

APLIKASI PERUNUT ISOTOP DALAM BIDANG BIOMEDIKA

Darlina

Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi – BATAN

- Jalan Cinere Pasar Jumat, Jakarta – 12440
- PO Box 7043 JKSKL, Jakarta – 12070

LATAR BELAKANG

Mahluk hidup dan segala sesuatu yang ada di alam terdiri dari berbagai macam sel, dan jaringan yang tersusun oleh atom atom yang berbeda. Setiap atom terdiri dari sebuah inti yang mengandung proton dan neutron serta lapisan luar yang terdiri dari elektron yang bergerak mengelilingi inti. Jika jumlah proton sama dengan jumlah elektron maka muatan listrik atom dikatakan neutral. Jumlah proton atau elektron membedakan suatu unsur kimia yang satu dengan yang lainnya. Sebuah unsur yang identik dari sifat materi kimia dapat sedikit berbeda dalam beratnya. Karakteristik ini dapat diterangkan bahwa atom pada unsur yang sama dapat mempunyai jumlah neutron yang berbeda dalam intinya. Perbedaan bentuk ini dikenal dengan nama isotop. Contoh unsur karbon yang mempunyai 3 isotop alamiah yaitu C^{-12} , C^{-13} , C^{-14} . Ketiga isotop ini mempunyai sifat kimia yang sama karena jumlah protonnya sama tetapi jumlah neutronnya berbeda, hal ini mempengaruhi sifat fisik pada tiap atom. Jika jumlah neutron sama atau lebih dari jumlah proton maka inti jadi stabil dan disebut isotop stabil. Bila jumlah neutron lebih sedikit dari jumlah proton inti tidak stabil maka inti akan melepaskan energinya berupa radiasi. Isotop dengan inti tidak stabil ini dikenal dengan nama radioisotop [1].

Awal mula isotop digunakan sebagai perunut dalam bidang biologi adalah George Hevesy's bekerja sama dengan Hans Geiger dan Ernst Rutherford bereksperimen menggunakan

Thorium-B untuk mempelajari absorpsi dan lokalisasi unsur Pb di tanaman pada tahun 1923. Untuk mempelajari fisiologi mahluk hidup diperlukan unsur isotop yang aktif secara biologi dan mempunyai berat molekul yang ringan. Setelah ditemukannya deuterium oleh H.C. Urey pada tahun 1932 kemudian diikuti oleh sejumlah penemuan isotop-isotop radioaktif. Pemakaian perunut radioisotop mulai dikembangkan setelah Ernest O. Lawrence pada tahun 1932 berhasil membuat siklotron yang dapat menghasilkan radioisotop "artifisial" (buatan), kemudian diikuti oleh produksi radiosodium yang diperoleh dengan menembak sodium dengan deuteron pada tahun 1934, sehingga membuka jalan untuk membuat perunut bernilai secara fisiologi. Pemakaian radioisotop mulai digunakan dalam bidang Biomedika setelah George Hevesy's, Otto Chiewitz, Hardin Jones, Waldo Cohn dan John Lawrence dengan sukses dalam menggunakan P^{-32} untuk berbagai penelitian mengenai metabolisme pada tahun 1936 [2]. Kemudian John Lawrence menggunakan P^{-32} untuk penelitian pada penyakit Leukimia.

Dengan ditemukannya sebagai sumber untuk produksi radioisotop "artifisial" maka pemakaian isotop dalam bidang biomedika terutama untuk bidang kedokteran, perunut isotop umumnya digunakan untuk tujuan diagnosis. Pemanfaatan sifat dari unsur isotop untuk mengevaluasi kondisi fisiologi tubuh, seperti perubahan histopatologi dalam menyusun berbagai jaringan tubuh, perubahan fisiologi yang disebabkan oleh perubahan fungsi jaringan normal. Agar dapat masuk ke dalam tubuh dan

sampai ke organ sasaran maka isotop harus digabung dengan senyawa tertentu, dikenal sebagai senyawa bertanda-isotop. Dengan demikian teknik sintesis senyawa bertanda-isotop dan distribusinya dibutuhkan dalam aplikasi perunut isotop. Setelah ditemukan manfaat isotop dalam bidang kedokteran selanjutnya diikuti dengan pengembangan instrumen pendukungnya. Instrumentasi untuk mengukur radiasi yaitu pencacah skintilasi yang ditemukan oleh Ben Casen dan Fred Bryan pada tahun 1948. Detektor, skaner atau pencitraan distribusi isotop dalam tubuh dikembangkan di *the wadsworth VA hospital USA* pada akhir tahun 1940-an [2]. Skaner terutama digunakan dalam kedokteran nuklir, karena senyawa radioaktif yang masuk dalam tubuh, data yang diperoleh dapat segera diolah menjadi citra organ-organ yang akan dievaluasi. Pencitraan akan memberikan informasi diagnostik untuk organ atau sistem tubuh berdasarkan pola distribusi isotop dalam tubuh. Pada tahun 1960 *The anger scintillation camera* ditemukan, kamera skintilasi ini dapat memberikan pencitraan secara simultan. Metoda *tomographic* merupakan metoda baru yang menggunakan prinsip penyatuan kamera dan skaner. *Positron emission tomographic* (PET) merupakan metoda tomografi yang dapat memberikan citra 3 dimensi.

PRINSIP PEMAKAIAN PERUNUT

Metoda perunut (*tracer*) telah digunakan dalam hampir setiap bidang ilmu pengetahuan dan teknologi seperti kedokteran, biologi, kimia, pertanian, fisiologi, nutrisi, fisika, instrumentasi, farmasi, toksikologi, bioteknologi dan sebagainya. Aplikasi dalam metoda ini adalah melakukan perunutan terhadap objek yang diteliti atau disebut *tracee*. *Tracee* bisa berupa sebuah substansi atau komponen dari substansi seperti radikal, molekul, atau atom. Perunut yang ideal harus mempunyai sifat fisika, kimia, atau biologi sama dengan *tracee* yang diteliti. Adanya sifat karakteristik tersebut memungkinkan untuk

mendeteksi dalam sistem dimana *tracee* berada [3].

Prinsip produksi perunut melibatkan suatu penggantian (substitusi) satu atau lebih atom-atom dari posisi spesifik dalam molekul *tracee* dengan sebuah isotop pada atom tersebut. Isotop stabil maupun isotop radioaktif dapat digunakan sebagai perunut. Perbedaan massa dari isotop terletak pada perbedaan jumlah neutron, dengan demikian sifat kimianya tidak berpengaruh. Alam tidak dapat membedakan antara isotop stabil dan isotop radioaktif pada materi yang sama, keduanya dapat ambil bagian dalam reaksi kimia pada materi atau unsur yang sama [1].

Penggunaan pelabelan perunut membutuhkan sebuah asumsi bahwa tidak akan terjadi perbedaan antara molekul atau atom yang dilabel dengan molekul yang tidak dilabel dan akan merunut posisi atau gerakan pada molekul yang tidak dilabel. Seperti yang telah diterangkan bahwa berbagai isotop pada sebuah unsur mempunyai sifat fisik dan kimia yang hampir identik, hanya mempunyai perbedaan massa. Perbedaan ini yang membuat sebuah isotop dapat dibedakan antara isotop satu dengan yang lainnya. Pemakaian beberapa isotop untuk mengamati suatu proses *evaporasi* atau *root-uptake* pada tumbuhan, bisa diamati menggunakan unsur-unsur dengan berat molekul rendah. Radiasi yang dipancarkan oleh radioisotop selama peluruhan dapat mengionisasi atom-atom disekelilingnya. Sejumlah senyawa akan memancarkan sinar bila terkena radiasi, intensitas cahaya yang dipancarkan bergantung pada paparan radiasi. Intensitas cahaya diukur dengan pencacah skintilasi dan pencacah Geiger atau kamar ionisasi [4].

ASPEK UNTUK MENENTUKAN PERUNUT ISOTOP STABIL ATAU RADIOAKTIF

Prinsip pemakaian isotop stabil dan radioaktif dalam merunut suatu substansi adalah sama, hanya perbedaan mendasar terletak pada tujuan penelitian dan dalam pemilihan untuk

aplikasi perunut. Proses optimasi sebaiknya mempertimbangkan segi keselamatan, kondisi pengukuran, persyaratan peralatan serta sensitivitas yang dibutuhkan.

Isotop stabil bersifat nonradioaktif, berarti dalam pemakaian secara in-vivo tidak ada bahaya radiasi terhadap pasien sehingga bermanfaat bagi pemakaian untuk pasien hamil atau bayi. Tetapi isotop stabil memerlukan teknik pengukuran yang lebih rumit dibandingkan dengan isotop radioaktif. Aspek untuk pemilihan perunut bergantung pada tersedianya isotop. Unsur monoisotop, seperti Be, F, Na, Al, P, Mn, Sc, Co tidak dapat digunakan karena mereka tidak dapat dibedakan dari kandungan atau kadar yang sebenarnya. Isotop stabil, cukup mahal, dan sensitivitasnya lebih rendah, serta membutuhkan pelaksanaan yang cukup banyak sehingga tidak memenuhi asumsi perunut yang sempurna [4].

Isotop radioaktif dapat digunakan sebagai perunut dalam penelitian secara in-vitro maupun in-vivo. Banyak unsur-unsur kimia terdiri dari satu atau lebih radioisotop, baik yang terjadi secara alamiah maupun yang dihasilkan secara buatan (artifisial). Perunut radioisotop buatan dapat dianggap bebas dari gangguan kandungan yang sebenarnya dari unsur dalam sampel, dalam pemakaian isotop yang alamiah akan ada gangguan kandungan yang sebenarnya dari unsur sehingga tidak ada sebuah nilai nol pada *blanko*. Jika kontribusi ini bisa mempengaruhi hasil, maka harus dievaluasi berdasarkan pengukuran rasio isotop, sehingga membutuhkan teknik yang akurat. Setiap radioisotop dikarakterkan selain oleh tipe peluruhannya juga oleh waktu paronya. sehingga mempengaruhi pemilihan perunut radioisotop pemilihan waktu paro yang pendek (^{28}Mg , ^{64}Cu) atau panjang (^{65}Zn , ^{45}Ca , ^{55}Fe , ^{63}Ni), bergantung pada penelitian yang direncanakan, atau biaya dan izin (lisensi) dalam peraturan yang berlaku. Radiasi yang dipancarkan dalam peluruhan dapat mengionisasi atom-atom disekelilingnya, tetapi jarang berpengaruh pada intinya. Ionisasi ini akan mempengaruhi sifat kimia. Dengan mengukur radiasi yang dipancarkan maka senyawa yang dilabel dapat

dirunut. Dengan teknik perunut, pembentukan dan pemutusan biomolekul serta mekanisme yang mendasari proses tersebut dapat dipelajari [4].

Pemanfaatan perunut sebaiknya mempertimbangkan risiko yang diterima oleh personal. Dalam hal ini isotop stabil lebih disukai bila;

- informasi yang diperoleh dikombinasikan dengan analisis data yang baik yang sesuai dengan tujuan penelitian.
- dalam penelitian in-vivo, (sebagai contoh penelitian kinetika perunut dan metabolisme dalam fisiologi, nutrisi dan lain sebagainya).
- tidak tersedia perunut radioisotop yang tepat [5].

PENGUKURAN PERUNUT

Perunut radioisotop dapat dideteksi berdasarkan pada sifat peluruhannya, yaitu jenis radiasi dan energi yang dipancarkan serta waktu paronya. Bila radioisotop yang digunakan jumlahnya kecil dan waktu paro panjang maka dibutuhkan sebuah pengukuran yang signifikan secara statistik seperti teknik yang dibutuhkan untuk isotop stabil. Pada pemakaian radioisotop tersebut maka perlu diperhatikan hal-hal tersebut:

1. Sifat radioaktif

Perunut radioisotop merupakan sumber radioaktif yang berada dalam sampel. Dengan demikian pencacahan akhir harus dikoreksi terhadap peluruhan latar (*Background*) agar mendapatkan nilai yang lebih absolut. Radiasi yang dipancarkan dalam peluruhan pada sebuah inti tunggal dapat mengionisasi atom-atom disekelilingnya tetapi jarang yang mempunyai pengaruh pada intinya [4]. Jumlah ion yang terbentuk dapat dideteksi dengan respon elektrik yang dihasilkan, seperti pada pencacah kamar ionisasi dan Geiger Mueller. Pada alat ukur pencacah skintilasi, kristal NaI akan memancarkan sinar bila terkena radiasi [6].

Pada umumnya pemilihan metode pengukuran radioisotop berdasarkan dari energi

yang dipancarkan, jenis radiasi yang dipancarkan, waktu paro, maksud dan tujuan pengukuran, tingkat sensitifitas dan presisi yang dibutuhkan. Untuk mengamati radiasi yang mengenai zat dengan volume kecil maka hanya dibutuhkan metoda pengukuran sederhana atau dengan detektor pencacah. Jika dibutuhkan informasi yang akurat seperti distribusi aktivitas dalam sebuah sampel yang tidak homogen atau dalam tubuh mahluk hidup maka dapat digunakan *autoradiografi* atau *eksternal imaging*.

Energi radiasi bisa digunakan untuk membedakan sebuah isotop tertentu yang tercampur dengan beberapa isotop lain dalam satu sampel. Dengan alat penentu energi partikel yang akurat memungkinkan mengenal isotop secara terpisah. Perbedaan kontribusi isotop terhadap sampel dapat ditentukan dengan mengulang pengukuran cacahan berdasarkan waktu paronya atau menggunakan spektrometri berdasarkan pada sifat pancarannya. Untuk tujuan ini dibutuhkan alat yang mempunyai resolusi tinggi seperti spektrometri gamma [5].

2. Pengukuran berdasarkan stimulasi terhadap rangsangan respon

Untuk mendeteksi sebuah isotop stabil atau radioisotop dengan aktivitas rendah, maka dibutuhkan pengukuran berdasarkan stimulasi terhadap sebuah respon yang khas (isotopik), dapat melalui;

- Aplikasi satu rangkaian listrik untuk mengionisasi sampel, dengan demikian atom-atom dan molekul-molekul dapat dibedakan melalui perbedaan massa terhadap rasio muatan (nilai m/z), sehingga perunut dapat ditentukan berdasarkan pada massa intinya. Sebagai contoh; perunut yang terkandung dalam sampel dapat ditentukan oleh pengukuran intensitas arus yang sesuai dengan perunut ion menggunakan detektor seperti *faraday cups*, *secondary electron multipliers* dan sebagainya.
- Induksi reaksi nuklir dengan penembakan sampel menggunakan peluru dengan jenis dan

energi tertentu. Dengan demikian perunut dibedakan berdasarkan pada pancaran dari produk reaksi radioaktif

Dalam induksi reaksi nuklir, semua unsur dalam sampel dapat diaktifkan, oleh karena itu produk dari reaksi yang dituju bisa disertai sebuah radioisotop lain yang dapat mengganggu, sehingga dibutuhkan spektrometer. Dengan demikian untuk keberhasilan aplikasi metodologi perunut dibutuhkan teknik nuklir standar. Bila akselerator dan teknik deteksi yang membutuhkan waktu cepat dikembangkan untuk penelitian maka spektrometer masa sangat cocok digunakan. Kesulitan pada pemakaian mesin itu berada pada energi tinggi yang dicapai oleh ion terakselerasi (dalam orde MeV) [6]. AMS (*Accelerator Mass Spectrometer*) adalah alat yang dikembangkan terutama untuk kalender radiokarbon dalam mempelajari *geochronology* dengan sensitivitas beberapa orde skala lebih luas dibandingkan dengan teknik pencacahan yang umum, dan aplikasi terbaru adalah untuk mendeteksi isotop stabil atau radioaktif pada elemen-elemen seperti H, Be, C, Al, Cl, Ca, Ni, I, U dalam analisis biologi pada ilmu hayat (*life-sciences*). Akselerator digunakan untuk AMS, dari kisaran yang sederhana Van de Graff atau mesin tandem dengan tegangan terminal pada beberapa MV hingga yang lebih energik, siklotron atau linear akselerator [7].

