah suatu fungsi penelusur tak linear yang mempertimbangkan keberadaan puncak majemuk (*overleaping peaks*) dalam suatu puncak. Bentuk dari berbagai komponen puncak foton yang dipertimbangkan keberadaannya dalam fungsi penelusur diperlihatkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Komponen penyusun dari fungsi penelusur

Dari beberapa kurva komponen yang diperlihatkan dalam Gambar 1, dapat disusun model fungsi penelusur sebagai berikut:

$$f(n) = a_1 + a_2 e^{-a_3(n-a_4)^2} + a_5 \left\{ 1 - e^{b_3((n-b_4)-|n-b_4|)} \right\} + a_6 e^{-a_7(n-a_8)^2} \quad (5)$$

pada persamaan ini, n menunjukkan kanal ke- n , $a_1 \cdots a_8$ adalah parameter yang nilainya akan ditelusuri dengan penelusuran tak linear, b_3 dan b_4 adalah konstanta tetap yang nilainya $b_3 \approx 2.773 / FWHM$ dan $b_4 =$ kanal centroid. Kurva dengan garis tebal pada Gambar 1 adalah bentuk kurva dari persamaan (5) jika nilai $a_1 \cdots a_8$ telah dapat diketahui. Dalam model fungsi penelusur tersebut terdapat empat buah komponen, yaitu satu fungsi linear dan tiga fungsi eksponensial.

Penelusuran tak linear dilakukan secara numerik dengan menggunakan kaidah kuadrat terkecil (*least square*). Algoritma yang digunakan dalam melakukan penelusuran dengan kaidah kuadrat terkecil adalah algoritma yang dikembangkan oleh Levenberg-Marquadt.

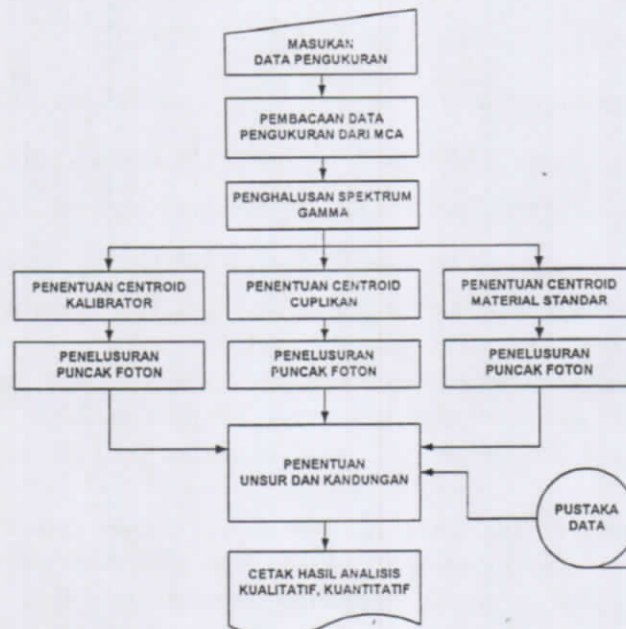
Dengan diketahuinya semua parameter dari fungsi penelusur, maka karakteristik dari puncak foton yang dianalisis dapat diketahui dengan mudah. Karakteristika puncak foton ini setelah dianalisis akan menghasilkan kanal tempat posisi puncak berada dan luas puncak yang sangat dibutuhkan dalam aplikasi AAN komparatif melalui persamaan (1). Posisi kanal tempat puncak berada sangat berguna untuk menetapkan jenis unsur (analisis kualitatif) dan luas puncak sangat berguna

dalam menetapkan kuantitas unsur. Jadi kedua parameter ini dalam perhitungannya harus dijaga seakurat mungkin, agar kualitas hasil analisisnya tetap tinggi.

DIAGRAM ALIR SPEKTROMETRI PADA PASAN-K

Cara kerja PASAN-K dalam menganalisis spektrum gamma hasil pengukuran dengan detektor HP-Ge (*High Purity Germanium*), diperlihatkan dalam diagram alir PASAN-K secara umum, yaitu dalam Gambar 2. Pada gambar tersebut terlihat bahwa analisis kualitatif dilakukan secara kasar untuk pertama kali, yaitu pada saat penentuan lokasi pusat puncak. Jika puncak majemuk untuk sementara waktu diabaikan, maka pada tahap penentuan pusat puncak ini telah dapat diketahui unsur-unsur apa saja yang terkandung dalam cuplikan. Dalam tahapan ini unsur-unsur yang diwakili oleh puncak yang berada dalam puncak majemuk tidak akan terdeteksi. Jadi tahapan ini dapat dikatakan sebagai pra analisis kualitatif atau analisis kualitatif kasar.

