

PENGEMBANGAN PAKET PROGRAM KOMPUTER PEMANTAUAN RADIASI GAMA DI SEKITAR FASILITAS NUKLIR*

Yus R. Akhmad , Pudjijanto MS, dan Subiharto

ABSTRAK

Paket program komputer untuk pemantauan radiasi gama di sekitar fasilitas nuklir telah dikembangkan sehingga dapat dicangkokkan pada *portable gama analyzer* yang tersedia secara komersial. Program telah dicoba dan berhasil mentransfer file data (distribusi tinggi pulsa) dari luaran spektrometer MicroNOMAD (produk ORTEC) kemudian mengolahnya menjadi data besaran dosimetri dan fisika. Uji banding antara luaran program, untuk besaran laju dosis serap dan konsentrasi radioaktivitas alam, dengan luaran dari peralatan survey standard dari Pusat Standardisasi dan Penelitian Keselamatan Radiasi (PSPKR) telah dilakukan. Hasil uji banding menunjukkan kesesuaian nilai luaran yang cukup memadai. Paket program ini diberi nama *GABATAN (Gamma Analyzer of Batan)* dan *NAGABAT (Natural Gamma Analyzer of Batan)*. Program *GABATAN* dapat digunakan di berbagai fasilitas nuklir untuk menganalisis medan foton gama sampai energi 9 MeV. Sedangkan program *NAGABAT* digunakan untuk menganalisis sumbangan foton gama alam terhadap laju paparan di suatu lokasi.

ABSTRACT

Computer codes for gamma radiation monitoring in the vicinity of nuclear facility have been developed that the codes could be introduced to the commercial portable gama analyzer. The codes have been tested to transfer data file (pulse high distribution) from MicroNOMAD gamma spectrometer (ORTEC product) and to convert them into quantities of dosemetry and physics. In addition, comparison test with standard surveymeter of (PSPKR) for gamma absorbed dose rate and natural radioactivity concentration have been done. The results shows in adequately agreement. The computer codes are called as *GABATAN (Gamma Analyzer of Batan)* and *NAGABAT (Natural Gamma Analyzer of Batan)*. *GABATAN* code is able to used at various nuclear facilities for analyzing gamma field up to 9 MeV, while *NAGABAT* is able to used for analyzing the contribution of natural gamma rays to the exposure rate in the certain location.

PENDAHULUAN

Untuk memenuhi kebutuhan praktek keselamatan kerja radiasi, perlu diupayakan penyediaan/penguasaan teknik pengukuran yang andal. Penerapan metoda matrik respon untuk menganalisis medan radiasi gama dari hasil pengukuran dengan spektrometer gama yang menggunakan detektor sintilasi NaI(Tl) telah lama

diusulkan oleh peneliti terdahulu^{1,2,3}. Dengan cara ini distribusi fluks (spektrum energi) di lokasi detektor dapat ditentukan melalui prosedur matematik, dikenal dengan istilah *unfolding*, yang dikenakan kepada distribusi tinggi pulsa terhadap salur. Dari data fluks ini dapat dihitung berbagai besaran lain seperti laju paparan, energi rerata, laju dosis serap di berbagai media, dan lain lain.

* Telah diterbitkan pada majalah TDM, volume 7, Nomor 2, Juni 1998

Dalam perkembangannya, walaupun teknik ini andal untuk mengkarakterisasi medan radiasi gama, tetapi pada masa lalu tidak umum untuk penggunaan survei rutin di lapangan karena memerlukan peralatan yang tidak praktis. Pada saat ini, dengan pesatnya perkembangan teknologi komputer dan elektronika, maka sudah memungkinkan untuk penyederhanaannya sehingga teknik ini dapat dikembangkan dan melengkapi peralatan survei. *Multichannel analyzer* dan komputer pribadi berukuran kecil (*portable*) sudah tersedia secara komersial. Oleh karena itu di PRSG metoda matrik respon dikembangkan guna melengkapi peralatan pengawasan maupun penelitian.

Dalam laporan ini akan disampaikan hasil pengembangan program komputer untuk mengevaluasi medan radiasi gama di sekitar fasilitas nuklir berdasarkan metoda matrik respon sehingga program tersebut dapat dicangkokkan pada survei meter gama (*portable gama analyzer*) yang tersedia secara komersial. Program komputer tersebut di beri nama GABATAN (Gamma Analyzer of Batan) dan NAGABAT (Natural Gamma Analyzer Of Batan). Uji coba program komputer untuk mentransfer data luaran (agihan tinggi pulsa) dari *portable gama analyzer* MicroNOMAD dan mengolahnya menjadi besaran dosimetri dan fisika telah berhasil dilakukan. Selain itu untuk meyakinkan kelaikan luaran program, juga dilakukan eksperimen uji banding dengan peralatan survey standard dari PSPKR untuk besaran laju dosis serap dan konsentrasi radioaktivitas alam.