Teknik nuklir lain baru-baru ini telah digunakan untuk mempelajari analisis penyebaran neutron untuk menentukan bentuk dan penempatannya pada molekul kompleks yang dilabel dengan deuterium. Teknik penyebaran neutron dalam bioteknologi makin maju baik sumber isotop dan Instrumentasi, dimana preparasi sampel dan pelabelan deuterium dibuat lebih mudah dan murah. Juga pada teknik *scattering* pemahaman fungsi yang selaras pada interaksi biomolekul dapat dimanfaatkan pada aplikasi yang lebih luas. Penerapan teknik-teknik ini menggunakan isotop stabil berpotensi besar, tetapi belum secara penuh dieksploitasi, terutama karena kerumitan dan harga yang cukup besar

untuk pemakaian dan pemeliharaan fasilitas yang dibutuhkan. Dengan demikian lebih disukai teknik perunut radioaktif karena lebih mudah, walaupun memaparkan radiasi pengion.

APLIKASI PERUNUT DALAM BIOMEDIKA

Teknik perunut isotop telah digunakan di bidang biomedika secara ekstensif (luas). Teknik perunut memberikan kesempatan peneliti untuk mempelajari pembentukan dan pemutusan biomolekul penting serta dapat mempelajari mekanisme dasar dari proses ini serta kinetika unsur-unsur dalam tubuh. Kedua aplikasi tersebut memberikan perbedaan dasar yang dapat diselidiki menggunakan teknik perunut.

1. Biologi sel dan molekul

Isotop radioaktif seperti ^3H , ^{14}C , ^{32}P , ^{35}S , ^{86}Rb , ^{125}I dapat digunakan untuk mengetahui aspek metabolik dalam sel, bakteri, *yeast*, tanaman, binatang, dan manusia dalam mengurai sifat dasar pada materi genetik. Metabolit yang dilabel dengan radioisotop merunut molekul stabil yang sesuai. Teknik deteksi seperti pengukuran cacahan, spektrometer massa, autoradiografi dan teknik pencitraan seperti kamera gamma, PET akan menyediakan informasi diagnosis berdasarkan pola distribusi akumulasi isotop dalam sel, jaringan, dan organ. Pola distribusi dan akumulasi isotop akan bervariasi bergantung pada sel, jaringan, dan organ yang dipelajari serta ada atau tidaknya penyakit dalam jaringan atau organ. Sebagai contoh; ^{32}P -dATP yang digunakan dalam posporilasi suatu protein dalam rangka mengevaluasi aktivitas kinasenya. Sama seperti ^{35}S atau ^{125}I untuk mengevaluasi beberapa ekspresi spesifik ^{35}S -, ^{32}P - atau ^{33}P -dideoksinukleotida yang digunakan untuk sintesis kelompok molekul DNA berlabel (template DNA) untuk analisis urutan DNA, dan probe untuk deteksi gen spesifik [8] (Gambar 1).

Saat ini isotop stabil dikombinasi dengan teknik spektrometer massa telah digunakan untuk

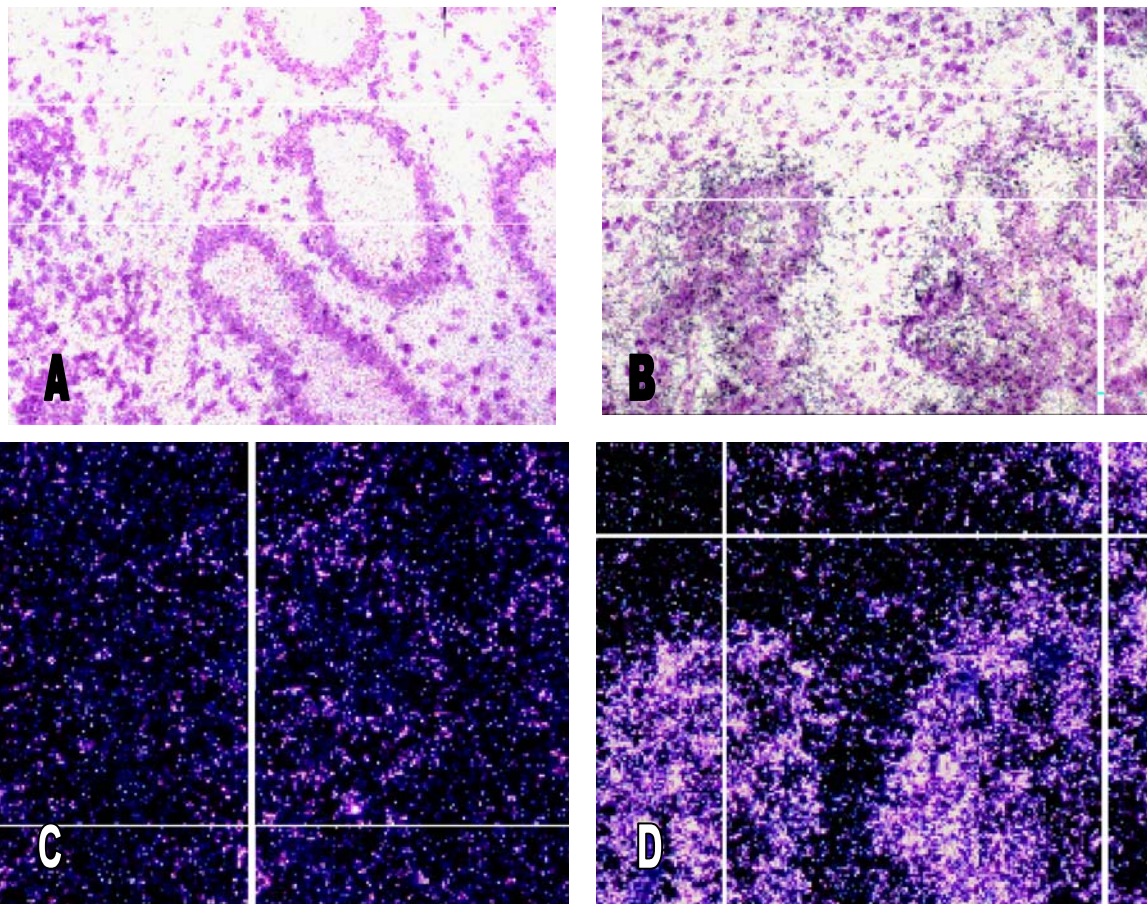
melabel, khususnya bila molekul diinjeksikan ke tubuh pasien untuk studi in-vivo. Penggabungan ^{36}Rb ke dalam sel neuron dan glial untuk merunut potassium masuk ke sel melalui pompa Na/K dengan demikian untuk memonitor aktivitas Na⁺/K⁺ ATPase dalam sel-sel neuron dan glial yang merupakan sebuah informasi penting dalam penyelidikan penyakit neurodegeneratif. Nilai pemakaian perunut dalam genetik masih terus diperbaiki, terutama berkenaan dengan terapi gen yang sekarang mulai banyak diaplikasikan dalam klinik biasa [8].

2. Kinetika Unsur

Biokinetika unsur pokok, *trace elements*, mikronutrien atau unsur lain dalam nutrisi, fisiologi, toksikologi dapat dipelajari dengan metode perunut. Dalam penggunaan perunut untuk mengetahui kinetika serta kadar unsur dapat dilakukan secara in vivo dan in vitro.

a. Penggunaan secara In-Vivo

Dalam pemakaian secara in-vivo dilakukan untuk mengetahui kinetika unsur di dalam tubuh sehingga dapat diketahui fungsi organ atau sistem tubuh, berdasarkan absorpsi, dilusi, konsentrasi atau ekresi perunut setelah pemberian secara oral atau intravena. Dalam pemakaian secara in-vivo, isotop harus merupakan sebuah perunut fisiologis dimana perunut harus berfungsi dalam sistem yang akan dipelajari contoh; uji *schilling* untuk mempelajari absorpsi vitamin B-12 dalam tubuh, maka vitamin B-12 yang dilabel dengan isotop radioaktif Co-52 yang diberikan secara oral harus dapat diserap dan diekskresikan harus sama atau identik dengan vitamin B-12 alamiah [9]. Analisis dan interpretasi data berdasarkan pada cacahan radioaktivitas untuk perunut radioaktif, pemakaian metoda analisis aktivasi partikel bermuatan dan spektrometer massa untuk perunut isotop stabil. Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, pemakaian perunut stabil adalah pilihan yang tepat bila dihubungkan dengan kesehatan sukarelawan atau pasien walaupun hal ini berarti pengukuran tidak praktis, dan informasinya berkurang bila dibandingkan dengan perunut radioaktif. Dengan demikian



Gambar 1. Hibridisasi insitu radioaktif pada irisan jaringan normal dan kanker, probe RNA mengandung ^{35}S -UTP yang digunakan untuk mendeteksi adanya transkripsi pada gen spesifik dalam kedua sampel. Alat yang digunakan autoradiografi. Gambar A menunjukkan jaringan normal dan gambar B menunjukkan jaringan kanker dibawah didaerah terang pada mikroskop. Dibagian gelap (Gambar C dan D) terlihat bintik-bintik luminescen yang berasal dari isotop.

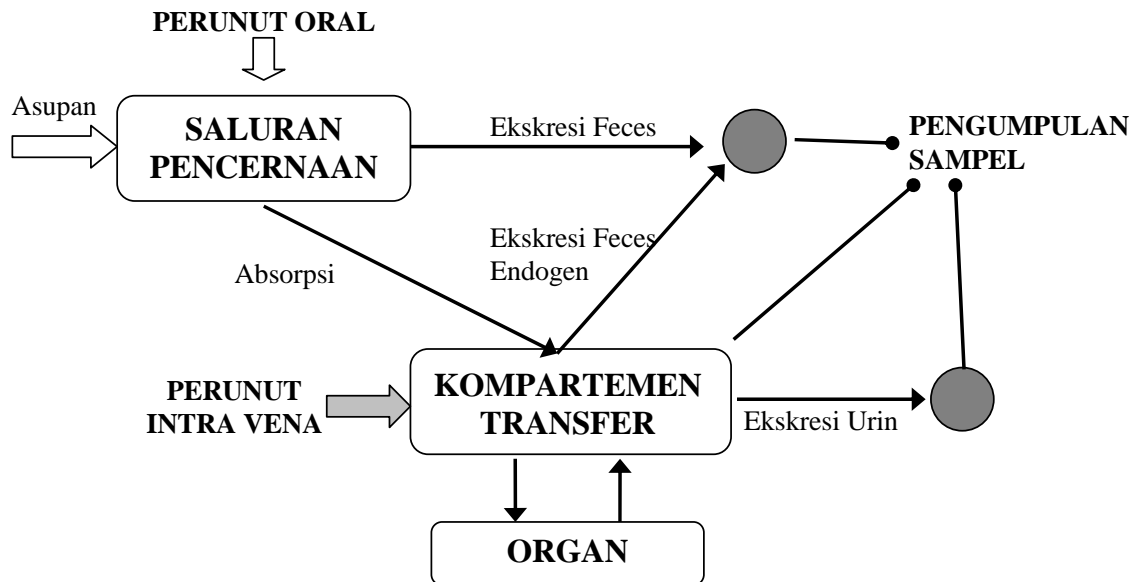
dibutuhkan sebuah disain eksperimen yang bisa dipercaya (logis). Teknik perunut ganda (multipel), seperti pemberian secara simultan yang terdiri dari dua (atau lebih) perunut melalui jalan yang berlainan (satu perunut diberikan melalui oral dan perunut lain secara intravena atau inhalasi), sehingga diperoleh gambaran dinamik suatu proses biokinetika yang relevan seperti absorpsi intestinal atau jalan ekskresi utama (Gambar 2) [10].

Beberapa pendekatan analitik digunakan untuk perunut stabil dalam sampel biologi, dan beberapa diantaranya telah digunakan seperti yang dilaporkan dalam literatur tentang penelitian biokinetika unsur nutrien atau non nutrien. Pada

beberapa unsur seperti besi, molibdenum, ruthenium, zirconium, dengan kombinasi isotop stabil dan pendekatan analisis aktivasi partikel bermuatan dan spektrometer masa ion thermal, memungkinkan untuk mendapatkan sebuah gambar terperinci pada kinetika plasma darah dan proses pembersihan pada ginjal. Dengan demikian akan memperbaiki model-model yang sudah ada dalam menyediakan sebuah gambaran biokinetika pada material yang ditelan.

b. Pemakaian In-vitro

Pemakaian perunut secara in-vitro dilakukan untuk mengukur kadar unsur dalam darah atau urin seperti hormon, obat-obatan,



Gambar 2. Skema distribusi unsur isotop dalam tubuh, yang dapat dipelajari menggunakan teknik perunut isotop ganda. Perunut pertama dimasukkan lewat oral, perunut yang lain diinjeksikan secara intravena. Darah, urin, dan feces dikumpulkan kemudian dianalisis untuk mengetahui kinetika proses yang diteliti [10]

biokimia dalam konsentrasi rendah. Uji in-vitro membutuhkan sampel darah atau urin pasien yang mengandung unsur yang akan dianalisis, tidak ada material radioaktif yang dimasukan dalam tubuh pasien. Sampel kemudian diuji menggunakan reagen radioaktif dan diukur kadar unsur yang ada. Umumnya uji in vitro berdasarkan prinsip immunoassay. Reaksi imun Ab-Ag membuat uji ini spesifik, perunut isotop radioaktif membuat uji ini mempunyai sensitifitas yang tinggi [9].

PENUTUP

Metoda perunut sudah diaplikasikan dalam setiap bidang ilmu pengetahuan dan teknologi. Pemakaian perunut didasarkan pada sebuah asumsi bahwa tidak akan terjadi perbedaan antara molekul atau atom yang dilabel dengan yang tidak dilabel dan akan merunut posisi atau gerakan pada molekul yang tidak dilabel. Perunut yang ideal mempunyai sifat fisika, kimia, atau biologi yang diteliti sama dengan molekul yang akan dirunut.

Isotop dapat digunakan sebagai perunut karena mempunyai sifat materi yang sama dengan yang dirunut. Prinsip pemakaian isotop stabil dan isotop radioaktif sebagai perunut adalah sama, keduanya dapat ambil bagian dalam reaksi kimia pada unsur yang sama. Pemilihan perunut tergantung pada tujuan penelitian dan aplikasinya. Hal lain yang perlu dipertimbangkan dalam pemilihan perunut adalah segi keselamatan, kondisi pengukuran, persyaratan peralatan yang digunakan serta sensitivitas yang dibutuhkan. Kedua isotop mempunyai kelebihan dan kekurangan sebagai perunut. Perunut isotop radioaktif mempunyai keunggulan dibandingkan isotop stabil antara lain; tehnik dan penatalaksanaan pengukuran lebih sederhana, sensitifitas analitik lebih tinggi, dan biaya yang dibutuhkan lebih murah. Dilain pihak isotop stabil mempunyai kelebihan dalam segi keselamatan bagi pasien karena isotop stabil tidak memancarkan radiasi sehingga lebih disukai dalam pemakaian secara in-vivo. Tetapi dengan adanya ilmu proteksi radiasi maka tindakan

protektif yang efektif untuk keselamatan dapat ditingkatkan.

DAFTAR PUSTAKA

1. IRMELI S., Radiasi Dalam Bahasa Sehari-hari, Badan Tenaga Atom Nasional, Jakarta (1996).
2. PHILIP S.R., Controlling Our Destinies: Historical, philosophical, Ethical and Theological Perspectives on The human Genome Project, University of Notre Dame Press, 19-46, 2000
3. WOLFE, Radioactive and Stable Isotopes Tracers in Biomedicine, Wiley-Liss Publishing, New York, 1992.
4. HENRIKSEN T and MAILLIE H.D., Radiation and Health, Taylor and Francis Inc., London, 2003.
5. ALFASSI Z.B. and PEISACH M. Elemental Analysis by Particle Accelerators, CRC Press, Ann Arbor, 1991
6. BOWRING C.S., Radionuclide Tracer Techniques in Haematology, Butterworth & Co Publisher, British, 1981
7. TUNIZ C., BIRD J.R., FINK D., and HERZOG G.F., Accelerator Mass Spectrometry. CRC Press, Florida, 1998
8. ALBERTS B., BRAY D., LEWIS J., RAFF M., ROBERTS K., and WATSON J.D., Molecular Biology of The Cell, Third Edition, Garland Publishimh Co., New York, 1994
9. KOWALSKY J.R., and PERRY J.R., Radiopharmaceuticals in Nuclear Medicine Practice, Appleton and Lange, California, 1987
10. CANTONE M.C., DE BARTOLO D., and GIUSSANI A., Biokinetics of Ingested Radionuclides and Assesment of Internal Dose, Physica Medica, 13, 296-303, 1997.