Setelah pusat puncak dan kemudian rentang daerah analisis (ROI) dapat ditetapkan maka seperti terlihat dalam diagram alir, PASAN-K akan menganalisis puncak demi puncak sesuai dengan masing-masing ROI-nya dengan penelusuran tak linear melalui melalui fungsi penelusur yang telah ditetapkan. Hasil analisis ini adalah parameter puncak yang dapat digunakan untuk menetapkan berapa buah puncak yang berada dalam lingkup ROI dan di mana letak posisi pusat puncaknya secara tepat, serta berapa luas dari puncak-puncak yang terdeteksi. Pertimbangan posisi setiap pusat puncak terhadap data pustaka akan menghasilkan luaran tentang unsur apa saja yang terkandung dalam cuplikan. Selanjutnya kuantitas dari unsur tersebut dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (1) setelah parameter puncak digunakan untuk menghitung luas puncak foton.



Gambar 2. Diagram alir analisis spektrum pada PASAN-K

Dalam analisis spektrum pada PASAN-K, seperti ditunjukkan pada Gambar 2, penentuan centroid dan penelusuran puncak foton dilakukan berulang untuk semua data spektrum yang dibaca, termasuk didalamnya data kalibrasi yang biasanya selalu dilakukan pada setiap analisis cuplikan. Dalam pembacaan data, semua spektrum gamma hasil pengukuran MCA terhadap kalibrator, material standar dan cuplikan dibaca. Jadi pengguna hanya perlu memerintahkan pembacaan data terhadap spektrum yang ada, selanjutnya analisis dan komparasi terhadap semua spektrum yang telah dibaca dilakukan secara otomatis.

HASIL PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN

Untuk keperluan uji fungsi dari PASAN-K, digunakan spektrum *benchmark* yang dipublikasikan oleh IAEA melalui literatur TECDOC-1011^[3]. Dalam TECDOC-1011 terdapat spektrum kalibrasi yang dibuat dengan pencacahan nuklida Co-57, Cs-137, Na-22, Mn-54 dan Co-60. Spektrum cuplikan diperoleh dengan melakukan pencacahan terhadap nuklida Ra-226 selama 2000 detik.

Dalam analisis spektrum kalibrasi, PASAN-K melakukan penentuan posisi pusat puncak foton (*centroid*) dua tahap. Penentuan centroid pertama (p) dilakukan secara deterministik dengan bantuan persamaan (3) dan (4), selanjutnya berdasarkan letak *centroid* yang diperoleh dari tahap pertama ini dapat ditetapkan *region of interest* (ROI). Tahap penentuan *centroid* yang kedua dilakukan dengan cara melakukan penelusuran data selebar rentang ROI dengan algoritma Levenberg-Marquardt. Dari hasil penelusuran tahap kedua ini diperoleh letak *centroid* terkoreksi (p'). Secara garis besar hasil analisis PASAN-K dalam penentuan *centroid* untuk spektrum kalibrasi ditampilkan pada Tabel 1 berikut ini.

Tabel 1. Hasil analisis dari PASAN-K terhadap spektrum kalibrasi IAEA

No.	Kanal1			Energi ke V (rekomendasi IAEA)
	p persamaan (3), (4)	p' penelusuran tak-linear	$\frac{p - p'}{p} \times 100\%$	
1.	172.70	172.75	-0.028952	
2.	178.22	178.21	0.005611	
3.	203.14	203.14	0.000000	
4.	209.61	209.61	0.000000	
5.	297.56	297.57	-0.003361	122.06
6.	334.05	334.04	0.002994	
7.	1277.55	1277.55	0.000000	511.00
8.	1657.60	1657.60	0.000000	661.66
9.	2094.53	2094.53	0.000000	834.84
10.	2948.28	2948.27	0.000339	1173.24
11.	3203.99	3203.99	0.000000	1274.54
12.	3350.31	3350.30	0.000298	1332.50
13.	3674.33	3674.22	0.002994	