TEORI DAN METODOLOGI

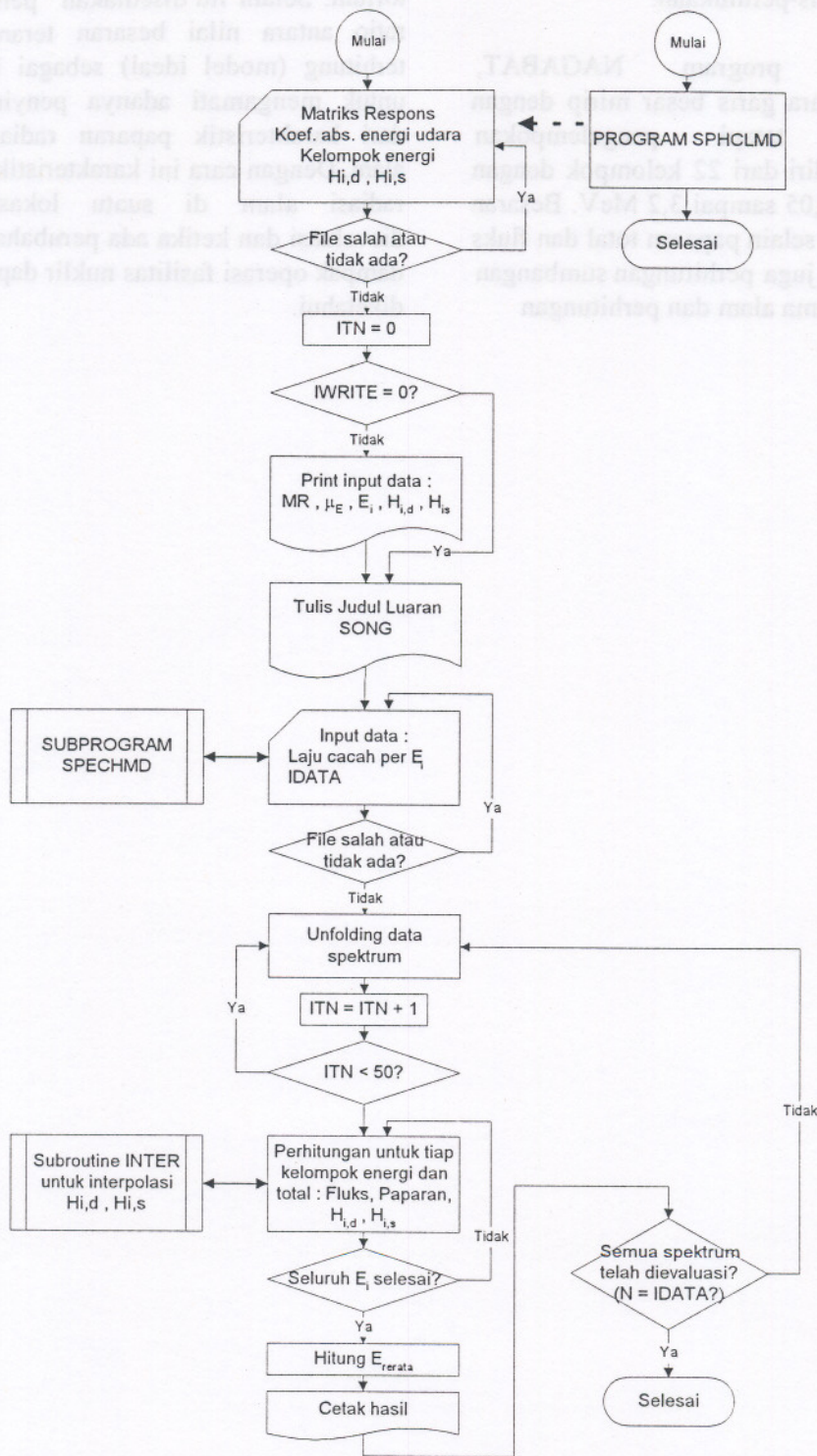
Teori mengenai metoda matrik respon untuk menganalisis medan radiasi

gama dari hasil pengukuran dengan spektrometer gama yang menggunakan detektor sintilasi NaI(Tl) telah disajikan di berbagai pustaka^{1,2,3,4,5}). Prosedur *unfolding* distribusi tinggi pulsa untuk memperoleh distribusi fluks gama dalam kerangka metoda matrik respon yang diadopsi oleh paket program GABATAN dan NAGABAT adalah prosedur teknik iterasi yang diusulkan oleh Scofield dengan algoritme programnya telah dipersiapkan oleh Mollenauer. Secara garis besar, prosedur iterasi tersebut telah disajikan pada pustaka (5).