MENANGANI KANKER DENGAN RADIOPEPTIDA

Rohadi Awaludin

Pusat Radioisotop dan Radiofarmaka (PRR), BATAN

PENDAHULUAN

Peptida adalah rangkaian asam amino yang dihubungkan dengan ikatan peptida. Zat ini memainkan berbagai peran penting yang spesifik di dalam tubuh seperti *chemical messenger*, *neurotransmitter* serta pemacu dan penghambat metabolisme tertentu. Zat ini mendapat perhatian besar para peneliti dari berbagai disiplin ilmu karena potensi yang disimpannya dalam menyelesaikan masalah kesehatan. [1]

Istilah peptida biasanya digunakan untuk rangkaian asam amino dengan jumlah kurang dari 100 buah. Peptida berikatan secara spesifik dengan protein tertentu yang merupakan reseptornya. Di dunia penanganan kanker, peptida telah dikembangkan untuk diagnosis dan terapi dengan mengadopsi konsep *magic bullet* yang dikemukakan oleh Paul Ehrlich, penerima hadiah nobel kedokteran pada tahun 1908.[2] Konsep *magic bullet*, yang sering dinamakan pula *targeted therapy* adalah konsep penanganan sebuah penyakit dengan mengirimkan bahan aktif secara spesifik ke sumber penyakit, tidak menyebar ke seluruh tubuh. Jadi pembawa (*carrier*) bahan aktif seperti sebuah peluru kendali yang dapat dipandu untuk menuju sasaran [1].

Penelitian tentang peptida dan perannya di dalam tubuh berkembang pesat mulai tahun 1980-an. Salah satu penemuan penting dalam dekade tersebut adalah diketahuinya bahwa jaringan kanker biasanya mengeluarkan reseptor reseptor peptida dalam jumlah berlebih (*over express*). Sejak penemuan tersebut, berbagai upaya dilakukan untuk memanfaatkannya pada

pengembangan metode diagnosis dan terapi kanker. [3]



Gambar 1. Paul Ehrlich, penggagas konsep *magic bullet* dan penerima hadiah nobel kedokteran pada tahun 1908.[2]

RADIOPEPTIDA DAN PEMBUATANNYA

Sejalan dengan perkembangan di bidang radioisotop, kombinasi antara radioisotop dan peptida menjadi bidang baru yang penting di bidang kedokteran nuklir. Ada 2 karakteristik radioisotop yang dapat dimanfaatkan. Pertama, radioisotop dapat dideteksi keberadaannya dengan mudah di seluruh tubuh dalam jumlah yang sedikit sekali pun melalui radiasi yang dipancarkannya. Kedua, radioisotop pemancar

partikel bermuatan memiliki daya hancur yang besar terhadap sel karena besarnya *linear energy transfer* (LET) yang dilepaskan oleh radiasi yang dipancarkannya. Radioisotop dapat diikatkan pada peptida sehingga diperoleh peptida yang telah mengandung radioisotop yang sering dinamakan dengan radiopeptida. [5]

Untuk keperluan diagnosis, radiopeptida digunakan agar keberadaan dan distribusinya di dalam tubuh dapat dideteksi dari luar tubuh. Radioisotop untuk keperluan ini dipilih dari jenis radioisotop pemancar gamma dengan energi rendah sehingga memberikan efek yang kecil terhadap tubuh. Akumulasi radiopeptida tersebut secara berlebihan di suatu tempat menandakan keberadaan reseptor peptida dalam jumlah berlebih yang merupakan indikasi adanya jaringan sel kanker. [1,3]

Untuk keperluan diagnosis ini, radioisotop yang banyak digunakan adalah teknesium-99m (^{99m}Tc). Pemilihan radioisotop ini dikarenakan teknesium-99m memiliki waktu paruh yang pendek (6,6 jam), merupakan radioisotop pemancar gamma murni dengan energi 140 keV, tidak memancarkan partikel bermuatan dan dapat diperoleh dalam bentuk bebas pengemban (*carrier free*). Radioisotop bebas pengemban adalah radioisotop yang tidak mengandung isotop lain dari unsur yang sama sehingga radioaktivitas tiap satuan massa (radioaktivitas jenis) sangat besar. [4]

Pada pengembangan radiopeptida untuk

terapi digunakan radioisotop yang memiliki daya hancur yang besar terhadap sel. Setelah dimasukkan ke dalam tubuh, radioisotop penghancur sel akan dipandu oleh peptida menuju jaringan kanker. Jenis radioisotop yang telah dimanfaatkan dalam pengembangan adalah radioisotop pemancar beta seperti renium-188, renium-186, fosfor-32 dan itrium-90. Hal ini didasarkan pada karakteristik radiasi beta yang memiliki *linear energy transfer* (LET) yang besar dan daya tembus yang kecil. Karakteristik ini menjadikan radiasi beta memiliki daya hancur terhadap sel yang besar dan menimbulkan efek yang kecil terhadap sel normal disekitarnya. [4]

Ada 2 cara untuk mengikatkan radioisotop pada peptida, yaitu metode langsung dan metode tidak langsung. Reaksi pengikatan ini dinamakan reaksi penandaan (*labelling reaction*). Pada metode langsung, radioisotop secara langsung diikatkan pada peptida pada titik titik tertentu yang memungkinkan terjadinya ikatan kimia. Kelebihan dari metode ini adalah tata kerja yang sederhana sehingga dapat dilakukan secara rutin dengan mudah. Namun, hasil penelitian sampai saat ini menunjukkan bahwa tidak semua peptida dapat berikatan dengan radioisotop secara langsung dengan mudah. Peptida yang telah berhasil ditandai dengan metode langsung adalah peptida yang mengandung *disulphide bridge*. Radioisotop dapat diikatkan ke dalam peptida setelah *disulphide bridge* tersebut direduksi menjadi tiol bebas (*free tiols*). Beberapa peptida analog dari somatostatin telah berhasil ditandai

Tabel 1. Karakteristik radioisotop untuk terapi menggunakan peptida [4]

Jenis	Waktu paruh	Jenis peluruhan	Energi beta	Energi gamma
¹⁸⁶ Re	90,6 jam	Beta (94%) EC (6%)	1,08 (71%) 0,939 (21%)	0,137 (8,6%)
¹⁸⁸ Re	16,98 jam	Beta	2,12 (71%) 1,96 (25%)	0,155 (15%) 0,633 (1,2%)
³² P	14,26 hari	Beta	1,71 (100%)	Tidak ada
⁹⁰ Y	64,1 jam	Beta	2,28 (100%)	Tidak ada
¹¹¹ In	2,83 hari	EC	Tidak ada	0,171 (90%) 0,245 (94%)

dengan metode ini. [3]

Pada metode tidak langsung, radioisotop diikatkan kepada peptida dengan perantara. Perantara yang digunakan berupa *bifunctional chelating agent* (BFCA). BFCA yang sering digunakan adalah DTPA (*diethylene triaminepentaacidic acid*) dan DOTA (*tetraazacyclododecanetetraacidic acid*). Ada dua pendekatan yang dapat dilakukan, yaitu pendekatan *prelabelling* dan *postlabeling*. Pada pendekatan *prelabelling*, radioisotop diikatkan dulu pada BFCA untuk selanjutnya diikatkan kepada peptida yang dikehendaki. Sayangnya, pendekatan ini memerlukan proses bertahap sehingga kurang sesuai untuk kegiatan rutin, hanya cocok untuk keperluan riset dan pengembangan.

Pada pendekatan *postlabelling*, BFCA diikatkan dulu ke dalam peptida., Setelah itu radioisotop diikatkan pada *chelating group* bebas pada BFCA. Pendekatan ini lebih banyak mendapat perhatian para peneliti karena diharapkan dapat digunakan dengan mudah untuk proses rutin. Tantangan dari pendekatan ini berupa pemisahan BFCA sisa yang tidak bereaksi dengan peptida agar tidak mengganggu pada proses pengikatan dengan radioisotop. Beberapa jenis resin telah dikembangkan untuk keperluan proses pemisahan ini.

FARMAKOKINETIKA RADIOPEPTIDA

Uji penting setelah penandaan adalah uji farmakokinetika (*pharmacokinetics*) dari radiopeptida yang dihasilkan. Secara garis besar farmakokinetika mencakup absorpsi, distribusi, metabolisme dan eliminasi setelah zat tersebut dimasukkan ke dalam tubuh. Peptida yang tepat untuk penanganan kanker adalah peptida yang memiliki *residence time* di darah yang pendek namun cukup untuk mencapai jaringan sasaran. Selain itu peptida tersebut harus memiliki *clearance* yang cepat pada jaringan bukan sasaran sehingga memiliki *target to background ratio*, yaitu bilangan yang menunjukkan perbandingan

zat yang berada di sasaran dan yang tidak di sasaran, yang tinggi. [1,3]

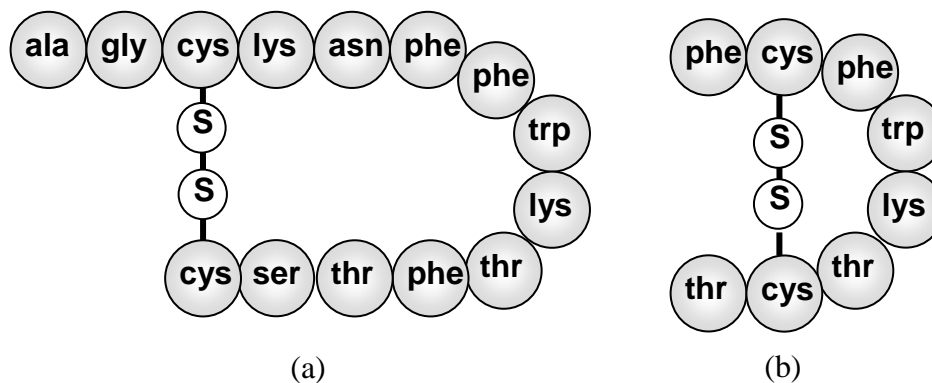
Pada saat penandaan, ada sebagian kecil struktur yang berubah. Secara umum, sifat peptida tidak terpengaruh oleh perubahan kecil tersebut. Namun, ketika karakteristik peptida tersebut ditentukan oleh bagian struktur tersebut, misalnya pada bagian *disulfide bridge*, maka ada kemungkinan terjadi perubahan karakteristik. Perubahan tersebut dapat menyebabkan perubahan farmakokinetika rangkaian asam amino tersebut.

ANALOG SOMATOSTATIN

Pada penanganan kanker, jenis peptida yang banyak mendapat perhatian para peneliti adalah somatostatin. Somatostatin memiliki banyak reseptor yang dihasilkan secara berlebih pada sebagian besar jaringan kanker. Secara alamiah, somatostatin merupakan hormon yang berfungsi menekan pengeluaran hormon pertumbuhan. Somatostatin terdiri dari dua jenis yaitu SST-14 yang tersusun dari 14 buah asam amino dan SST-28 yang terdiri dari 28 buah asam amino. Sampai saat ini telah berhasil diketahui ada 5 jenis reseptor somatostatin (SSTR) yang diberi nama SSTR1 - SSTR5. Sayangnya, somatostatin memiliki waktu paruh biologi yang pendek (2 menit). Peptida ini segera dihancurkan oleh enzim peptidase. [1]

Untuk mengatasi hal itu, telah dikembangkan beberapa peptida yang memiliki sifat yang mirip namun memiliki waktu paruh biologi yang lebih lama. Senyawa ini dinamakan analog somatostatin. Beberapa jenis analog somatostatin telah berhasil disintesa dan dikembangkan untuk menangani kanker melalui penandaan dengan radioisotop.

Analog somatostatin bertanda radioisotop pertama yang disetujui oleh badan pengawas obat dan makanan Amerika Serikat *Food and Drug Administration* (FDA) adalah ^{111}In -DTPA-octreotide. Radiofarmaka ini dikenal dengan nama dagang OctreoScan®. Saat ini peptida



Gambar 2. Rangkaian asam amino pada somatostatin SST-14 (a) dan analog somatostatin *octreotide* (b) dengan *disulphide bridge*. [1]

bertanda radioisotop ini merupakan radiofarmaka yang sering digunakan untuk *cancer imaging*. Menyusul peptida tersebut, telah berhasil dikembangkan pula sebuah peptida yang diberi nama P289. Setelah melewati uji klinis, radiofarmaka ^{99m}Tc -P289 disetujui penggunaannya oleh FDA Amerika Serikat pada tahun 1999. Radiofarmaka ini dikenal dengan nama NeoTech®. Setelah itu beberapa jenis turunan dari octreotide dan P289 terus dikembangkan untuk meningkatkan kinerja kedua peptida tersebut, utamanya pada *binding affinity* terhadap reseptor somatostatin. Misalnya penggantian asam amino *phe* pada octreotide dengan *tyr* berhasil meningkatkan *binding affinity* terhadap reseptor somatostatin. [3]

PENUTUP

Pengembangan peptida untuk penanganan kanker telah menjadi arena adu cepat berbagai lembaga penelitian baik milik pemerintah maupun industri di banyak negara. Hal ini didasarkan pada kenyataan bahwa belanja jasa layanan kesehatan memiliki persentase yang tinggi dibandingkan dengan belanja total secara keseluruhan. Di Jepang, angka tersebut telah melewati angka 6%. Persentase belanja kesehatan

menunjukkan peningkatan seiring dengan peningkatan pendapatan perkapita. Oleh karenanya ada keyakinan bahwa jumlah belanja untuk jasa kesehatan akan meningkat pesat dalam waktu dekat sejalan dengan pertumbuhan ekonomi. Di antara jasa kesehatan dengan nilai ekonomi tinggi adalah jasa kesehatan yang berkaitan dengan penanganan kanker. [6]

DAFTAR PUSTAKA

1. G. A. KALTSAS, D. PAPADOGIAS, P. MAKRAS AND A. B. GROSSMAN, *Treatment of Advanced Neuroendocrine Tumours with radiolabelled somatostatin analogues*, *Endocrine-Related Cancer*, Vol 12, 2005.
2. http://en.wikipedia.org/wiki/paul_ehrlich, Mei 2007.
3. V.J. LEWINGTON, *Targeted Radionuclide Therapy for Neuroendocrine Tumours*, *Endocrine-Related Cancer*, Vol 10, 2003.
4. N. SAITOH, *Handbook of Radioisotope*, Maruzen, 1996.
5. G. V.S. RAYUDU, *Radiotracers for Medical Application*, CRC press, 1983.
6. T. INOUE, K. HAYAKAWA, H. SHIOTARI, E. TAKADA AND M. TORIKOSHI, *Economic scale of Utilization of Radiation (III): Medicine*, *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol 39, 2002.