Dalam data hasil analisis yang ditampilkan pada Tabel 1, terlihat bahwa selisih atau simpangan dalam penentuan *centroid*, antara analisis dengan menggunakan cara

deterministik, yaitu dengan persamaan (3) dan (4), dan analisis dengan cara statistik, yaitu dengan algoritma Levenberg-Marquardt, maksimum 0.028952 %. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa kedua cara yang digunakan oleh PASAN-K untuk penentuan letak *centroid* sudah sinkron. Jika penentuan letak *centroid* dengan cara statistik dianggap yang paling benar (*rigorous*), maka dari kolom selisih relatif dari kedua cara penentuan *centroid* yang ditampilkan dalam Tabel 1 telah dapat dibuktikan bahwa penentuan *centroid* dengan cara deterministik melalui persamaan (3) dan (4) adalah cukup teliti, karena penyimpangan maksimum masih jauh lebih rendah dari 1 %.

Dari analisis spektrum kalibrasi, telah dapat dibuktikan bahwa cara penentuan lokasi puncak foton atau *centroid* yang digunakan oleh PASAN-K sudah selaras, jika salah satu cara benar maka keduanya menjadi benar, akan tetapi jika salah satu salah maka keduanya menjadi salah. Uji fungsi selanjutnya adalah untuk mengetahui efektivitas dan kebenaran dari algoritma yang digunakan dalam KASAN-K.

Untuk menyelidiki efektivitas dan kebenaran dari algoritma-algoritma yang diaplikasikan dalam PASAN-K digunakan spektrum cuplikan dari IAEA yang diperoleh dari TECDOC-1011. Spektrum ini dibuat dengan pencacahan radionuklida Ra-226 selama 2000 detik. Sebelum analisis terhadap spektrum cuplikan (radionuklida Ra-226) dilakukan, PASAN-K melakukan analisis terhadap spektrum kalibrasi untuk mendapatkan kurva kalibrasi energi (keV) vs kanal. Energi yang digunakan untuk kalibrasi diperlihatkan pada kolom "Energi" pada Tabel 1. Hasil yang diperoleh dari analisis terhadap cuplikan dengan PASAN-K diperlihatkan dalam Tabel 2.

Data yang ditampilkan dalam Tabel 2 adalah data lokasi pusat puncak (*centroid*) hasil analisis terhadap spektrum cuplikan IAEA dengan menggunakan PASAN-K (p_p). Dalam tabel tersebut ditampilkan juga data referensi lokasi *centroid* dari IAEA (p_r), dan prosentasi kesalahan analisis PASAN-K terhadap data referensi IAEA ($\frac{p_p - p_r}{p_r} \times 100$). Jika diteliti data-data tersebut, terlihat bahwa kesalahan maksimum dari lokasi *centroid* PASAN-K adalah 0.433 %, sedangkan kesalahan minimum adalah 0.003 %. Jika seluruh kesalahan $\frac{p_p - p_r}{p_r} \times 100$ dirata-ratakan, maka akan diperoleh nilai rata-rata kesalahan sebesar 0.113 %. Dari data-data ini jelas bahwa kesalahan maksimum yang dibuat oleh PASAN-K dalam menganalisis lokasi *centroid* dari spektrum cuplikan IAEA masih berada di bawah 1 %. Disamping itu, kesalahan rata-rata PASAN-K juga masih rendah, lebih kurang sepersepuluh kali lipat dibawah harga satu persen. Kesalahan di atas satu persen akan dapat menyebabkan kesalahan analisis dalam mengidentifikasi nuklida pemilik puncak foton.

Tabel 2. Hasil analisis lokasi *centroid* terhadap spektrum cuplikan IAEA dan PASAN-K