Program NAGABAT dan GABATAN

Diagram alir sederhana program GABATAN disajikan pada Gambar 1. Program ini dirancang agar dapat dieksekusi dengan personal komputer menggunakan bahasa pemrograman WATFOR77. Program bersifat interaktif sehingga dapat memberi kemudahan kepada pemakai dalam menelusuri kekeliruan pada data file masukan. Data masukan disiapkan dalam bentuk file di dalam disket atau harddisk yang ditulis dengan format ASCII dan dikelompokkan menjadi dua kelompok data file yaitu file pertama memuat antara lain data matriks respon, kelompok energi, koefisien absorpsi energi udara, dan data indeks taradosis $H_{I,d}$ dan $H_{I,s}$ dari Dimbylow⁶). Data file kedua memuat data laju cacah per kelompok energi (distribusi tinggi pulsa atau spektrum luaran dari spektrometer gama NaI(Tl)).

GABATAN menyaratkan bahwa spektrum luaran spektrometer gama sebelum diinputkan harus terkalibrasi dan dikelompokkan menjadi 46 kelompok energi dengan rentang dari 0,01 sampai 9,2 MeV. Dengan memanfaatkan program GABATAN, medan radiasi gama dapat dispesifikasi meliputi distribusi fluks, fluks total, distribusi paparan, paparan total,



Gambar 1. Diagram alir sederhana program GABATAN

Pengoperasian Portable Analyzer- MicroNOMAD(EG&G ORTEC)

MicroNOMAD dapat dihubungkan ke PC melalui *high-speed parallel port*. *Software* "MicroMCBTM" (setiap pembelian MicroNOMAD akan diberikan) dapat disisipkan ke PC untuk pengendalian moda akuisisi, emulasi MCA, dan analisis kuantitatif spektrum dari detektor NaI(Tl). Setelah parameter operasi ditetapkan MicroNOMAD dapat dilepaskan dari PC untuk pemakaian di lapangan. PC yang digunakan harus mempunyai kelengkapan sebagai berikut. *Software*: Microsoft Windows, Versi 3.1 atau lebih tinggi; DOS 3.3 atau lebih tinggi. *Hardware* : Intel 386 atau *processor* yang lebih tinggi, 4-MB *memory*, 3.5-in. *floppy drive*, *hard disk*, dan *coprocessor*. Microsoft atau IBM *mouse* atau *built-in track ball* yang setara.

Spesifikasi MicroNOMADTM

Memori Data: 128 k RAM, 2³¹-1 cacah per kanal. Dapat menyimpan sampai 127 *file* untuk spektrum 256 kanal, atau 63 *file* untuk spektrum 512 kanal, atau 31 *file* untuk spektrum 1024 kanal, atau 15 *file* untuk spektrum 2048 kanal. Apabila memori telah terisi penuh akan timbul pesan LED untuk mengingatkan agar *file* ditransfer ke PC.

Stabilitas: Spectrum broadening dan spectrum shift yang mencerminkan stabilitas atau statistik pencacahan yang disumbangkan oleh sistem spektrometer adalah masing-masing lebih kecil dari 3% pada kanal 661 keV ¹³⁷Cs.

Waktu Pengoperasian: Lebih dari delapan jam dengan 8 buah baterai alkaline ukuran AA.

Catu daya: 8 buah baterai alkaline ukuran AA atau dengan *external ac-power adapter* (range 4 - 6 V).

Karakterisasi Spektrometer Gama NaI(TL)

Matriks (fungsi) respon dari spektrometer gama merupakan himpunan data karakteristik respon dari sistem spektrometer ketika foton gama mengenai detektor untuk berbagai energi foton yang diperhatikan. Apabila dimensi kristal NaI(Tl) dan resolusi spektrometer sebagai fungsi energi telah diketahui, maka matriks respon dapat dibangkitkan dengan program komputer SPHECYL (pemaparan di lingkungan) atau dengan SPHCLMD (pemaparan di dalam fasilitas nuklir). Program SPHECYL dan SPHCLMD merupakan program pembangkit matriks respon yang dikembangkan di PRSG-Batan dengan mengacu pada program SPHERIX dari Minato⁷⁾.

Interaksi Paket Program dengan MicroNOMAD

Paket program pengolah luaran spektrometer NaI(Tl) ditulis dalam bahasa FORTRAN-77 dan telah disisipkan ke dalam *software* FORTRAN Power Station yang dapat bekerja dengan *system windows*. Apabila paket program dieksekusi, pemakai akan diminta memasukkan file matriks respon yang sesuai dengan kondisi irradiasi yaitu apakah untuk pengukuran di dalam fasilitas nuklir atau di lingkungan. Dalam hal pengukuran di dalam/di sekitar fasilitas nuklir disediakan data matriks respon dengan jangkauan energi foton sampai 9 MeV. Sedangkan untuk pengukuran di .

lingkungan disediakan matriks respon dengan jangkau energi foton sampai 3 MeV. Setelah file matriks respon dimasukkan, pemakai akan diminta untuk memasukkan file spektrum gama(luaran dari MicronNOMAD atau yang setara) dan nama file output program berikut identitas file seperlunya. Selain itu disediakan juga fasilitas kalibrasi(energi) ulang apabila pemakai menghendakinya.