PEMERIKSAAN ABERASI KROMOSOM PADA PEKERJA RADIASI

Yanti Lusiyanti

Divisi Jasa Teknologi Kostranda, Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi – BATAN
Kawasan PPTN Pasar Jumat, Jl. Cinere Pasar Jumat Kotak Pos 7043 JKSKL, Jakarta 12070
e-mail: dikt.PTKMR@inbox.com
Telp. : (021) 7513906 ext.154 dan (021) 7654241 ext.101
Fax. : (021)7657950 dan (021)7654184 ext.102

Pemeriksaan kesehatan pekerja radiasi merupakan suatu kegiatan yang mutlak perlu dilakukan pada setiap fasilitas yang memanfaatkan radiasi pengion. *International Atomic Energy Agency* (IAEA) telah memberikan pedoman untuk pelaksanaan pemeriksaan kesehatan ini dalam publikasi *Basic Safety Standards* atau Standar Keselamatan Dasar yang diterbitkan pada tahun 1996. Di Indonesia, beberapa ketentuan hukum yang berkaitan dengan pemeriksaan kesehatan juga telah berlaku, yaitu Undang-Undang No 10 Tahun 1997 tentang Ketenaganukliran pasal 16 ayat (1) yang menyatakan bahwa “setiap kegiatan yang berkaitan dengan pemanfaatan tenaga nuklir wajib memperhatikan kesehatan, keamanan dan ketentraman, kesehatan pekerja dan anggota masyarakat serta perlindungan terhadap lingkungan hidup”. Kemudian Keputusan Kepala BAPETEN No. 01/Ka-BAPETEN/V-99 tentang Ketentuan Keselamatan Kerja Terhadap Radiasi. Selain itu juga ada Peraturan Pemerintah RI No 63 tahun 2000 tentang Keselamatan dan Kesehatan Terhadap Pemanfaatan Radiasi Pengion, dan Peraturan Menteri Kesehatan RI No. 172/MENKES/PER/III/1991 tentang Pengawasan Kesehatan Pekerja radiasi.

Pada saat tubuh terpajan radiasi, sel dapat mengalami kerusakan sitogenetik yaitu kerusakan yang terjadi pada aspek genetik sel, khususnya kromosom bergantung pada dosis yang diterima. Kromosom terdapat di dalam inti sel dan merupakan struktur yang terdiri dari rangkaian

panjang molekul asam deoksiribonukleat (DNA) dengan matriks protein, dan memegang peranan sebagai pembawa sifat dari suatu individu. Kromosom manusia berjumlah 23 pasang mengandung ribuan gen yang merupakan suatu rantai pendek dari DNA yang membawa kode informasi genetik tertentu dan spesifik. Secara normal, kromosom terdiri dari lengan atas dan lengan bawah yang dihubungkan dengan sentromer. Radiasi dapat menyebabkan terjadinya perubahan struktur kromosom. Perubahan yang dimaksud dapat berupa: (1). kromosom disentrik yaitu kromosom dengan dua sentromer yang terbentuk dari penggabungan dua patahan kromosom; (2). fragmen asentrik yaitu delesi pada lengan kromosom sehingga terbentuk fragmen kromosom tanpa sentromer; (3). kromosom cincin yang terbentuk karena adanya penggabungan patahan antar lengan kromosom. Kromosom disentrik merupakan bentuk aberasi yang paling spesifik akibat radiasi pengion dan merupakan *Gold Standard* untuk diaplikasikan dalam pengkajian efek radiasi. Jumlah kromosom disentrik yang terbentuk akibat paparan radiasi latar dari alam pada tubuh adalah sekitar 1 – 2 dalam 1000 sel darah limfosit.

Tubuh manusia tersusun oleh berjuta-juta sel yang membentuk jaringan, dan dari sel-sel yang menyusun jaringan ini ada yang aktif membelah seperti sel limfosit. Untuk dapat melihat kromosom di dalam sel, maka syaratnya adalah bahwa sel itu mampu membelah diri dengan sempurna pada media kultur. Selain itu

limfosit dikenal sebagai sel yang paling sensitif terhadap radiasi. Sehingga pemeriksaan aberasi kromosom khususnya disentrik dilakukan pada sel darah limfosit untuk memprediksi efek radiasi pada tubuh. Semakin tinggi frekuensi aberasi kromosom disentrik yang terjadi, semakin besar tingkat kerusakan yang di derita sebagai konsekuensi dari dosis radiasi yang diterima tubuh. Dosis radiasi terendah yang dapat menginduksi pembentukan aberasi kromosom adalah 25 cGy (sinar γ dan X). Kebolehjadian terbentuknya disentrik sekitar $2,22 \pm 10^{-4}/\text{cGy}$. Dengan demikian pemeriksaan aberasi kromosom sangat penting untuk keperluan proteksi radiasi bagi para pekerja radiasi.

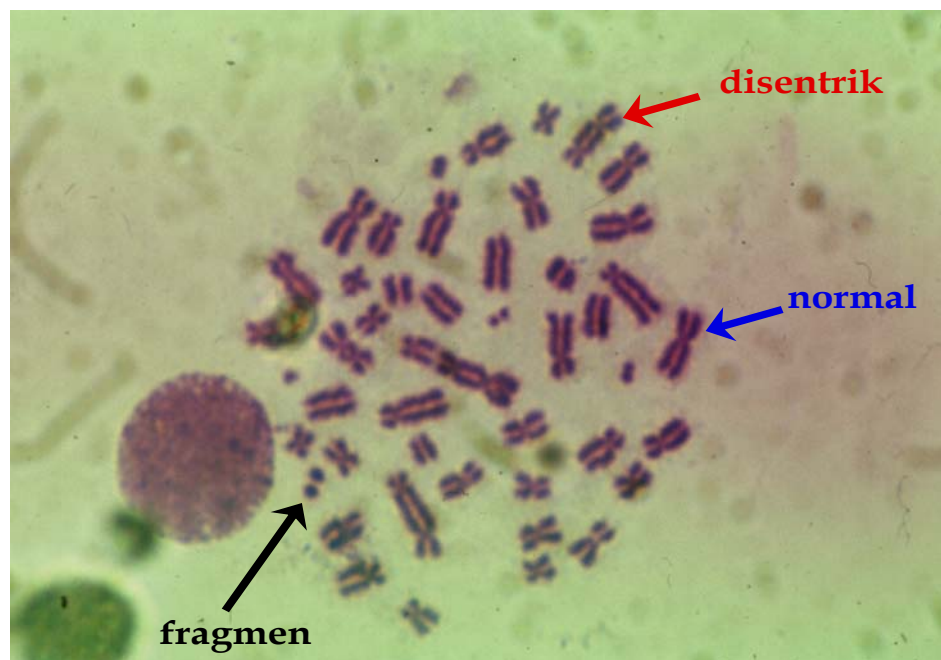
Manajemen Medis Pekerja yang Terpapar Radiasi Akibat Kecelakaan

Pekerja radiasi berpotensi menerima paparan radiasi dengan dosis yang tidak diinginkan baik melebihi atau tidak melampaui nilai batas dosis yang diizinkan, sebagai akibat dari suatu kecelakaan ataupun karena tata kerja yang salah. Segera setelah terpapar radiasi

berlebih, manajemen harus melaksanakan penyidikan untuk menentukan dosis yang diterima pekerja. Jika dosis telah diketahui, kemudian harus diinformasikan kepada bagian pelayanan kesehatan kerja.

Laboratorium Keselamatan, Kesehatan, dan Lingkungan (Lab KKL) Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi – BATAN memberikan pelayanan pemeriksaan kesehatan rutin pada pekerja radiasi maupun pemeriksaan khusus apabila pekerja terpapar radiasi berlebih yaitu pemeriksaan jumlah aberasi kromosom. Lab KKL merupakan laboratorium pengujian yang salah satunya mengkhususkan diri pada pengujian terhadap Keselamatan dan Kesehatan Pekerja Radiasi. .

Untuk melakukan pemeriksaan kromosom disentrik diperlukan kurang lebih 3 ml darah tepi untuk kemudian dilakukan proses pengkulturan (pembiasaan), pembuatan preparat dan kemudian dilakukan pengamatan dengan mikroskop. Pengamatan terhadap jumlah aberasi kromosom bentuk disentrik dilakukan terhadap 500 sel pada tahap metafase (Gambar1), bergantung pada




Gambar 1. Struktur kromosom normal, kromosom disentrik dengan fragmen asentrik pada sebuah sel darah limfosit yang mempunyai 23 pasang kromosom.

kondisi sel darah yang dianalisis. Dengan demikian untuk keperluan tersebut diperlukan waktu pemeriksaan sekitar 1 bulan. Hasil yang diperoleh dilaporkan secara tertulis seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2 .

DAFTAR PUSTAKA

1. BADAN TENAGA NUKLIR NASIONAL Pedoman Pemeriksaan Kesehatan Pekerja Radiasi. BATAN. 2000.
2. HALL,E.J. Radiology for the Radiologist. 5th ed Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia 2000.
3. IAEA, FAO, ILO, NEA/OECD, PAHO, and WHO. International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for Safety of Radiation Sources. Safety Series No. 115. IAEA, Vienna. 1996.
4. Undang-Undang No. 10 Tahun 1007 tentang Ketenaganukliran.
5. Peraturan pemerintah RI No. 63 Tahun 2000 tentang Keselamatan dan Kesehatan Terhadap Pemanfaatan Radiasi Pengion.
6. Peraturan Menteri Kesehatan RI No. 172/MENKES/PER/III/1991 tentang Pengawasan Kesehatan Pekerja Radiasi.
7. Keputusan Kepala BAPETEN No. 01/Ka-BAPETEN/V-99 tentang Ketentuan Keselamatan Kerja Terhadap Radiasi.
8. IAEA. Cytogenetic Analysis for Radiation Dose Assessment. A Manual. Technical Reports Series No. 405. IAEA, Vienna. 2001.



DIVISI JASA TEKNOLOGI KOSTRANDA
PUSAT TEKNOLOGI KESELAMATAN DAN METROLOGI RADIASI
BADAN TENAGA NUKLIR NASIONAL

Jl. Cinere Pasar Jumat Kotak Pos 7043 JKSKL Jakarta 12070, e-mail : djkt.PTKMR@inbox.com
Telp. (021) 7513906 Ext. 154, 7654241 Ext. 101 Fax. (021) 7657950, 7654184 Ext. 103

HASIL PEMERIKSAAN ABERASI KROMOSOM

Apa itu Aberasi Kromosom ?

Ketika tubuh terkena paparan radiasi, sebagian besar sel tubuh mengalami kerusakan sitogenetik khususnya kromosom. Kerusakan struktur kromosom atau aberasi kromosom merupakan efek segera akibat paparan radiasi sehingga dapat digunakan untuk keperluan proteksi radiasi para pekerja. Frekuensi terbentuknya aberasi kromosom setara dengan dosis radiasi yang diterima. Aberasi kromosom yang spesifik akibat radiasi adalah disentrik dan cincin. Pemeriksaan sebaiknya dilakukan secepat mungkin. Kisaran dosis radiasi yang dapat menginduksi pembentukan aberasi kromosom antara 25 cGy – 800 cGy (sinar γ dan X). Kebolehhadiah terbentuknya disentrik sekitar $2,22 \pm 10^{-7}$ /cGy dan frekuensi cincin < 10% dari disentrik.

Hasil ?

Nama	Jumlah sel metaphase yang diamati	Jumlah aberasi kromosom		
		Disentrik	Cincin	Fragmen Asentrik

Kesimpulan ?

.....
.....
.....

Kepala Bidang Biomedika

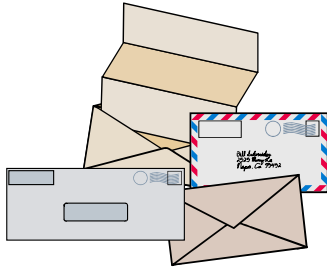
.....

Gambar 2. Contoh laporan hasil pemeriksaan aberasi kromosom pada sel darah limfosit pekerja radiasi Contoh Sertifikat

Untuk mendapatkan layanan pemeriksaan khusus dapat menghubungi :

Lab KKL atau Divisi Jasa Teknologi Kostranda PTKMR - BATAN,
Kawasan PPTN Pasar Jumat, Jl. Cinere Pasar Jumat Kotak Pos 7043 JKSKL, Jakarta 12070
e-mail: djkt.PTKMR@inbox.com

Telp. : (021) 7513906 ext.154 dan (021) 7654241 ext.101, Fax. (021)7657950 dan 7654184 ext.102



KONTAK PEMERHATI

Sesuai dengan tujuan diterbitkannya Buletin ALARA ini, yaitu sebagai salah satu sarana *informasi, komunikasi dan diskusi* di antara para peneliti dan pemerhati masalah keselamatan radiasi dan lingkungan di Indonesia, maka mulai edisi berikut akan dimuat "Paket Kontak Pemerhati". Para pembaca dapat menanyakan tentang permasalahan yang telah dikemukakan pada buletin ini atau memberikan saran/komentar serta tanggapan/kritikan yang sifatnya membangun.

Surat dapat dikirimkan melalui POS ke **Tim Redaksi Buletin ALARA** atau melalui Fax. (021) 7657950

Jawaban serta Surat/ tanggapan akan dimuat pada edisi berikutnya.

Tim Redaksi

Redaksi yang terhormat,

Seminar sehari PMKN yang diadakan oleh PTKMR sekitar awal tahun 2006 tidak bisa kami hadiri, mengingat adanya tugas yang tidak bisa kami tinggalkan. Untuk itu, kami mohon Tim Redaksi sudi kiranya untuk memberikan kumpulan makalah yang dipresentasikan pada acara tersebut. Apakah memungkinkan seminar seperti itu juga diadakan di daerah selain Jakarta?

Atas perhatian dan kerjasamanya kami mengucapkan terimakasih.

Rachmadi S, Padang

Bapak Rachmadi S yang budiman,

Terimakasih atas perhatiannya terhadap PMKN atau Penanggulangan Medik Kedaruratan Nuklir, yang pernah diadakan PTKMR. Dengan sangat menyesal, kami tidak bisa mengirimkan kumpulan makalah seminar tersebut. Sebagai penggantinya secara bertahap akan ditampilkan dalam Buletin ini.

Pada edisi ini kami tampilkan makalah "Perencanaan Tanggap Medik pada Kedaruratan Nuklir". Mudah2an dapat bermanfaat.

redaksi

PERENCANAAN TANGGAP MEDIK PADA KEDARURATAN NUKLIR^{*)}

Kunto Wiharto

Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi – BATAN

- Jalan Cinere Pasar Jumat, Jakarta – 12440
- PO Box 7043 JKSKL, Jakarta – 12070

PENDAHULUAN

Dewasa ini pemanfaatan tenaga nuklir telah mempunyai lingkup yang demikian luas, baik di penelitian, kesehatan maupun industri, seperti yang tercantum pada Laporan Keselamatan Nuklir di Indonesia Tahun 2002 yang dipublikasikan oleh BAPETEN. Hingga tanggal 31 Desember 2002, tidak kurang dari izin untuk operasi 3 buah reaktor nuklir dan 33 izin pemanfaatan zat radioaktif/sumber radiasi di Badan Tenaga Nuklir Nasional telah diterbitkan. Selain itu telah pula diterbitkan sebanyak 2504 izin di sektor industri (radiografi, *logging*, *gauging*, dsb), dan 2338 izin di sektor kesehatan (radiodiagnostik, radioterapi, kedokteran nuklir)[1]. Pemanfaatan tenaga/teknologi nuklir tersebut pada umumnya dilaksanakan dengan menggunakan bahan radioaktif atau pesawat pembangkit radiasi baik yang dilakukan di dalam suatu fasilitas maupun di lapangan.

Dengan pesatnya perkembangan pemanfaatan radiasi tersebut untuk kegiatan pembangunan, apalagi dengan adanya opsi nuklir untuk keperluan pemenuhan kebutuhan energi ke depan yang tidak akan mampu lagi untuk dipenuhi dengan sumber energi konvensional maka di samping kegunaannya yang sangat besar bagi kesejahteraan manusia, potensi kecelakaan yang mungkin dapat terjadi dan dapat menimbulkan keadaan darurat perlu dicermati

dan diantisipasi penanggulangannya tidak terkecuali dari aspek medik.

Menurut *International Basic Safety Standards*, yang dimaksud dengan kecelakaan adalah setiap kejadian yang tidak dikehendaki termasuk kesalahan operasi, kegagalan peralatan atau kesalahan-kesalahan lain, yang mempunyai akibat atau berpotensi menimbulkan akibat yang tidak dapat diabaikan dari segi proteksi atau Keselamatan [2].