No	p_i IAEA	p_p PASAN-K	$\frac{p_p - p_i}{p_i} \times 100$	No	p_i IAEA	p_p PASAN-K	$\frac{p_p - p_i}{p_i} \times 100$
1	186.24	186.411	-0.092	29	934.04	933.011	0.110
2	242.19	242.263	-0.030	30	1052.01	1050.556	0.138
3	259.08	259.073	0.003	31	1070.09	1068.482	0.150
4	274.98	274.753	0.083	32	1120.31	1118.695	0.144
5	348.86	348.678	0.052	33	1133.75	1132.017	0.153
6	351.86	351.695	0.047	34	1155.27	1153.485	0.155
7	386.68	386.430	0.065	35	1182.19	1180.369	0.154
8	388.79	388.607	0.047	36	1207.78	1205.695	0.173
9	405.67	405.529	0.035	37	1238.20	1236.107	0.208
10	454.74	454.508	0.051	38	1281.09	1278.790	0.204
11	461.10	461.693	-0.129	39	1377.89	1375.125	0.199
12	474.35	473.966	0.081	40	1385.54	1382.787	0.224
13	480.35	480.119	0.048	41	1401.76	1398.848	0.044
14	486.99	486.800	0.039	42	1408.18	1405.304	0.241
15	511.00	510.566	0.085	43	1425.81	1422.978	0.241
16	533.57	533.262	0.058	44	1509.48	1506.102	-0.022
17	580.05	579.706	0.059	45	1535.95	1535.278	0.276
18	609.26	608.853	0.067	46	1583.58	1579.762	0.281
19	665.36	664.893	0.070	47	1599.74	1595.881	0.297
20	683.05	682.594	0.067	48	1657.08	1657.440	0.303
21	702.97	702.515	0.065	49	1730.16	1725.390	0.389
22	719.77	719.227	0.075	50	1765.08	1760.121	-0.049
23	740.74	741.904	-0.157	51	1838.99	1833.534	-0.142
24	768.32	767.659	0.086	52	1848.16	1842.566	0.433
25	785.81	784.612	0.152	53	1873.81	1866.523	0.208
26	786.61	785.198	0.180	54	2110.92	2111.962	0.204
27	806.13	805.416	0.089	55	2193.73	2196.844	0.199
28	839.01	838.148	0.103	56	2449.26	2438.657	0.224

Dalam penentuan apakah hasil analisis dapat diterima atau tidak, biasanya digunakan pengujian t atau chi-square. Dalam makalah ini pengujian tersebut tidak dilakukan, hal ini disebabkan bahwa dari data kesalahan maksimum perhitungan PASAN-K masih berada di bawah satu persen.

Dari data yang ditampilkan pada Tabel 2, dapat disimpulkan bahwa perhitungan yang dilakukan oleh PASAN-K benar dan cukup akurat. Jadi dalam hal ini algoritma perhitungan yang digunakan dalam PASAN-K berfungsi sesuai dengan rancangan.

Walaupun dari dua tabel yang telah diperlihatkan di atas telah dapat disimpulkan kinerja dari PASAN-K, masih terdapat salah satu aspek yang harus dipertimbangkan dalam menguji perangkat lunak spektrometri gamma. Aspek tersebut adalah aspek analisis kuantitatif, yaitu penentuan luas puncak foton. Dalam meneliti hasil analisis PASAN-K dalam hal penentuan luas puncak foton, diambil beberapa puncak foton dalam Table 2 yang mempunyai luasan di atas 2000, mengingat untuk luasan kecil kesalahan statistik perhitungan, baik pada PASAN-K maupun referensi IAEA, menjadi

cukup besar. Hasil analisis kuantitatif atau penentuan luas puncak dengan PASAN-K terhadap spektrum cuplikan IAEA diperlihatkan pada Tabel 3 berikut ini.