Pengujian Kinerja Program

Evaluasi kesalahan pembacaan data *file* MicroNOMAD oleh paket program dilakukan dengan cara membandingkan jumlah cacah total untuk rentang energi tertentu antara luaran paket program dan menurut luaran MCA-MicroNOMAD. *File* data distribusi tinggi pulsa yang dipakai untuk pengujian merupakan *file* demo bernama MMCBDEMO.CHN yang disediakan oleh pemasok. Keterangan mengenai karakteristik spektrometer gama yang digunakan, seperti ukuran detektor dan kondisi iradiasi tidak diberikan oleh pemasok. Informasi ini penting apabila bermaksud ingin menspesifikasi medan radiasi gama secara akurat untuk data *file* yang bersangkutan berdasarkan luaran program. Walaupun demikian, untuk keperluan mengetahui bahwa paket program dapat 'berkomunikasi' dengan luaran MicroNOMAD dan mengolahnya secara konsisten, maka informasi atau keterangan mengenai data *file* seperti dimaksudkan di atas tidak harus ada.

Untuk meyakinkan bahwa hasil pengolahan data spektrometer oleh GABATAN dan NAGABAT menjadi besaran yang dikehendaki adalah memadai, maka uji banding dilakukan. Eksperimen uji banding dilaksanakan di dalam gedung RSG, di Balai Percobaan dan di Balai Operasi, dan di luar gedung RSG (sekitar 30 meter dari gedung) pada saat reaktor

beroperasi 20 MW. Sebagai peralatan pembanding untuk mengevaluasi besaran laju dosis serap adalah Environmental Meter type 6-80 (GM counter) milik PSPKR dan NRC model IP100 (Ion Chamber) milik PRSG, sedangkan untuk besaran konsentrasi radioaktivitas alam digunakan HPGe *gamma spectrometer* dengan pengolah data dari HASL milik PSPKR. Dalam hal pengukuran di luar gedung, karena program NAGABAT yang dikembangkan tidak memperhitungkan sumbangan dari sinar kosmik melainkan hanya berurusan dengan radiasi gama, maka respon dari survey meter pembanding dikoreksi dengan mengacu bahwa sumbangan sinar kosmik adalah sekitar 3,2 rad/jam. Untuk uji banding di dalam gedung reaktor, pengoreksian sumbangan sinar kosmik tidak dilakukan karena sumbangannya relatif kecil dibandingkan dengan sumbangan dari radiasi gama yang berasal dari operasi reaktor.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengujian GABATAN dan NAGABAT dalam hal mentransfer dan mengolah data dari luaran *portable gamma analyzer* MicroNOMAD disajikan pada Tabel 1 dan Tabel 2. Untuk data *file* yang bernama MMCBDEMO.CHN program GABATAN memberikan penyimpangan jumlah cacah total sekitar 0.1% lebih besar daripada luaran MicroNOMAD untuk rentang energi 10 keV - 9.2 MeV, sedangkan program NAGABAT memberikan penyimpangan sekitar 1.4 % lebih besar untuk rentang energi 50 keV-3.2 MeV. Adanya perbedaan penyimpangan pembacaan antara hasil dari GABATAN dan dari NAGABAT bisa dijelaskan sebagai berikut.

Data file MMCBDEMO.CHN berisi data distribusi tinggi pulsa dari hasil pengukuran untuk sumber Cs-137 dan Co-60 dengan kanal akhir dispesifikasi sebagai 1586.13 keV. Berdasarkan prosedur pengelompokkan energi foton yang dilakukan oleh program, maka data distribusi tinggi pulsa MMCBDEMO.CHN akan dikelompokkan menjadi dari kelompok 1 sampai 8 oleh GABATAN, lihat Tabel 1, dan dari kelompok 1 sampai 15 oleh NAGABAT, lihat Tabel 2. Dengan perkataan lain, untuk data MMCBDEMO.CHN, GABATAN

melakukan prosedur pengelompokkan energi sebanyak 8 kali sedangkan NAGABAT sebanyak 15 kali. Untuk kelompok energi di atas 1586 keV diberi angka nol karena sudah tidak tersedia data cacah. Dengan demikian, dari sudut pandang jumlah cacah total, NAGABAT akan memberikan penyimpangan yang lebih besar daripada GABATAN dikarenakan melakukan prosedur pengelompokkan yang lebih banyak pada interval energi yang diperhatikan. Walaupun begitu,