Kecelakaan radiasi didefinisikan sebagai kejadian tak terduga yang meliputi pemaparan/pemajanan berlebih atau kontaminasi pada seseorang dan atau lingkungan dengan bahan radioaktif. Sedangkan menurut PP No. 63 Tahun 2000 Tentang Keselamatan dan Kesehatan Terhadap Pemanfaatan Radiasi Pengion, maka yang dimaksud dengan Kecelakaan Radiasi adalah kejadian yang tidak direncanakan termasuk kesalahan operasi, kegagalan fungsi alat atau kejadian lain yang menjurus timbulnya dampak radiasi, kondisi paparan radiasi dan atau kontaminasi yang melampaui batas Keselamatan [3].

KESIAPSIAGAAN DAN TANGGAP DARURAT NUKLIR/RADIOLOGIK [4]

Konsep Dasar

Pada penelitian mendasar yang dilakukan oleh IAEA terhadap kecelakaan di masa lampau, dapat diperoleh pelajaran berharga yaitu antara lain bahwa kasus 1000 anak terkena kanker

^{*)} Telah dipresentasikan pada "Seminar Sehari Penanggulangan Medik Kedaruratan Nuklir", Jakarta, Januari 2006.

kelenjar gondok akibat kecelakaan reaktor Chernobyl sebenarnya bisa dihindari bila instansi yang berwenang bertindak cepat tanggap terhadap kejadian kecelakaan tersebut. Instansi berwenang kurang cepat tanggap karena memang kurang siap menghadapi kemungkinan kecelakanan itu. Kejadian lain adalah melelehnya teras reaktor pada kecelakaan di *Three Mile Island*, karena operator reaktor tidak terlatih untuk menghadapi kecelakaan. Dari kedua peristiwa itu ternyata penyebab utamanya adalah karena tidak ada seorang pun yang berfikir bahwa akan sangat berguna untuk mempersiapkan diri jauh sebelum terjadi keadaan darurat walau pun kebolehjadiannya rendah

Tanggap darurat nuklir/radiologik pada dasarnya sama dengan tanggap darurat yang menyangkut bahan berbahaya lainnya. Perbedaannya adalah bahwa bahan beracun lainnya dapat tercium, dilihat atau dirasakan sedangkan radiasi tidak. Radiasi sebenarnya dapat mudah dideteksi dengan peralatan/*detector* radiasi. Pada umumnya masyarakat belum mempunyai pengetahuan dan pengalaman dalam menangani kecelakaan *radiology*/nuklir. Kecuali dalam kasus yang sangat serius, efek radiasi tidak nampak dalam bilangan hari, minggu atau bahkan bulan.

Sasaran Tanggap Darurat

Secara umum tanggap darurat radiologik/nuklir mempunyai sasaran sebagai berikut:

- (1) Untuk mengendalikan kembali situasi
- (2) Untuk mencegah atau mengurangi konsekwensi di tempat kejadian
- (3) Untuk mencegah terjadinya efek kesehatan yang deterministik terhadap pekerja radiasi dan penduduk
- (4) Menyelenggarakan pertolongan pertama dan melakukan penanganan/perlakuan terhadap penyakit akibat radiasi
- (5) Menekan serendah-rendahnya atau mencegah sedapat mungkin efek kesehatan stokastik terhadap penduduk

- (6) Mencegah terjadinya efek non radiologi yang tidak diinginkan terhadap seseorang sejauh itu dapat dilakukan
- (7) Melindungi lingkungan hidup dan bangunan sejauh itu dapat dilakukan
- (8) Menyiapkan pemulihan aktivitas sosial dan ekonomi kembali normal, sejauh itu dapat dilakukan.

Sasaran 1 dan 2, merupakan tanggung jawab operator atau pengusaha instalasi nuklir

Sasaran 3, dilaksanakan dengan melakukan tindakan proteksi untuk menjaga agar dosis berada di bawah nilai ambang batas terjadinya efek deterministik. Sebagai pedoman diberikan Tabel Tingkat Tindakan untuk Melakukan Intervensi seperti pada Lampiran 2.

Sasaran 4, dilaksanakan pada tingkat awal oleh **tim kesehatan** yang datang terlebih dulu di tempat kejadian dan berwenang untuk memberikan pertolongan pertama terhadap luka-luka yang membahayakan jiwa. Kurangnya persiapan untuk memberikan tindakan medik yang benar pada paparan radiasi yang berlebihan pada beberapa kasus telah mengakibatkan perlakuan yang tidak memadai dan penderitaan yang tidak perlu. Petugas medis, tanpa pelatihan tanggap radiologik, karena takut telah menolak untuk mengobati korban yang berpotensi mendapat kontaminasi.

Sasaran 5, dilaksanakan dengan tindakan proteksi agar dosis konsisten dengan yang tertera dalam pedoman internasional *Generic Intervention Levels* (GIL's) agar tindakan proteksi berlaku dalam waktu lama kepada penduduk dan *Generic Action Levels* (GAL's) di mana perlu dilakukan pengawasan terhadap bahan makanan. (Lampiran 1, dan Lampiran 2).

Sasaran 6, ditujukan untuk mengatasi masalah yang lebih besar dari pada konsekwensi radiologik, sosiologi, dan ekonomi. Hal ini terjadi karena kurangnya informasi yang diberikan sejak awal saat terjadinya kecelakaan.

Sasaran 7, dinyatakan dengan membatasi penyebaran kontaminasi dan menjamin bahwa tindakan dekontaminasi telah dilakukan untuk mengurangi dampak terhadap lingkungan.

Sasaran 8, sangat terkait dengan sasaran 6. Pemulihan ke keadaan kehidupan yang normal sangat diperlukan untuk menghilangkan banyak konsekuensi non radiologis yang merugikan. Sebelum penduduk dapat hidup normal mereka ingin mengetahui apakah mereka dan orang-orang yang mereka cintai berada dalam keadaan aman, serta kepentingan mereka (harta benda, penghidupan, dsb) tidak berada dalam risiko.

Kategori Ancaman

Sebelum perencanaan dapat dimulai, harus terlebih dulu dilakukan identifikasi semua kegiatan untuk mana perencanaan tanggap darurat perlu dilakukan. Untuk memudahkan maka dilakukan pengelompokan ancaman (Kategori Ancaman (KA)) ke dalam 5 kategori.

KA – I : Fasilitas seperti PLTN, dalam hal terjadi kecelakaan di fasilitas (*on-site event*), dipostulasikan dapat memberi peningkatan efek deterministik yang sangat parah ke lingkungan.

KA – II : Fasilitas seperti beberapa tipe reaktor riset, dalam hal terjadi kecelakaan di fasilitas dipostulasikan dapat memberikan peningkatan dosis kepada penduduk di sekitar fasilitas yang segera memerlukan tindakan proteksi sesuai dengan standar internasional

KA – III: Fasilitas seperti irradiator untuk industri, dalam hal terjadi kecelakaan di fasilitas dipostulasikan dapat memberikan peningkatan dosis dan kontaminasi yang segera memerlukan tindakan proteksi di tempat kejadian

KA – IV: Kegiatan yang dapat menimbulkan kedaruratan nuklir atau radiologik yang segera memerlukan tindakan proteksi di suatu tempat yang belum diketahui. Termasuk di sini adalah kegiatan penggunaan sumber radiasi

yang berbahaya tanpa izin. Sumber radiasi dapat berupa sumber dapat berpindah tempat (mobil) seperti sumber radiografi industri (NDT), satelit bertenaga nuklir. Merupakan tingkat ancaman terendah yang diberlakukan di seluruh tanah air.

KA – V : Kegiatan yang pada kondisi normal tidak melibatkan penggunaan sumber radiasi, tapi dapat menerima produk yang memberikan dampak mirip ancaman I dan II.

Organisasi Tanggap Darurat

Struktur Organisasi Tanggap Darurat pada dasarnya terdiri atas 5 komponen, yaitu: komando, perencanaan, operasi, logistik, dan administrasi/keuangan. Tim Kedaruratan Medik (*Emergency Medical Responder*) terdapat dalam komponen operasi yaitu sebagai Cabang Layanan Medik dan Proteksi Radiasi (*Medical and Radiation Protection Services Branch*). Di dalam cabang ini terdapat struktur seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.

A). Pembagian Wilayah dan Zona

Pada umumnya tanggap darurat dilakukan menurut dua wilayah yang berbeda, yaitu:

(1) Wilayah Kawasan Tempat Kejadian (*On-Site Area*)

Ini adalah wilayah di sekitar fasilitas yang masih berada di dalam pagar keamanan atau pagar lain yang menandai bahwa di dalamnya adalah kawasan fasilitas. Bisa juga berupa daerah pengendalian di sekitar sumber radiografi atau wilayah terkontaminasi. Pokoknya adalah wilayah yang langsung berada di bawah kontrol penguasa fasilitas atau operator alat.

(2) Wilayah Lepas-Kawasan (*Off-Site Area*)

Ini meliputi semua wilayah di luar Kawasan Tempat Kejadian. Di wilayah ini dikenal keberadaan dua zona, yaitu:

a) *Precautionary Action Zone* (PAZ):

Ini adalah zona yang telah ditentukan di sekitar fasilitas bila ada ancaman kategori I. Bila keadaan darurat diumumkan maka tindakan protektif yang telah direncanakan untuk zona ini segera dilaksanakan. Tujuannya adalah untuk menghasilkan pengurangan yang besar pada risiko efek kesehatan *deterministic* parah dengan cara melaksanakan tindakan protektif di dalam zona ini sebelum atau segera sesudah kejadian darurat.

b) *Urgent Protective Action Planning Zone (UPZ)*:

Ini adalah zona yang telah ditentukan di sekitar fasilitas bila ada ancaman kategori I atau II. Di zona ini dilakukan persiapan untuk kemudian segera dilaksanakan tindakan protektif mendesak berdasarkan data yang berasal dari pemantauan lingkungan dan penilaian keadaan fasilitas, yang bertujuan menghindari dosis yang tercantum dalam standar nasional seperti yang terdapat pada Lampiran 1.

B. Tingkat Perencanaan dan Tanggung Jawab

Tanggap darurat yang efektif memerlukan saling dukung dan perencanaan darurat yang terpadu pada tiga tingkat: operator, lepas-kawasan, dan internasional.

(1) Tingkat Operator (O)

Yang dimaksud dengan operator di sini dapat staf fasilitas atau pekerja radiasi yang menggunakan sumber radiasi atau yang sedang melakukan transportasi sumber radiasi pada saat kejadian darurat terjadi. Operator bertanggung jawab untuk:

- segera melakukan tindakan mitigasi keadaan darurat
- melindungi orang-orang yang berada di kawasan
- memberitahukan petugas-petugas Tingkat Lepas-Kawasan dan memberikannya rekomendasi tentang tindakan protektif yang perlu dilakukan dan bantuan teknis

- memberikan bantuan pemantauan radiologik inisial

(2) Tingkat Lepas Kawasan

Pada tingkat ini organisasilah yang akan melaksanakan tanggap darurat. Organisasi ini dapat meliputi:

- (a) Para Pejabat/petugas lokal (**L**): Yaitu institusi/pejabat/petugas pemerintah yang bertanggung jawab untuk segera memberikan bantuan kepada operator dan perlindungan publik di wilayah yang berdekatan dengan kawasan tempat kejadian. Ini mencakup polisi, pemadam kebakaran, pertahanan sipil, petugas/dinas kesehatan yang pertama kali mengetahui kejadian darurat.
- (b) Para Pejabat Tingkat Nasional atau Daerah (**N**) : Yaitu institusi/pejabat/petugas pemerintah pusat atau daerah yang bertanggung jawab untuk memberikan bantuan tindakan protektif jangka panjang, memberikan dukungan kewenangan kepada pejabat/petugas lokal.

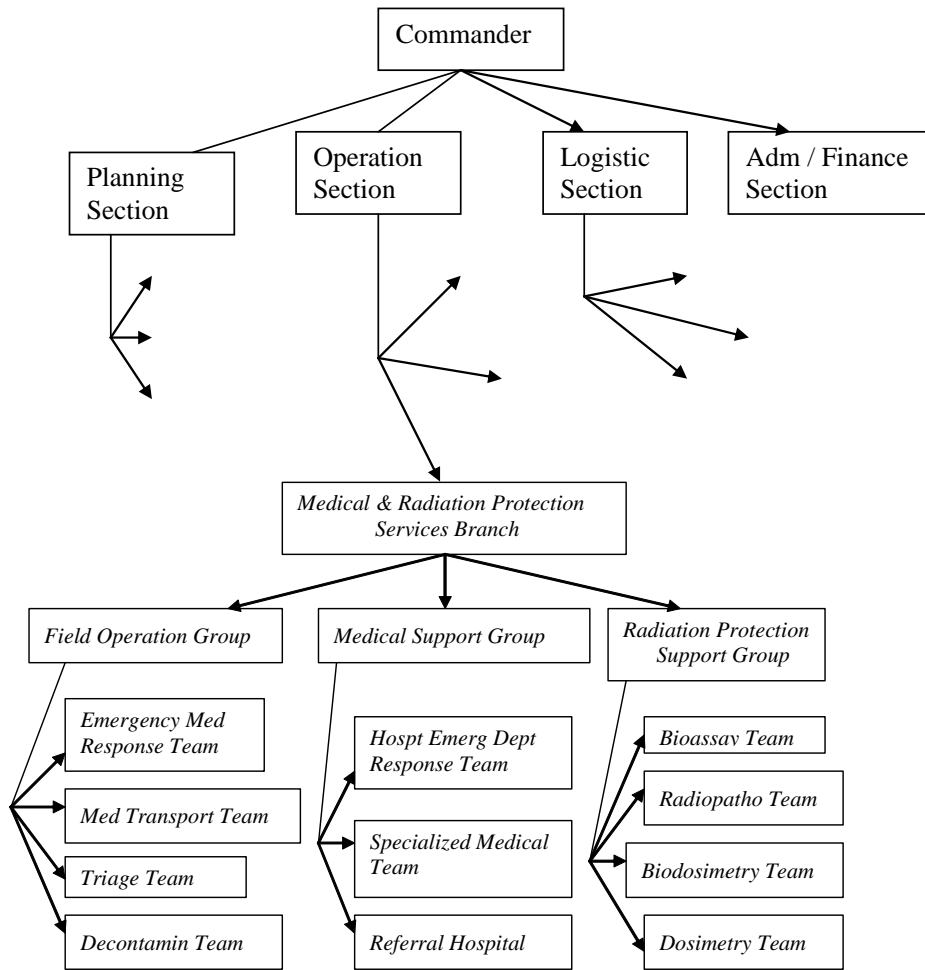
(3) Tingkat Internasional.

Pada tingkat ini terdapat IAEA (*International Atomic Energy Agency*), OCHA (*United Nations Office of the Coordination of Humanitarian Affairs*), WHO (*World Health Organization*), FAO (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*).

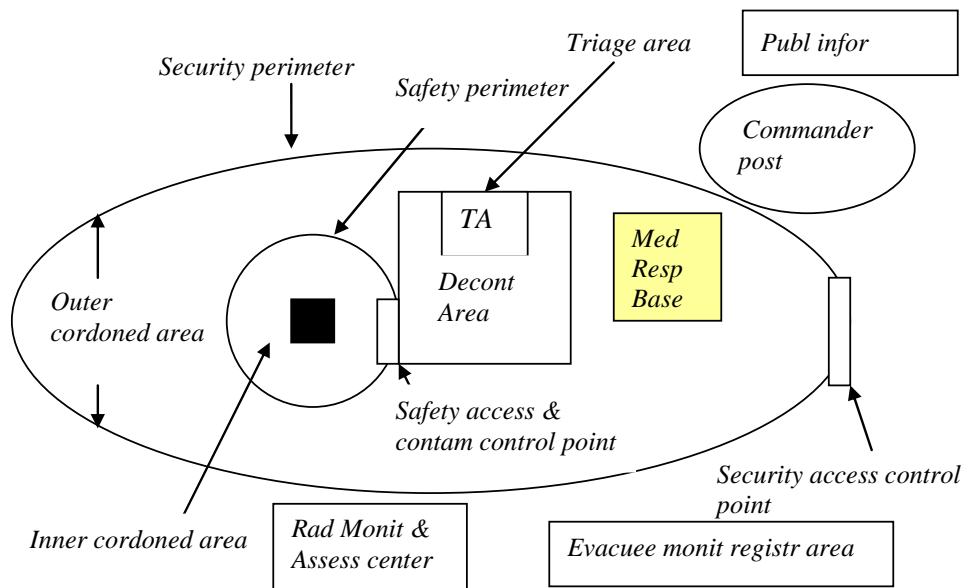
MENGELOLA TANGGAP MEDIK [4]

Tujuan Tanggap Medik

- (a) Untuk memastikan bahwa setiap tenaga medis atau petugas lain yang bertanggung jawab pada tanggap darurat dapat melakukan pemberitahuan yang benar dan mengambil tindakan yang tepat, setelah melakukan pengamatan/observasi terhadap gejala klinis akibat paparan radiasi atau gejala lain yang mengarah pada kemungkinan terjadinya keadaan darurat radiologik



Gambar 1. Penetapan daerah pada penanganan keadaan darurat



Gambar 2.