Tabel 3. Hasil analisis kuantitatif terhadap spektrum cuplikan IAEA

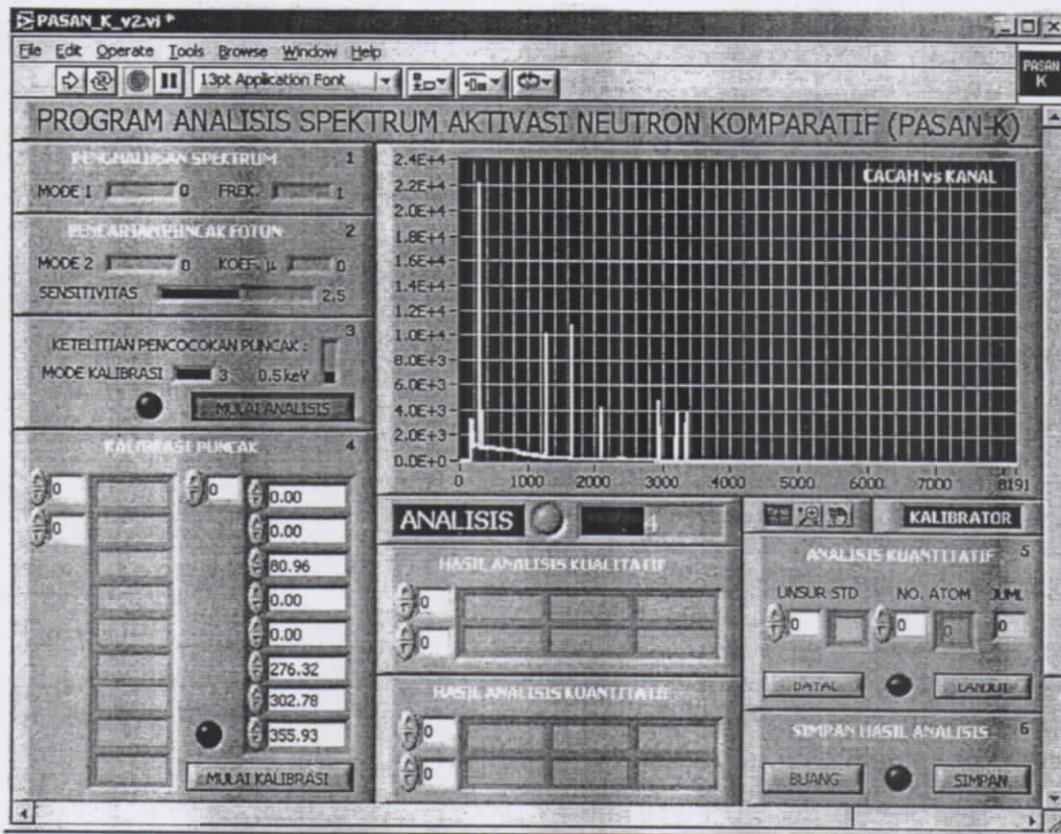
No.	Luas puncak Refr. IAEA (A_I)	Luas puncak Refr. IAEA (A_I)	Kesalahan relatif $\frac{A_p - A_I}{A_I} \times 100$
1.	18035	17524	-2.833
2.	29268	27616	-5.644
3.	98593	98316	-0.281
4.	3548	2904	-18.151
5.	73073	68300	-6.532
6.	2264	2156	-4.770
7.	6299	5880	-6.652
8.	3375	3092	-8.385
9.	13768	12824	-6.857
10.	4941	4640	-6.092
11.	3126	2740	-12.348
12.	9378	8648	-7.784

Dari data yang ditampilkan dalam Tabel 3, terlihat bahwa prosentasi kesalahan relatif untuk analisis kuantitatif dengan PASAN-K, maksimum mencapai 18.1511 %. Dalam tabel tersebut terlihat bahwa hitungan luas puncak yang dilakukan oleh PASAN-K semuanya lebih kecil dibandingkan dengan luas puncak referensi IAEA. Dalam hal penentuan luas puncak, pemodelan puncak dan penelusurannya (*fitting*) merupakan faktor dominan yang mempengaruhi ketelitian perhitungan. Pemodelan puncak yang digunakan dalam PASAN-K adalah seperti diperlihatkan dalam Gambar 1, yang mana sebuah puncak dimodelkan terdiri dari empat buah komponen. Dari kesalahan maksimum (18.1511%) untuk PASAN-K adalah cukup wajar, karena model puncak yang digunakan dalam PASAN-K tidak terlalu kompleks. Salah satu contoh kode komputer yang menggunakan model cukup kompleks adalah HYPERMET^[4]. Dalam sekali analisis HYPERMET dapat menganalisis sepuluh buah puncak. Jadi jelas bahwa mode puncak yang digunakan dalam PASAN-K mempunyai komponen yang sedikit sehingga luas puncak hasil analisisnya menjadi cenderung lebih kecil dibandingkan referensi IAEA.