* GABATAN OUTPUT DATA *

Tabel 1. Test GABATAN mengambil data file dan mengolahnya MMCBDEMO.CHN

NO.	ENERGY RANGE	P.H.D.	E.D.	EXPOSURE	FLUX/(CM2/MEV/SEC)
1	.010 >> .200	6.2162E+02	4.2778E+00	6.9703E-01	2.2515E+01
2	.200 >> .400	6.5098E+02	7.1515E+00	4.0977E+00	3.5758E+01
3	.400 >> .600	3.6755E+02	3.5189E+00	3.4655E+00	1.7595E+01
4	.600 >> .800	6.3671E+02	1.8399E+01	2.5026E+01	9.1994E+01
5	.800 >> 1.000	2.3703E+02	5.5189E+00	9.3878E+00	2.7594E+01
6	1.000 >> 1.200	3.0492E+02	1.4879E+01	2.9849E+01	7.4395E+01
7	1.200 >> 1.400	1.8461E+02	1.1783E+01	2.7023E+01	5.8917E+01
8	1.400 >> 1.600	1.0002E+01	7.4145E-01	1.8956E+00	3.7073E+00
9	1.600 >> 1.800	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
10	1.800 >> 2.000	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
11	2.000 >> 2.200	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
12	2.200 >> 2.400	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
13	2.400 >> 2.600	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
14	2.600 >> 2.800	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
15	2.800 >> 3.000	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
16	3.000 >> 3.200	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
17	3.200 >> 3.400	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
18	3.400 >> 3.600	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
19	3.600 >> 3.800	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
20	3.800 >> 4.000	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
21	4.000 >> 4.200	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
22	4.200 >> 4.400	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
23	4.400 >> 4.600	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
24	4.600 >> 4.800	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00

25	4.800 >->	5.000	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
26	5.000 >->	5.200	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
27	5.200 >->	5.400	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
28	5.400 >->	5.600	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
29	5.600 >->	5.800	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
30	5.800 >->	6.000	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
31	6.000 >->	6.200	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
32	6.200 >->	6.400	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
33	6.400 >->	6.600	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
34	6.600 >->	6.800	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
35	6.800 >->	7.000	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
36	7.000 >->	7.200	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
37	7.200 >->	7.400	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
38	7.400 >->	7.600	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
39	7.600 >->	7.800	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
40	7.800 >->	8.000	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
41	8.000 >->	8.200	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
42	8.200 >->	8.400	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
43	8.400 >->	8.600	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
44	8.600 >->	8.800	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
45	8.800 >->	9.000	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
46	9.000 >->	9.200	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00

EXPOSURE RATE = 1.0144060E+02 (MICRO-R/HR)

TOTAL FLUX = 6.6269840E+01 (G/CM2/SEC)

AVERAGE ENERGY(FLUX) = 8.2990720E-01 (MEV)

AVERAGE ENERGY(ENERGY) = 9.9353300E-01 (MEV)

AVERAGE ENERGY(EXPOSURE) = 9.8391170E-01 (MEV)

DEPTH INDEX = 6.4821110E-01 (micro Sv/hour)

SHALLOW INDEX = 1.0411310E+00 (micro Sv/hour)

* NAGABAT OUTPUT DATA *

Tabel 2. Test NAGABAT mengambil data file dan mengolahnya:MMCBDEMO.CHN

NO.	ENERGY RANGE	P.H.D.	E.D.	EXPOSURE FLUX((CM2/MEV/SEC)		
1	.050 >->	.150	3.6071E+02	2.7156E+00	4.2141E-01	2.7156E+01
2	.150 >->	.250	3.8839E+02	3.8647E+00	1.3738E+00	3.8647E+01
3	.250 >->	.350	3.1233E+02	3.3984E+00	1.9472E+00	3.3984E+01
4	.350 >->	.450	2.5649E+02	2.7515E+00	2.1531E+00	2.7515E+01
5	.450 >->	.550	1.7354E+02	1.4163E+00	1.3948E+00	1.4163E+01
6	.550 >->	.650	1.8451E+02	3.4587E+00	4.0736E+00	3.4587E+01
7	.650 >->	.750	4.5840E+02	1.5471E+01	2.1043E+01	1.5471E+02
8	.750 >->	.850	1.1754E+02	1.4082E+00	2.1591E+00	1.4082E+01

9	.850 >->	.950	1.2686E+02	2.9281E+00	4.9809E+00	2.9281E+01
10	.950 >->	1.050	9.0352E+01	2.1078E+00	3.9140E+00	2.1078E+01
11	1.050 >->	1.150	1.9133E+02	9.8385E+00	1.9737E+01	9.8385E+01
12	1.150 >->	1.250	9.1061E+01	5.2838E+00	1.1395E+01	5.2838E+01
13	1.250 >->	1.390	1.6166E+02	1.0596E+01	2.4580E+01	7.5684E+01
14	1.390 >->	1.540	1.0917E+01	6.6599E-01	1.6694E+00	4.4399E+00
15	1.540 >->	1.690	3.5556E-02	6.7212E-29	1.8212E-28	4.4808E-28
16	1.690 >->	1.840	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
17	1.840 >->	2.100	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
18	2.100 >->	2.310	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
19	2.310 >->	2.510	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
20	2.510 >->	2.720	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
21	2.720 >->	3.000	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
22	3.000 >->	3.200	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00