- (b) Untuk memberikan tindakan medik khusus yang tepat kepada setiap orang yang menerima dosis yang berpotensi memberikan efek deterministic yang parah
- (c) Untuk mendeteksi adanya peningkatan kejadian kanker di antara pekerja di dalam tim tanggap darurat dan penduduk sebagai akibat paparan radiasi selama terjadi kecelakaan serta memberikan tindakan medik yang tepat.

Komponen pada Pengelolaan Tanggap Medik

- (a) Merencanakan agar dokter umum maupun staf gawat darurat dapat memahami gejala klinis akibat radiasi dan mengetahui prosedur penyampaian berita (notifikasi) dan tindakan cepat bila diperkirakan terjadi keadaan darurat radiologik.
 → Kategori Ancaman : IV.
 → Penanggung Jawab : L dan N
- (b) *Ini dapat dilakukan dengan mendistribusikan poster semacam poster IAEA/WHO “How to recognize and initially respond to an accidental radiation injury” .*
 → Kategori Ancaman : IV.
 → Penanggung Jawab : L dan N
- (c) Merencanakan dan mempersiapkan kemampuan melakukan tindakan medik, proteksi radiasi terhadap sejumlah pekerja yang terkontaminasi dan mengalami paparan radiasi berlebih, termasuk melakukan pertolongan pertama, melakukan perkiraan dosis yang diterima, transportasi medik, tindakan awal terhadap personil yang terkontaminasi atau menerima paparan berlebih di fasilitas medik setempat.
 → Kategori Ancaman : I, II dan III.
 → Penanggung Jawab : O dan L
- (d) *Merencanakan dan mempersiapkan untuk mengumpulkan informasi yang diperlukan untuk perkiraan dosis, segera setelah paparan yang parah dalam rangka menentukan langkah-langkah terapi. Informasi ini meliputi: perkiraan dosis yang*

diterima jaringan atau seluruh tubuh; foto/diagram fasilitas/praktek dan kegiatan-kegiatan yang terkait; uraian tentang sumber radiasi (aktivitas, jenis radionuklida, laju dosis pada jarak 1 m); uraian rinci tentang peristiwa pemaparan (missal: lokasi orang menurut fungsi waktu); hasil pembacaan seluruh dosimeter pekerja radiasi atau alat pemantau dosis lainnya; sample benda yang dikenakan oleh orang; uraian lengkap dan saat timbulnya gejala klinis (misal muntah); hasil pemeriksaan medis umum terhadap semua organ dan system tubuh, termasuk kulit, mukosa yang tampak; dan hitung darah total untuk mendeteksi timbulnya gejala pertama akibat pemaparan.

→ Kategori Ancaman : I, II, III dan IV.

→ Penanggung Jawab : O dan L

- (e) *Merencanakan dan mempersiapkan untuk menggunakan fasilitas medik setempat sebagai tempat melakukan tindakan inisial. Fasilitas ini hendaknya dapat digunakan untuk: melakukan dekontaminasi dan mengobati korban kontaminasi, mengidentifikasi paparan radiasi yang memerlukan pengobatan khusus, mengendalikan penye-baran kontaminasi dan menyiapkan pengiriman pasien ke rumah sakit rujukan yang dapat menangani paparan radiasi berlebih yang parah. Melatih/memberitahukan staf medis fasilitas untuk mengendalikan paparan yang mereka terima, risiko menangani pasien terkontaminasi dan atau terpapar radiasi, pengendalian kontaminasi, dan menangani sampah/limbah atau sample terkontaminasi. Pelatihan ini salah satunya dimaksudkan untuk mengatasi kekhawatiran staf yang bisa mempengaruhi tindakan (pengobatan) yang mereka lakukan.*
 → Kategori Ancaman : I, II dan III.
 → Penanggung Jawab : O dan L
- (f) Menetapkan rencana manajemen medik untuk zona darurat termasuk di dalamnya penentuan kriteria operasional untuk memilah (*triage*) dan merujuk ke rumah sakit tertentu terhadap

penduduk yang menerima paparan radiasi tinggi

→ Kategori Ancaman : I.

→ Penanggung Jawab : L

- (g) Merencanakan untuk tingkat nasional, tindakan medik bagi penduduk yang terkontaminasi atau terkena paparan radiasi. Termasuk di dalamnya petunjuk tindakan medis, daftar dokter yang telah terlatih untuk mendiagnosis pada kondisi awal dan melakukan tindakan medik terhadap cedera radiasi serta menetapkan rumah sakit rujukan untuk tindakan medik lebih lanjut.

→ Kategori Ancaman : IV.

→ Penanggung Jawab : N

- (h) Beritahukan perencanaan ini kepada Badan-Badan yang Berwenang untuk dilaporikan tentang perlukaan akibat radiasi. Gunakan fasilitas medik yang tersedia dan berikan penjelasan singkat kepada staf medik tentang risiko (kecil) menangani pasien terkontaminasi dan atau terpapar radiasi, sikap berhati-hati seperti apa yang perlu dilakukan, pengendalian kontaminasi, dan menangani sampah/limbah atau sample terkontaminasi. Pastikan bahwa staf medik tidak ragu-ragu menangani pasien terkontaminasi karena adanya rasa khawatir. Buat prosedur dan system organisasi dan notifikasi untuk para staf medik dan petugas pendukung. Usahakan meminimalkan ketidaknyamanan psikologis (misal bila mungkin mengobati pasien di dekat tempat tinggalnya). Konsultasi ke dokter yang berpengalaman menangani efek kesehatan deterministic yang parah melalui IAEA atau WHO.

→ Kategori Ancaman : IV.

→ Penanggung Jawab : N

- (i) Bersiap-siaplah menghadapi 3 gelombang manusia yang berduyun-duyun datang ke rumah sakit dari kejadian darurat radiasi dengan sejumlah korban manusia. Gelombang I: orang sehat tapi ketakutan yang berusaha segera mencapai rumah sakit

dengan caranya masing-masing. Bila staf tidak menyadari dan bersiap menghadapi gelombang ini maka mereka ini dapat memacetkan rumah sakit dan mengganggu tindakan medik yang harus diberikan kepada mereka yang benar-benar membutuhkan dan baru datang beberapa saat kemudian. Gelombang II: Mereka yang terluka dan ditolong oleh penduduk yang sehat (bukan oleh Tim Penyelamat). Mereka datang setelah gelombang manusia yang pertama, meskipun terluka mereka kemungkinan bukan yang luka parah. Gelombang III: Mereka yang terluka, kebanyakan parah dan ditolong oleh Tim Penyelamat dan sampai di rumah sakit paling akhir. Perlu diketahui bahwa gelombang I & II bisa berisi orang-orang yang belum diperiksa dosis radiasi yang diterima atau adakah kontaminasi yang dialami dan didekontaminasi.

→ Kategori Ancaman : I, II, III, IV dan V.

→ Penanggung Jawab : L dan N

- (j) Rencanakan dan siapkan untuk mengirim Tim Tanggap Darurat Medik untuk mengkoordinasikan tanggap medik terhadap kedaruratan radiologik di mana pun. Tim ini hendaknya disiapkan untuk dapat mempersiapkan dan menggunakan tenaga medik setempat.

→ Kategori Ancaman : IV.

→ Penanggung Jawab : N

- (k) Merencanakan kegiatan identifikasi penelusuran (tracking) dan tindak lanjut medik (termasuk pengobatan) terhadap efek kesehatan pada kelompok penduduk yang berisiko mengalami peningkatan insidensi kanker yang berkelanjutan akibat paparan radiasi atau penyinaran dalam rahim (misal retardasi mental). Kriteria untuk penentuan siapa yang seharusnya menjalani tindak lanjut medik jangka panjang hendaknya bertujuan untuk mendeteksi kanker atau retardasi mental akibat radiasi pada tingkat dini agar dapat diambil tindakan terapi yang efektif.

→ Kategori Ancaman : I, II dan III.

→ Penanggung Jawab : N

(1) *Hendaknya dibuat daftar orang yang akan ditelusuri dan akan menjalani tindak lanjut medik jangka panjang. Perencanaan dan persiapan ini hendaknya meliputi juga identifikasi organisasi penanggung jawab, kriteria inklusi dan informasi yang diperlukan untuk memastikan bahwa identitas yang benar dari orang yang tercantum namanya di daftar dapat dikonfirmasi sepanjang waktu. Dasarkan inklusi dalam daftar pada kriteria obyektif yang menunjukkan potensi peningkatan insidensi kanker akibat radiasi atau retardasi mental akibat penyinaran dalam rahim (misal 50 mSv pada thyroid, 200 mSv seluruh tubuh, dan 100 mSv pada foetus). Masukkan juga mereka yang saat kejadian masih anak-anak yang kemungkinan menerima dosis yang cukup besar dari radioiodine sehingga terjadi peningkatan risiko kanker thyroid yang terdeteksi (misal 50 mSv). Informasikan pada orang-orang yang namanya masuk daftar tentang tujuan pendaftaran dan perkiraan tingkat risiko mereka.*

→ Kategori Ancaman : I, II, III, IV dan V.

→ Penanggung Jawab : N

JENIS KECELAKAAN DAN MANAJEMEN MEDIKNYA

Jenis Kecelakaan

Suatu kecelakaan dinamakan kecelakaan nuklir bila melibatkan fasilitas nuklir terutama reaktor [5]. Kecelakaan radiologik melibatkan sumber radiasi (termasuk zat radioaktif). Beberapa keadaan berpotensi menimbulkan kecelakaan, seperti:

(a) Sumber radiasi berupa zat radioaktif kemungkinan kelupaan letaknya, hilang atau dicuri. Misalnya sumber radiasi gamma untuk radiografi industri kedapatan hilang. Masalahnya adalah si penemu kontener berisi sumber radiasi tersebut dapat memutuskan untuk membuka kontener sehingga dia atau

mungkin juga orang lain dapat terpapar oleh radiasi dari zat radioaktif yang tak berperisai.

- (b) Sumber radiasi radioaktif menjadi tak berperisai karena kegagalan memasukkan kembali sumber ke dalam kontennya sehabis digunakan untuk keperluan rutin.
- (c) Zat radioaktif sumber terbuka bisa terdispersi. Contoh, sebuah vial berisi larutan radioaktif dapat mengalami kebocoran selama penyimpanan, atau terjatuh dan pecah selama dibawa dari tempat penyimpanan ke tempat lain.

Pada semua keadaan di atas, terdapat kemungkinan terjadi pemaparan yang tak terkendali terhadap seseorang kecuali bila dilakukan tindakan protektif yang tepat.

Sumber Radiasi dan Modus Pemaparan

Sebaiknya dilakukan identifikasi jenis dan energi radiasi, tingkat aktivitas dari radionuklida yang digunakan atau diproduksi oleh suatu fasilitas sehingga dapat berguna sebagai informasi untuk perencanaan dan persiapan tindak medik yang tepat bilamana kelak terjadi kecelakaan.

Perlu diketahui bahwa jalur pemaparan terpenting pada tahap awal kecelakaan adalah:

- pemaparan langsung dari sumber radiasi atau fasilitas atau dari bahan radioaktif yang terbebas/terlepas
- terhisapnya material di udara (uap, aerosol, debu)
- pemaparan langsung dari material yang mengendap di tanah atau permukaan
- kontaminasi pada kulit atau pakaian

Dari berbagai kemungkinan jalur pemaparan tersebut ternyata yang memberikan kontribusi terbesar pada penerimaan dosis radiasi adalah jalur pemaparan langsung, dengan pengecualian pada kecelakaan nuklir maka dosis radiasi pada penduduk sebagian terbesar berasal

Tabel 1. Sumber radiasi yang lazim digunakan, fasilitas, kegiatan dan modus pemaparan.

GRUP	SUMBER, KEGIATAN, FASILITAS	PL	K	C
I	Perangkat Kritis, Reaktor, Fabrikasi Bahan Bakar Nuklir, Produksi Radiofarmaka, Instalasi Daur Ulang Nuklir	+	+	+
II	Akselerator partikel, generator sinar-X	+	-	-
III	Sumber terbungkus (utuh), Sumber terbungkus (bocor)	+/+	-/+	-/+
IV	Lab Kedokteran Nuklir, Lab in-vitro (RIA, IRMA, dsb)	+	+	+
V	Transportasi sumber radiasi	+	+	+
VI	Limbah radioaktif	+	+	+

Keterangan :

PL = Paparan Luar ; K = Kontaminasi ; C = Campuran

dari lepasan zat radioaktif ke udara dengan radioiodine sebagai radionuklida utama.

pengobatan. Teknis operasionalnya dibicarakan oleh pembicara lain

Pemilahan (*Triage*)

Pemilahan dimaksudkan sebagai usaha untuk mengklasifikasikan para pasien menurut perlukaan dan atau jenis sindroma yang diderita. Salah satu tujuan utamanya adalah untuk menentukan tingkat perawatan darurat yang diperlukan. Jika kecelakaan hanya menimbulkan sedikit korban maka tidak akan menjadikan masalah pada penanganan mediknya. Sebaliknya bila korban kecelakaan besar jumlahnya (puluhan bahkan ratusan orang) maka dapat menimbulkan kesulitan terutama perawatan mereka di rumah sakit.

Organisasi penanganan medik hendaknya dibuat berdasarkan apakah suatu perlukaan merupakan keadaan darurat medik atau tidak. Perlakuan darurat akan ditentukan mula-mula oleh perlukaan konvensional seperti trauma, luka, luka bakar baik karena api atau bahan kimia. Kontaminasi dengan zat radioaktif merupakan masalah pada sejumlah kecil kasus. Pasien dengan kontaminasi eksternal atau internal hendaknya segera diidentifikasi dan mendapatkan

Manajemen Medik Pasien per Pasien

Dibicarakan tersendiri secara khusus pada sesi yang lain oleh para pembicara lain.

DAFTAR PUSTAKA

1. Badan Pengawas Tenaga Nuklir., Laporan Keselamatan nuklir di Indonesia Tahun 2002, No.04.Rev 0.0, BAPETEN, Jakarta 2003.
2. FAO, IAEA, ILO, OECD NEA, PAHO, WHO, International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources, Safety Series No. 115, IAEA, Vienna, 1996 (295)
3. Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 63 Tahun 2000 Tentang Keselamatan dan Kesehatan Terhadap Pemanfaatan Radiasi Pengion, BAPETEN, Jakarta
4. IAEA, Method for Developing Arrangements for Response to a Nuclear or Radiological Emergency., Updating IAEA-TECDOC-953. IAEA, Vienna, 2003
5. Safety Reports Series No. 2, Diagnosis and Treatment of Radiation Injuries, IAEA, Vienna, 1998.