Dari sudut pandang penelusuran (*fitting*) kurva, dalam PASAN-K digunakan penelusuran tak linear dengan algoritma Levenberg-Marquardt. Algoritma ini cukup handal dan stabil, tetapi bukan jenis algoritma yang *rigorous* (paling teliti). Tentu saja penggunaan algoritma sederhana akan membawa pengaruh yang baik, terutama dalam hal waktu analisis yang akan jauh lebih singkat. Algoritma yang digunakan dalam HYPERMET adalah tipe algoritma Newton, yang jauh lebih canggih dari algoritma Levenberg-Marquardt^[5]. Dari perbandingan dalam hal pemodelan dan algoritma penelusuran tak linear, maka hasil analisis kuantitatif terhadap spektrum cuplikan

standar IAEA dengan PASAN-K dapat dikategorikan cukup baik dan relevan, karena kesalahan rata-rata 7.19413% masih berada di bawah 10%. Berbeda dengan analisis kualitatif, yaitu dalam analisis penentuan lokasi *centroid*, yang harus teliti demi kebenaran dalam identifikasi nuklida, kesalahan di atas satu persen akan berakibat fatal. Kesalahan kuantitatif juga harus teliti, tetapi kesalahan yang terjadi hanya akan menyebabkan kesalahan dalam penentuan kadar nuklida atau unsur. Oleh karena itu kesalahan sebesar sepuluh persen masih dapat ditolerir. Apalagi jika dalam analisis NAA komparatif ternyata luas puncak ini diperbandingkan dengan luas puncak dari spektrum unsur standar sesuai dengan persamaan (1), maka kesalahan tersebut akan tereliminasi dengan sendirinya.

Dalam pembahasan di atas telah ditampilkan beberapa hasil analisis terhadap spektrum cuplikan standar IAEA, berikut ini adalah tampilan anatarmuka PASAN-K ver. 2.



Gambar 3. Tampilan antarmuka (interface) dari PASAN-K versi 2

KESIMPULAN

Dalam penelitian ini telah berhasil dirancang dan dibuat kode komputer untuk spektrometri gamma yang dinamai PASAN-K (Program Analisis Spektrum Aktivasi Neutron - Komparatif). Kode komputer dirancang khusus untuk digunakan dalam analisis aktivasi neutron komparatif yang dalam aplikasinya terdapat banyak spektrum gamma yang harus dianalisis dan hasil analisisnya saling diperbandingkan (dikomparasi).

Dari hasil uji coba dengan menggunakan spektrum benchmark dari IAEA, diperoleh kesimpulan bahwa PASAN-K berfungsi dengan baik dan benar. Penyimpangan relatif antara hasil analisis PASAN-K dengan referensi IAEA berada pada batas-batas wajar dan dapat diterima (*acceptable error*), tetapi belum dapat digolongkan sebagai kode komputer yang bertaraf *excellent*, karena kesalahan relatif maksimum dari perhitungan luas puncak melebihi 10%, walaupun kesalahan relatif rata-rata masih berada di bawah 10%. Perbaikan dan penyempurnaan tingkat ketelitian akan masih dapat ditingkatkan jika dilakukan pengembangan pada algoritma penelusuran tak linear dan pemodelan puncak foton.

UCAPAN TERIMA KASIH

Rancang-bangun PASAN-K ini merupakan bagian dari Penelitian RUT VII tentang "Pengembangan Sistem Perangkat Pemantauan Pencemaran Lingkungan Berbasis Analisis Pengaktipan Neutron" yang didanai oleh Kementerian Negara Riset dan Teknologi RI(KMNRT RI). Karena itu kami mengucapkan terima kasih kepada KNMRT RI yang telah mendanai penelitian ini, dan juga kepada rekan sejawat peneliti Ir. Sri Wardani MEng. Drs. Amir Hamzah, serta para teknisi Ir. Suwoto, Hendra Prasetya A.Md., Sunarko A.Md., Putut Heri Setiawan, dan Saleh Hartaman yang saling bantu membantu dalam pelaksanaan RUT VII selama tahun 1998 sampai dengan tahun 2001.

DAFTAR PUSTAKA

1. SAFITZKY, A. and GOLAY, M.J.E, "Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squeres Procedures", *Anal. Chem.*, 36, 1964.
2. NOGUCHI, M., "Gamma-ray Spectrometry - in Japanesc", Nikkan Kogyo Shibun sha, Tokyo, 1980.
3. ANONIM, "Intercomparison of Gamma-ray Spectrum Analysis Software Packages", IAEA TECDOC-1011, International Atomic Energy Agency, Viena
4. PHILLIPS, G.W. and MARLOW, K.W., "Automatic Analysis of Gamma-ray Spectra from Ge Detector", *Nuclear Instruments and Methods*, 137, p.525, 1976.
5. BATES, D.M. and WATTS, D.G., "Nonlinear Regression Analysis and Its Application", Wiley, New York.