CONCENTRATIONS :

K ** 1.9703790E+00 (0/0)

U ** 0.0000000E+00 (PPM)

TH ** 0.0000000E+00 (PPM)

EXPOSURE RATE = 1.0084250E+02 (MICRO-R/HR)

TOTAL FLUX = 6.5904170E+01 (G/CM2/SEC)

EXCAL = 2.9358640E+00 (MICRO-R/HR)

FLCAL = 3.0343830E+00 (G/CM2/SEC)

EOBS/ECAL = 3.4348490E+01

FOBS/FCAL = 2.1719130E+01

dari sudut pandang laju paparan total, efek dari penyimpangan pembacaan cacah sekecil itu bisa diabaikan; sebagai contoh menurut luaran GABATAN dan NAGABAT nilai laju paparannya

masing—masing adalah 101,44 dan 100,84 μ R/jam atau berbeda sekitar 0.6%. Adanya kesalahan kecil dari luaran program yang tidak bisa dihindari oleh prosedur

pengelompokan data cacah menurut energi di sini adalah disebabkan operasi aritmatika yang melibatkan bilangan ril dari variabel energi menuju bilangan integer untuk dinyatakan dalam variabel kanal.

Penjelasan detail mengenai besaran untuk luaran GABATAN disajikan pada pustaka (5), sedangkan untuk luaran NAGABAT disajikan pada pustaka (3). Diantara besaran penting untuk luaran GABATAN adalah *Depth Index* dan *Shallow Index*. Besaran ini masing-masing menyatakan laju dosis maksimum yang diterima bagian dalam tubuh dan bagian permukaan tubuh seperti didefinisikan pada pustaka (6). Mengenai luaran NAGABAT, seperti disajikan pada Tabel 2, di sini akan disampaikan penjelasan secara garis besar. Dari Tabel 2 dinyatakan bahwa konsentrasi potasium -K, uranium -U, dan torium -Th masing-masing adalah 1,97%, 0,0 ppm, dan 0,0 ppm. Data konsentrasi demikian bisa menjelaskan bahwa data distribusi tinggi pulsa adalah berasal dari suatu pengukuran di suatu lokasi dengan kondisi iradiasi bahwa sumbangan pulsa dari radiasi gama artifisial berenergi lebih kecil dari 1,69 MeV adalah sangat dominan; dalam hal ini sumbangan dari uranium yang diwakili oleh kelompok 1,69 - 1,84 MeV dan 2,1 - 2,31 MeV, dan dari torium yang diwakili oleh kelompok 2,51-2,72 MeV, tidak terdeteksi atau berada di luar kanal terakhir dari data file MMCBDEMO.CHN sehingga dinyatakan 0,0 ppm. Mengenai nilai konsentrasi potasium adalah 1,97%, nilai ini tidak bisa diterima karena kelompok energi yang mewakilinya yaitu 1,39-1,54 MeV sudah terganggu oleh sumbangan dari Co-60. Untuk dapat menganalisis sumbangan dari radiasi gama alam, NAGABAT menyaratkan bahwa sumbangan pulsa dari radiasi gama artifisial yang masuk ke kelompok energi lebih besar dari sekitar 1,39 MeV harus

relatif jauh lebih kecil atau diabaikan dibandingkan sumbangan yang berasal dari potasium, uranium, dan torium. Selanjutnya mengenai besaran laju paparan (*exposure rate*) dan fluks total. Dalam hal ini tidak dapat dibedakan apakah nilai besaran itu berasal dari radiasi gama alam atau gama artifisial, melainkan mencakup seluruh radiasi gama yang terdeteksi oleh sistem pengukuran. Besaran lainnya adalah EXCAL dan FLCAL yang masing-masing berarti laju paparan dan fluks yang berasal dari sumbangan radiasi gama alam; nilainya bisa diterima apabila tidak terdapat sumbangan pulsa (dapat diabaikan) dari radiasi gama artifisial terhadap kelompok energi yang lebih besar dari 1,39 MeV. Terakhir adalah mengenai luaran ratio EOBS/ECAL dan FOBS/FCAL yang masing-masing berarti ratio antara laju paparan total terhadap laju paparan gama alam dan ratio antara fluks gama total terhadap fluks gama alam. Untuk kondisi iradiasi di mana sumbangan pulsa dari radiasi gama artifisial dapat diabaikan, maka nilai ratio ini berdasarkan pengalaman biasanya tidak menyimpang jauh dari angka 1.