TABEL A1-1. Recommended generic intervention levels for urgent protective action

Protective action	Generic intervention level
Sheltering	10 mSv
Evacuation	50 mSv
Iodine prophylaxis	100 mGy

TABEL A1-2. Recommended generic intervention levels for temporary relocation and permanent resettlement

Protective action	Generic intervention level
Temporary relocation	Initiate at 30 mSv in 30 days, terminate at 10 mSv in 30 days
Permanent resettlement	1 Sv in lifetime

TABEL A1-3. Generic action level for foodstuffs

Radionuclides in foods destined for general consumption	kBq/kg
Cs-134, Cs-137, I-131, Ru-103, Ru-106, Sr-89	1
Sr-90	0,1
Am-241, Pu-238, Pu-239, Pu-240, Pu-242	0,01

Radionuclides in milk, infant foods and drinking water	kBq/kg
Cs-134, Cs-137, Ru-103, Ru-106, Sr-89	1
I-131, Sr-90	0,1
Am-241, Pu-238, Pu-239, Pu-240, Pu-242	0,001

LAMPIRAN 2

TABEL A2-1. Action level of dose for acute exposure to low LET radiation

Organ or tissue	Action level of dose: Projected absorbed dose from low LET radiation to organ or tissue in < 2 days (Gy)
Whole body (bone marrow)	1
Lung	6
Skin	3
Thyroid	5
Lens of the eye	2
Gonads	3
Foetus	0,1

TABEL A3-1. Emergency worker dose guidance levels

Tasks	Level (mSv)
Life saving actions, such as: 1. Rescue from immediate threats to life, and 2. Prevention or mitigation of conditions resulting in general emergency in a threat category I facility	> 500
Potential life saving actions, such as: 1. Implementation of urgent protective actions on-site for a threat category I, II, III facility 2. Prevention or mitigation of conditions (e.g. fires) that potentially endanger lives; 3. Environmental monitoring of populated areas in emergency zones to identify where urgent protective actions are needed; 4. Implementation of urgent protective actions off the site for a threat category I or II facility Actions to prevent the development of catastrophic conditions, such as prevention or mitigation of conditions resulting in an alert or higher class of emergency in a threat category II or III facility; or alert or site area emergency in a threat category I facility.	500
Actions to prevent serious injury, such as: 1. Rescue from potential threat of serious injury 2. Immediate treat of serious injuries; and 3. Decontamination of people Action to avert a large collective dose, such as: 1. Environmental monitoring of populated areas to identify where protective actions or food restriction may be needed; and 2. Implementation of protective actions and food restrictions off-site	100
Other emergency phase intervention, such as: 1. Longer term treatment of exposed and contaminated individuals; 2. Sample collection and analysis; 3. Short term recovery operations; 4. Localized decontamination; and 5. Keeping the public informed	50
Recovery operations, such as: 1. Repairs to the facility not related to safety; 2. Large scale decontamination 3. Waste disposal; and 4. Long term medical management	*)

*) Occupational exposure guidance (50 mSv in a single year)

**SEMINAR NASIONAL
KESELAMATAN,
KESEHATAN DAN
LINGKUNGAN III
Depok, 29 Agustus 2007**

Gedung Pusat Studi Jepang, Kampus Universitas
Indonesia, Depok

Tema

**HARMONISASI KESELAMATAN, KESEHATAN
DAN LINGKUNGAN
IPTEK NUKLIR DAN NON NUKLIR**

Ruang Lingkup

- Rekayasa keselamatan industri, manajemen keselamatan kerja, manajemen keselamatan proses industri, proteksi radiasi dan standardisasi radionuklida
- Hygiene industri, toksikologi industri, ergonomic, epidemiologi, fisika medik, efek radiasi, biomedika nuklir, iptek nuklir dalam bidang kesehatan.
 - Radioekologi, pengelolaan limbah industri (TENORM dan B3), pengelolaan lingkungan (industri nuklir, industri non nuklir dan rumah sakit), radiasi dan radioaktivitas lingkungan

Pembicara utama:

- Menteri Negara Lingkungan Hidup
- Kepala Badan tenaga Nuklir Nasional
- Nagoya University, Japan (Prof. Dr. Takao Iida)

Pendaftaran & Akomodasi:

- Makalah lengkap sudah diterima Panitia paling lambat 31 Juli 2007 dalam bentuk hard copy (rangkap 2) dan soft copy (disket/cd)
- Biaya pendaftaran dapat ditransfer melalui rekening Bank BNI Cab. Fatmawati No. 5177789 atas nama Helfi Yuliati atau langsung pada saat pendaftaran dengan rincian :
Swasta/BUMN (Rp. 400.000,-), Instansi Pemerintah (Rp. 300.000,-) dan Mahasiswa (Rp. 150.000,-).
- Setiap peserta akan menerima : seminar kit, sertifikat, cd prosiding, dua kali kudapan dan lunch seminar.

- Panitia akan membantu peserta yang membutuhkan Guest House di dekat lokasi seminar.

Sekretariat & Informasi :

Pustek Keselamatan dan Metrologi Radiasi (PTKMR)
Kawasan PPTN Pasar Jumat, Jl. Cinere Jakarta Selatan
Kotak Pos 7043 JKSKL, Jakarta 12070
Telp. (021) 7513906 (hunting), Fax. : (021) 7657950,
e-mail : ptkmr@batan.go.id
Kontak Person : Drs. Abdul Wa'id (HP. 0813 1636566)
dan Setyo Rini, SE (HP. 0812 8320629)

FORMULIR PENDAFTARAN

**SEMINAR NASIONAL, KESELAMATAN
KESEHATAN DAN LINGKUNGAN III**

Nama :
Institusi :
Alamat :
Telp./HP :
Fax :
Email :
Alamat Korespondensi :

Dengan ini saya bermaksud mengikuti seminar,
sebagai :

- Peserta Umum/Pemerhati
- Penyaji Makalah, dengan judul sebagai berikut (abstrak terlampir

Bidang Bahasan :

- Keselamatan
- Kesehatan
- Lingkungan

Jakarta,2007

(.....)

Catatan : Formulir dapat di Photo Copy

Diselenggarakan oleh :

Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi

Bekerja sama dengan :

Fakultas Kesehatan Masyarakat Universitas Indonesia, Pusat Sarana Pengendalian Dampak Lingkungan,
Badan Litbang Kesehatan DEPKES dan Badan Pengawas Tenaga Nuklir

PROGRAM PEMANTAUAN RADIASI BAGI PEKERJA TAMBANG

Mukhlis Akhadi

Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi – BATAN

- Jalan Cinere Pasar Jumat, Jakarta – 12440
- PO Box 7043 JKSKL, Jakarta – 12070

PENDAHULUAN

Sektor pertambangan memiliki andil yang cukup signifikan sebagai sumber devisa bagi negara dan sangat bermanfaat untuk kelangsungan program pembangunan nasional. Sebuah kajian mengenai industri pertambangan pernah dilakukan oleh Lembaga Penyelidikan Ekonomi dan Masyarakat Fakultas Ekonomi Universitas Indonesia (LPEM-FEUI) terhadap tiga perusahaan pertambangan, yaitu PT Kaltim Prima Coal (KPC) yang bergerak dalam pertambangan batubara, PT INCO untuk tambang nikel dan PT Freeport Indonesia (FI) untuk tambang tembaga. Perusahaan tambang PT KPC yang beroperasi di Kalimantan Timur memberikan kontribusi sebesar 4,7 persen dari pendapatan domestik regional bruto (PDRB) propinsi itu dan menciptakan lapangan pekerjaan bagi 72.000 orang. Kontribusi PT INCO terhadap PDRB Propinsi Sulawesi Selatan sebesar 12 persen dan menciptakan lapangan pekerjaan bagi 170.000 orang. Kontribusi PT FI terhadap PDRB Propinsi Papua pada tahun 1995-2000 rata-rata 62 persen dan membuka kesempatan kerja kepada 360.000 orang secara nasional.

Di balik besarnya peran sektor industri pertambangan dalam pembangunan nasional dan penciptaan lapangan kerja tadi, ada satu hal yang belum mendapatkan perhatian serius berkaitan dengan masalah keselamatan para pekerja tambang. Peran sebagai andalan sumber devisa tersebut menjadi kurang berarti manakala aktivitas pertambangan meminta banyak korban jiwa. Suatu kecelakaan bukan saja merugikan

karyawan itu sendiri, tetapi juga pada keluarga korban dan kerugian-kerugian pada perusahaan, seperti pengeluaran biaya kecelakaan, kerusakan peralatan, fasilitas produksi, terhambatnya aktivitas produksi, kerusakan lingkungan dan sebagainya.

Industri pertambangan memiliki ciri-ciri spesifik, baik mengenai tempat dilakukannya aktivitas, potensi kecelakaan para pekerjanya, serta perhatian mengenai keselamatan kerja dan ergonominya. Suatu aktivitas pertambangan biasanya dilakukan di bawah tanah, di tempat-tempat dengan ketinggian tertentu, atau di anjungan lepas pantai, yang memiliki potensi bahaya lebih spesifik dibandingkan aktivitas lainnya. Lokasi kerja dan jenis mineral yang ditambang sangat menentukan jenis dan tingkat potensi bahayanya. Potensi bahaya dari industri pertambangan besi, emas, minyak, serta mineral-mineral lainnya pada umumnya berbeda-beda, meskipun seringkali ada juga kesamaannya karena ditemuinya bahan-bahan beracun yang jenisnya sama. Dilihat ruang lingkup kegiatannya, aktivitas pertambangan dimulai sejak eksplorasi, diteruskan ke eksploitasi, pengolahan hasil tambang hingga ke penggunaannya. Semua tahapan itu memerlukan adanya pelayanan keselamatan dan kesehatan kerja, sehingga potensi kecelakaan kerja yang mungkin terjadi dapat diperkecil atau dihilangkan.

Secara umum sudah diketahui bahwa aktivitas pertambangan memiliki potensi kecelakaan yang paling tinggi dibandingkan

aktivitas lainnya. Potensi kecelakaan itu dapat berasal dari peralatan mekanik yang digunakan dalam kegiatan pertambangan, ledakan bahan kimia, tertimbun tanah longsor karena pelapukan batuan di kawasan pertambangan, menghisap gas-gas beracun, serta risiko radiologis dari radiasi yang dipancarkan oleh radionuklida alamiah yang kadarnya seringkali jauh lebih tinggi dibandingkan dengan lingkungan normal. Risiko jatuh dapat terjadi karena sebagian besar pekerjaan dilakukan dengan menaiki atau menuruni sistim tangga di dalam lubang dengan pencahayaan yang minim. Pekerja tambang juga memiliki risiko kejatuhan benda-benda keras karena kurang baiknya sistim atap gua tambang. Runtuhnya atap atau dinding gua biasanya terjadi sebagai akibat dari sistim penopang dinding atau atap yang kurang sempurna konstruksinya atau karena tambang telah berumur tua. Ledakan-ledakan dapat terjadi di lokasi pertambangan karena meledaknya gas metan atau debu arang batu halus. Potensi bahaya yang ada di tambang bawah tanah jauh lebih besar dari pada potensi bahaya yang ada di penambangan dengan sistem terbuka.

Untuk memberikan gambaran tentang beratnya medan kerja di lokasi pertambangan, berikut ini dikemukakan beberapa kasus kecelakaan dalam aktivitas pertambangan. Tanggal 14 Pebruari 2005 terjadi suatu ledakan gas di kedalaman 242 meter di bawah tanah pada sebuah tambang batubara di daerah Fuxin di Propinsi Liaoning, China timur laut, yang menewaskan sedikitnya 203 pekerja dan 13 lainnya hilang terperangkap di bawah tanah. Sedangkan sebuah ledakan gas yang terjadi di bulan Oktober 2004 menewaskan 148 pekerja tambang di Propinsi Henan, China bagian tengah. Kasus-kasus kecelakaan serupa pernah terjadi sebelumnya, seperti di lokasi tambang batubara Barakov di Sukhodolsk, Ukraina bagian timur. Musibah bermula dari terjadinya ledakan yang diikuti kebakaran pada tanggal 11 Maret 2000. Sebanyak 80 pekerja tambang tewas terkubur di kedalaman 700 meter di bawah tanah. Musibah serupa juga pernah terjadi di negeri itu pada tahun

sebelumnya yang mengakibatkan tewasnya 70 pekerja tambang. Sedang pada tahun 1996, musibah yang sama menewaskan 39 pekerja.

Risiko kecelakaan tambang yang selama ini mendapatkan perhatian serius barulah sebatas kecelakaan fisik dan kimia. Sebetulnya masih ada risiko lain bagi pekerja, yaitu risiko radiologis berupa penyinaran radiasi dari sumber radionuklida alamiah. Untuk jenis risiko yang terakhir ini umumnya belum mendapatkan perhatian yang serius, meski resiko itu tidak kalah bahayanya dibandingkan risiko lainnya. Tulisan ini akan membahas lebih lanjut kegiatan proteksi radiasi yang seharusnya ada dalam setiap aktivitas pertambangan. Proteksi radiasi ini terutama ditujukan untuk meningkatkan keselamatan radiologis baik bagi pekerja maupun lingkungan di sekitar lokasi pertambangan.

RADIONUKLIDA ALAMIAH

Ditinjau dari proses terbentuknya, unsur-unsur radioaktif atau radionuklida yang ada di lingkungan ini dapat dikelompokkan ke dalam dua golongan besar, yaitu radionuklida alam dan radionuklida buatan. Dikatakan sebagai radionuklida alam karena bahan itu sudah ada semenjak alam ini lahir. Radionuklida alam dapat berperan sebagai sumber radiasi alamiah bagi lingkungan. Sumber-sumber radiasi alam yang berada di permukaan bumi ini seringkali disebut juga radionuklida primordial. Bahan radioaktif ini dapat ditemukan dalam lapisan tanah atau batuan, air serta udara. Unsur-unsur yang termasuk kelompok radionuklida alam ini jumlahnya sangat banyak. Dari sekian banyak radionuklida alam tersebut, ada beberapa kelompok yang tergolong sangat tua karena waktu paro induknya di atas 100 juta tahun.

Radionuklida alam yang pertama kali dikenal manusia adalah uranium. Unsur ini bukan merupakan logam yang jarang karena keberadaannya di alam mencapai 50 kali lebih banyak dibandingkan dengan air raksa yang sudah sejak lama dikenal orang. Uranium

terdapat sebagai mineral dalam kerak bumi, juga dalam air laut, air sungai, minyak bumi, batu bara dan lain-lain. Peristiwa-peristiwa alam dan proses geologi telah membentuk uranium sebagai mineral. Mineral uranium terdapat dalam kerak bumi pada hampir semua jenis batuan, terutama batuan asam seperti granit, dengan kadar 3-4 gram dalam satu ton batuan. Ada tiga jenis isotop uranium yang dapat ditemukan di alam, yaitu : ^{235}U dengan kadar 0,715 %, ^{238}U dengan kadar 99,825 % dan ^{234}U dengan kadar yang sangat kecil (sekitar 5×10^{-3} %). Pada masa Kriптоzoik, zaman geologi Pra Kambrium yang terjadi pada 3900 juta tahun yang lalu, mineral uranium telah terbentuk. Bersamaan dengan terbentuknya uranium, terbentuk juga radionuklida lainnya seperti thorium, actinium, kalium serta unsur-unsur lainnya.

Radionuklida alam selalu meluruh menghasilkan radionuklida baru yang disebut radionuklida anak. Radionuklida anak ini juga dapat meluruh dan menghasilkan radionuklida lainnya, sehingga membentuk suatu deret peluruhan yang sangat panjang. Deret peluruhan dari radionuklida alam ini dapat dibagi menjadi 3 kelompok, yaitu :

- Deret uranium (U), dimulai dari ^{238}U dan berakhir pada timah hitam (^{206}Pb) yang stabil.
- Deret thorium (Th), mulai dari ^{232}Th dan berakhir pada ^{208}Pb yang stabil.
- Deret aktinium, mulai dari ^{235}U dan berakhir pada ^{207}Pb yang stabil.

Ketiga deret radionuklida alam tersebut mempunyai karakteristik umum sebagai berikut :

- Radionuklida induk (radionuklida anggota pertama) pada masing-masing deret mempunyai waktu paruh yang sangat panjang, yang dapat dinyatakan dalam *satuan waktu geologi*. Dalam deret uranium, radionuklida induknya ^{238}U dengan $T_{1/2} = 4,5 \times 10^9$ tahun. Dalam deret thorium, radionuklida induknya ^{232}Th dengan $T_{1/2} = 1,39 \times 10^{10}$ tahun. Dalam deret aktinium, radionuklida induknya ^{235}U dengan $T_{1/2} = 7,10 \times 10^8$ tahun.