Hasil uji banding antara luaran paket program dan berbagai survey meter disajikan pada Tabel 3 dan Tabel 4. Untuk pengukuran di Balai Operasi perbedaan satu sama lain tidak lebih dari 13% apabila yang digunakan sebagai acuan adalah nilai tengah dari respon survey meter pembandingan. Sedangkan untuk pengukuran di Balai Percobaan perbedaan satu sama lain adalah mencapai sekitar 22%, di mana perbedaan antara luaran GABATAN dengan alat survey milik PSPKR adalah sekitar 8%. Penjelasan mengenai perbedaan atau kesalahan sistematik dari hasil uji banding tersebut adalah sangat rumit karena menyangkut keterbatasan dari masing-masing alat dan karakteristik medan radiasi khususnya

energi foton dan ketakseregaman fluks gama di setiap titik pengukuran. Masalah ini mungkin relevan untuk menjelaskan hasil uji banding di Balai Percobaan. Pada umumnya alat survey dikalibrasi menggunakan medan radiasi gama berenergi sedang sekitar 0,67~ 1,3 MeV yaitu menggunakan Cs-137 atau Co-60. Pada kenyataannya energi foton rerata di Balai Percobaan adalah sekitar 3 MeV yang berasal dari radiasi hamburan N-16 dengan bahan media di sekitarnya. Dengan demikian penjelasannya harus mencakup kombinasi antara sifat kebergantungan respon alat terhadap energi foton dan ketakseregaman fluks gama di setiap titik pengukuran. Sedangkan untuk menjelaskan hasil uji banding di Balai Operasi, karena energi rerata medan radiasinya termasuk dalam rentang energi yang umum untuk

kalibrasi survey meter, maka permasalahannya terutama terletak pada ketakseregaman medan radiasi. Kondisi seperti ini telah disadari ketika uji banding dilaksanakan di mana variasi laju dosis terhadap posisi cukup berarti. Oleh karena itu telah diusahakan bahwa setiap alat satu sama lain posisinya di atur sedekat mungkin. Dari kenyataan ini, penulis memandang bahwa studi uji banding lanjutan perlu dilakukan khususnya untuk medan radiasi gama berenergi tinggi. Pada tahap awal ini disimpulkan bahwa luaran paket program GABATAN cukup memadai. Sebagai catatan, menurut pustaka (3), bahwa teknik respon matrik untuk *unfolding* distribusi tinggi pulsa yang diadopsi program mempunyai nilai kesalahan dalam hal laju pemaparan gama adalah sekitar 8%.

Tabel 3. Hasil uji banding untuk besaran laju dosis serap di dalam gedung RSG; operasi 20 MW.

Alat/Metoda	Respon Alat, laju dosis serap gama (10^{-6} rad/jam)	
	Balai Percobaan	Balai Operasi
GABATAN- NaI(Tl) Spect., PRSG	92,4	165,4
NRC model IP100 (Ion Chamber), PRSG	62~88	167~194
Environmental meter type 6-80 (GM Counter), PSPKR	80~90	180~200

Tabel 4. Hasil uji banding untuk besaran laju dosis serap dan konsentrasi radioaktivitas di luar gedung RSG; operasi 20 MW.

Alat/Metoda	Respon Alat			
	Laju dosis serap gama, 10^{-6} rad/jam	K(%)	U(ppm)	Th(ppm)
NAGABAT-NaI(Tl) Spect., PRSG	EXRATE: 3,3	0,54	1,08	3,09
	EXCAL: 2,1			
HPGe Spectrometer- HASL methode, PSPKR	2,1	0,53*	1,02*	3,09*

Environmental meter type 6-80 (GM Counter), PSPKR	2,8~3,8	-	-	-
---	---------	---	---	---

*) Berdasarkan faktor konversi dari Beck dkk³⁾

Pada Tabel 4 disajikan hasil uji banding pengukuran yang dilakukan di luar gedung reaktor. Data yang dibandingkan adalah laju dosis serap gama total (EXRATE), laju dosis serap gama alam (EXCAL), dan konsentrasi radioaktivitas alam. Dalam hal laju dosis serap gama total, luaran NAGABAT dibandingkan dengan GM Counter- Environmental Meter type 6-80. Untuk maksud ini sumbangan dari sinar kosmik pada respon GM Counter terlebih dahulu dieliminasi dengan mengacu bahwa sumbangannya sekitar $3,2 \times 10^{-6}$ rad/jam. Dengan cara ini diperoleh bahwa laju dosis serap gama total adalah $2,8 \sim 3,8 \times 10^{-6}$ rad/jam; di mana respon alat sebelum dikoreksi adalah $6 \sim 7 \times 10^{-6}$ rad/jam. Apabila nilai tengah dari respon GM counter ini di bandingkan dengan EXRATE dari luaran NAGABAT, maka diperoleh hasil yang sangat bersesuaian. Kemudian, untuk besaran laju dosis serap gama alam (EXCAL) dan konsentrasi radioaktivitas alam, luaran dari NAGABAT di bandingkan dengan luaran dari HASL-methode yang mengandalkan pada alat spektrometer gama HPGe. Seperti ditunjukkan pada Tabel 4, data uji banding memberikan hasil yang sesuai dengan penyimpangan terbesar hanya sekitar 6% yaitu untuk data konsentrasi uranium. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa

luaran dari NAGABAT bersesuaian dengan luaran metoda/alat survey standard milik PSPKR, khususnya pada kondisi iradiasi di mana sumbangan radiasi gama alam adalah bermakna.

KESIMPULAN

Pengembangan program komputer untuk pemantauan radiasi gama di sekitar fasilitas nuklir telah dilaksanakan sehingga dapat dicangkokkan pada *portable gamma analyzer* yang tersedia secara komersial. Paket program telah dicoba dan berhasil mentransfer *file* data (distribusi tinggi pulsa) dari luaran spektrometer MicroNOMAD (produk ORTEC) kemudian mengolahnya menjadi data besaran dosimetri dan fisika. Penyimpangan pembacaan jumlah cacah untuk file demo dari pemasok yang memuat data distribusi tinggi pulsa Cs-137 dan Co-60 dengan program GABATAN dan NAGABAT adalah relatif kecil yaitu masing-masing hanya 0.1% dan 1.4%. Selain itu, dari hasil uji banding dengan peralatan survey standard milik PSPKR disimpulkan bahwa luaran paket program cukup bersesuaian; bahkan untuk kondisi medan radiasi alam luarannya sangat bersesuaian.

PUSTAKA

1. MINATO, S. and KAWANO, M., "On the Constitution of Terrestrial Gama Radiation", *Journal of Geophysical Research*, 75(29), (1970).
2. MINATO, S. and KAWANO, M., "Evaluation of Exposure due to Terrestrial Gama-Radiation by Response Matrix Method", *Journal of Nuclear Science and Technology*, 7(8), p. 401-406 (1970).

3. MINATO, S. "A Response Matrix of a $3''\varnothing \times 3''$ NaI(Tl) Scintillation for Environmental Gama Radiation Analysis", Report of the Government Industrial Research Institute, Nagoya, 27(12) (1978), dalam bahasa Jepang.
4. BARAN, J. A., REYNOLDS, R. S., FAW, R. E., and KIMEL, W. R., "Analysis of Gama-Ray Spectroscopy Data", Nuclear Applications and Technology, vol. 9, (1970).
5. AKHMAD, Y.R. dan PUDJIJANTO, M.S., "SONGMD1: Program Pengolah Luaran Spektrometer Gama NaI(Tl) dan Penentuan 'Indeks Taradosis-dalam dan Taradosis-Permukaan', Lokakarya Komputasi dalam Sains dan Teknologi Nuklir VII-PPI Batan, Jakarta (1997).
6. DIMBYLOW, P.J. and FRANCIS, T.M. "A Calculation of the Photon Depth-dose Distributions in the ICRU Sphere for a Broad Parallel Beam, a Point Source and an Isotropic Field", NRPB-R92, National Radiological Protection Board (1979).
7. MATSUDA, H., FURUKAWA, S., KAMINISHI, T., and MINATO, S. "A New Method for Evaluating Weak Leakage Gama-Ray Dose Using a $3''\varnothing \times 3''$ NaI(Tl) Scintillation Spectrometer (I)", Report of the Government Industrial Research Institute, Nagoya, 31(5)(1983), dalam bahasa Jepang.

DISKUSI

Pertanyaan (Setiyanto)

Bagaimana aplikasi/penggunaan program tersebut di lapangan ? apakah untuk pengamatan paparan radiasi secara on-line ?

Jawaban (Yus R)

Portable analiser umumnya dapat menyimpan data secara on-line kemudian data tersebut dapat diolah oleh Nagabat/Gabatan.

Pertanyaan (Usman Sudjadi)

Mohon dijelaskan mengapa GABATAN hasilnya lebih tinggi dari yang lain 92,4, (62~88), (80~90)

Jawaban (Yus R)

Untuk menjelaskan perbedaan hasil uji banding di balai percobaan, dapat ditelusuri dari sifat kebergantungan respon alat terhadap energi photon dan ketidak seragaman medan radiasi. Surveymeter pembanding dikalibrasi umumnya dengan Co atau Cs-131 sedangkan kenyataan lapangan berenergi tinggi oleh karena itu alat mana yang paling mendekati kebenaran tidak dapat dikatakan melainkan disampaikan perbedaan terhadap satu sama lain.