- Masing-masing deret mempunyai anak luruh radionuklida berbentuk gas dan radionuklida gas pada masing-masing deret itu adalah isotop yang berbeda dari gas radon. Dalam deret uranium, gas yang terbentuk adalah ^{222}Rn (^{222}Em) yang disebut radon (Rn), dalam deret thorium gas yang terbentuk adalah ^{220}Rn (^{220}Em) yang disebut thoron (Tn) dan dalam deret aktinium gas yang terbentuk adalah ^{219}Rn (^{219}Em) yang disebut actinon (An).
- Produk akhir dari ketiga deret radioaktif alam adalah isotop timbal (Pb) yang stabil. Dalam deret uranium, produk akhirnya ^{206}Pb , dalam deret thorium ^{208}Pb dan dalam deret aktinium ^{207}Pb .

Keberadaan radiasi alam sangat menarik perhatian dari sudut pandang proteksi radiasi karena dampak radiasi itu terhadap kesehatan manusia. Komisi Internasional untuk Perlindungan Radiologis (ICRP) membagi efek radiasi pengion terhadap tubuh manusia menjadi dua, yaitu efek stokastik (*stochastic effect*) dan efek deterministik (*deterministic effect*). Efek stokastik adalah efek yang kemunculannya pada individu tidak bisa dipastikan tetapi tingkat kebolehjadian munculnya efek tersebut dapat diperkirakan berdasarkan data statistik yang ada. Efek ini berkaitan dengan penerimaan radiasi dosis rendah oleh tubuh manusia. Sedang efek deterministik adalah efek yang pasti muncul apabila jaringan tubuh manusia terkena paparan radiasi pengion dengan dosis tertentu. Efek ini berkaitan dengan penerimaan radiasi dosis tinggi oleh tubuh manusia.

Efek stokastik paparan radiasi dosis rendah dapat muncul pada tubuh manusia dalam bentuk kanker (kerusakan somatik) atau cacat pada keturunan (kerusakan genetik). Dalam efek stokastik tidak dikenal adanya dosis ambang. Jadi sekecil apapun dosis radiasi yang diterima tubuh ada kemungkinannya akan menimbulkan kerusakan sel somatik maupun sel genetik. Pemunculan efek stokastik berlangsung lama setelah terjadinya penyinaran dan hanya dialami

oleh beberapa orang diantara anggota kelompok yang menerima penyinaran. Efek stokastik ini akan muncul pada beberapa anggota kelompok tersebut secara acak. Tinggi rendahnya dosis yang diterima kelompok tidak mempengaruhi keparahan efek stokastik yang muncul (baik somatik maupun genetik), melainkan hanya berpengaruh pada frekuensi kejadian efek tertentu dalam suatu kelompok yang terkena penyinaran.

Radiasi yang dipancarkan oleh berbagai jenis radionuklida alamiah yang terdapat dalam bahan-bahan tambang memiliki potensi untuk memberikan penyinaran bagi tubuh manusia yang dapat memunculkan efek tidak menguntungkan terhadap kesehatan. Mengingat kadar radionuklida alamiah di daerah pertambangan relatif lebih tinggi dibandingkan dengan tempat-tempat umum lainnya, maka tingkat penyinaran radiasi di lokasi pertambangan juga lebih tinggi dibandingkan tempat-tempat umum lainnya. Oleh sebab itu, diperlukan adanya program pemantauan radiasi khusus bagi para pekerja tambang. Program pemantauan radiasi itu harus mencakup kegiatan pemantauan radiasi eksternal di kawasan pertambangan, maupun pemantauan radiasi internal bagi pekerja tambang.

PEMANTAUAN RADIASI EKSTERNAL

Radionuklida alamiah banyak ditemukan pada bahan-bahan galian tambang. Hampir semua jenis bahan tambang mengandung radionuklida alam dengan kadar yang cukup tinggi. Semula, radionuklida alam itu terikat kuat dalam matrik bahan tambang. Kegiatan penambangan dapat melepaskan radionuklida itu dari matrik sehingga terlepas dan terlarut dalam udara. Oleh sebab itu, kadar radionuklida alamiah dalam udara di kawasan pertambangan umumnya lebih tinggi dibandingkan dengan kadarnya di dalam udara normal.

Mengingat umur paro radionuklida alamiah yang terkandung di dalam bahan tambang berorde milyaran tahun, maka keberadaan radionuklida ini di lingkungan akan berperan sebagai sumber

radiasi lingkungan dalam waktu yang sangat panjang. Tersebaranya radionuklida alamiah di kawasan pertambangan ini tentu akan menaikkan tingkat radiasi alam di lingkungan yang pada akhirnya akan menaikkan tingkat penyinaran radiasi terhadap para pekerja tambang.

Pemantauan radiasi lingkungan memegang peranan yang sangat penting dalam usaha meningkatkan keselamatan pekerja tambang dan memperbaiki serta menyempurnakan prosedur kerja yang digunakan. Agar pemantauan ini dapat berjalan dengan baik, efektif dan ekonomis, maka perlu disusun program pemantauan radiasi lingkungan secara rutin dan berkelanjutan disesuaikan dengan jenis kegiatan dan potensi bahaya radiasi pada masing-masing daerah kerja. Pemantauan radiasi perlu dilakukan pada beberapa tempat secara menyeluruh, terutama daerah dimana pekerja tambang biasanya melakukan kegiatan penambangan.

Pemantauan radiasi pada prinsipnya adalah kegiatan pengukuran tingkat radiasi di daerah kerja, biasanya dinyatakan dalam laju dosis radiasi per satuan waktu, misal dalam mrem/jam, $\mu\text{Sv}/\text{jam}$ dan sebagainya. Dalam kegiatan ini digunakan alat ukur radiasi atau lebih sering dikenal dengan surveymeter radiasi. Surveymeter beta-gamma merupakan alat ukur portabel untuk pemantauan radiasi lapangan yang umumnya memberikan data hasil pengukuran berupa laju paparan dengan satuan mR/jam. Sebagian besar surveymeter yang ada saat ini dirancang mampu mendeteksi sinar-X/gamma maupun beta. Apabila hasil pemantauan tingkat radiasi eksternal di lokasi pertambangan menunjukkan angka yang cukup signifikan ditinjau dari aspek proteksi radiasi, maka data hasil pemantauan itu dapat dipakai sebagai dasar untuk memutuskan perlu tidaknya melengkapi pekerja tambang dengan pemantauan dosis perorangan.

POTENSI PENYINARAN INTERNAL

Radionuklida alam dalam bentuk gas, aerosol maupun debu yang terlarut dalam udara

di daerah kegiatan pertambangan mempunyai potensi untuk terhirup masuk ke dalam tubuh pekerja tambang, sehingga dapat berperan sebagai sumber radiasi internal bagi tubuh manusia. Radionuklida alam dalam jumlah yang sangat kecil sekalipun, yang jika dilihat dari sudut bahaya eksternalnya dapat diabaikan, dapat memberikan penyinaran internal dengan nilai dosis yang sangat besar pada organ tubuh di mana radionuklida itu mengendap. Penyinaran dari sumber internal ini perlu mendapatkan perhatian yang serius karena potensi bahaya yang dapat ditimbulkannya terhadap kesehatan tubuh manusia cukup besar.

Pada permulaan Perang Dunia I sampai kira-kira tahun 1930, banyak ditemukan penderita gangguan kesehatan akibat penyinaran radiasi internal dari pengobatan dengan sumber radioaktif radium. Gangguan serupa ditemukan pula pada para ahli kimia radium dan para pengecat jarum jam radium yang mengoles (meruncingkan) ujung kuasanya dengan mulut. Mereka banyak mengalami penderitaan aplastik anemia, tumor pada paranasal sinus dan Osteomyelitis pada gigi serta struktur tulang lainnya. Di antara mereka ada pula yang mengalami kematian karena menderita sarkoma osteotik.

Proteksi terhadap sumber radiasi internal berkaitan dengan upaya pencegahan atau memperkecil jumlah pemasukan radionuklida ke dalam tubuh manusia. Kriteria dari pengendalian bahaya radiasi internal ini adalah membatasi jumlah penerimaan dosis radiasi oleh organ tubuh yang dipandang vital bagi kelanjutan hidup manusia hingga pada batas serendah mungkin dan dipandang aman dari sudut kesehatan.

Radionuklida alam dalam bahan tambang dapat masuk ke dalam tubuh pekerja tambang melalui jalur pernafasan, pencernaan dan penyerapan langsung melalui kulit yang terluka. Apabila terjadi pemasukan radionuklida ke dalam tubuh manusia, maka radionuklida tersebut dapat mengendap pada organ kritis tertentu sehingga akan memberikan energi radiasinya pada organ

yang mengikatnya. Proses penyinaran ini dapat berlangsung terus-menerus selama radionuklida masih ada di dalam organ. Sebagai konsekuensinya, orang yang terkena kontaminasi internal akan terus menerus mengalami penyinaran internal meskipun orang tersebut telah meninggalkan tempat yang menyebabkan terjadinya kontaminasi.

Berbeda dengan penyinaran dari sumber eksternal (radionuklida berada di luar tubuh), dimana penerimaan dosisnya akan berakhir jika orang tersebut meninggalkan sumber radiasi atau sumber radiasinya dihilangkan/disingkirkan. Proses penyinaran oleh sumber internal dapat berlangsung dalam waktu beberapa tahun terus-menerus, atau hanya beberapa saat saja, bergantung pada jenis radionuklida yang terikat, organ kritis yang mengikatnya, proses metabolisme serta laju peluruhan sehingga sumber internal itu habis atau terlepas dari organ dan dikeluarkan dari dalam tubuh.

Diantara sekian banyak sumber-sumber radiasi alam, radon merupakan sumber radiasi alam yang paling banyak mendapatkan perhatian sehubungan dengan efek merugikan yang dapat ditimbulkannya. Efek merugikan tersebut berkaitan dengan kesehatan tubuh manusia, yaitu dicurigainya gas radon sebagai salah satu penyebab timbulnya kanker paru-paru. Radon merupakan gas mulia yang sudah sejak lama dikenal. Radon merupakan unsur kimia dengan nomor atom 86 dan diberi lambang Rn. Disebut gas mulia karena unsur ini tidak dapat bereaksi dengan unsur-unsur kimia lainnya. Pada temperatur ruang, radon merupakan gas yang tidak berwarna dengan kerapatan 10 gr/liter. Unsur radioaktif ini selalu berada dalam bentuk gas dan terlarut dalam udara, namun keberadaannya di lingkungan tidak dapat dikenali secara langsung oleh sistim panca indera manusia.

Gas radon dapat membentuk tiga macam isotop, yaitu radon-219 (^{219}Rn), radon-220 (^{220}Rn) dan radon 222 (^{222}Rn). Namun dalam kaitannya dengan sumber radiasi alamiah bagi

manusia, hanya ^{222}Rn beserta anak luruhnya saja yang mendapatkan perhatian serius. Peluruhan radionuklida induk ^{235}U menghasilkan anak luruh ^{219}Rn yang juga dikenal sebagai actinon. Isotop radon ini seringkali diabaikan keberadaannya karena dua alasan utama, pertama karena waktu paro ($T_{1/2}$) nya sangat pendek, yaitu hanya 4 detik, dan kedua adalah kelimpahan radionuklida induk (^{235}U) di alam sangat kecil dibandingkan radionuklida induk ^{238}U yang menurunkan ^{222}Rn . Hampir semua ^{219}Rn meluruh sebelum dapat melepaskan diri dari matrik pengikat radionuklida induknya.

Peluruhan ^{232}Th menghasilkan anak luruh ^{220}Rn yang juga dikenal sebagai thoron. Kelimpahan ^{232}Th dalam bahan tambang seringkali lebih tinggi dibandingkan ^{238}U , namun karena $T_{1/2}$ ^{232}Th (14,1 milyar tahun) lebih panjang dibanding $T_{1/2}$ ^{238}U (4,5 milyar tahun), maka laju produksi ^{220}Rn relatif sama dengan ^{222}Rn . Karena $T_{1/2}$ ^{220}Rn hanya 55 detik, maka ^{220}Rn akan meluruh saat masih berada dalam matrik bahan tambang yang mengikat ^{232}Th . Sebagai konsekuensinya, jumlah ^{220}Rn yang terlepas ke atmosfer jauh lebih kecil dibandingkan ^{222}Rn .

Meskipun perkiraan resiko kanker paru-paru akibat paparan radiasi dari gas radon sulit dilakukan, namun para peneliti umumnya setuju menggunakan nilai 1 - 2 tiap sejuta populasi per Bq/m^3 . Ini berarti bahwa jika ada sejuta orang selama satu tahun menghirup gas radon dari udara dengan kadar dalam udara $1 \text{ Bq}/\text{m}^3$, maka 1 - 2 orang diantara mereka akan meninggal karena menderita kanker paru-paru yang ditimbulkan oleh gas radon. Frekwensi munculnya kanker menjadi dua kali lebih tinggi jika kadarnya di dalam udara menjadi dua kali lipat.

Ancaman penyinaran internal bagi para pekerja tambang muncul karena tersebarinya debu-debu radioaktif di udara. Untuk itu, perlu adanya pengontrolan tingkat radioaktivitas dalam udara setempat. Tingkat radioaktivitas udara di daerah kerja biasanya dipantau menggunakan alat pantau udara kontinyu. Stasiun pengambilan

sampel udara permanen dipasang untuk menyedot debu maupun gas radioaktif dan mengikatnya dengan filter-filter untuk selanjutnya diukur tingkat radioaktivitasnya. Dengan mengetahui volume udara yang disedot, maka dari hasil pengukuran kandungan radionuklida dalam filter tadi dapat ditentukan kadar zat radioaktif di dalam udara. Selanjutnya, dengan model biokinetika tertentu, hasil pemantauan dapat pula dipakai untuk memperkirakan dosis internal dalam organ tertentu yang diterima oleh pekerja tambang.

Sistem ventilasi dan pengaturan aliran udara di dalam gua-gua di daerah pertambangan dapat mengurangi bahaya pencemaran radionuklida alam dalam udara. Suplai udara bersih dimasukkan ke dalam ruangan-ruangan bawah tanah dengan tingkat kontaminasi udara tinggi. Selanjutnya udara tersebut dihisap oleh sistim gas buang dan disalurkan ke menara pembuangan setelah mengalami penyaringan dengan filter efisiensi tinggi.

Radionuklida yang terdapat di dalam udara bisa berbentuk debu maupun gas radioaktif. Selain pemantau udara kontinyu, metode lain yang saat ini banyak digunakan adalah melalui pengambilan sampel udara dengan pompa penghisap yang dialirkan melalui kertas filter atau arang aktif atau gabungan keduanya. Metode ini cukup efektif untuk mengikat partikel maupun gas-gas radioaktif di dalam udara. Kertas filter maupun arang aktif selanjutnya dicacah untuk mengetahui aktivitas radioaktif di dalam udara.

Pemantauan kadar kontaminan radioaktif yang terdapat dalam udara di daerah pertambangan sering kali dapat dipakai untuk memperkirakan jumlah pemasukan radionuklida alam ke dalam tubuh pekerja. Namun untuk beberapa kondisi kerja tertentu, pemantauan dosis radiasi internal terhadap para pekerja tambang masih tetap diperlukan. Jenis maupun metode pemantauan dosis internal yang akan dilakukan bergantung pada jenis radionuklida yang diperkirakan mengendap di dalam tubuh.

Pemantauan dosis internal dilakukan terhadap para pekerja tambang yang mempunyai potensi kemasukan radionuklida ke dalam tubuhnya. Tujuan utama dari pemantauan dosis internal ini adalah :

- Melakukan pemantauan dan identifikasi jenis radionuklida yang mengendap di dalam tubuh pekerja tambang.
- Memperkirakan jumlah kontaminan yang ada dalam kaitannya dengan batasan yang dapat diterima tubuh.
- Dalam hal terjadi kontaminasi internal dalam jumlah yang cukup berarti, pemantauan dosis internal dapat dipakai untuk memperkirakan dosis radiasi yang diterima tubuh atau organ-organ tertentu di dalam tubuh. Namun kegiatan ini sering kali sulit dilakukan dalam praktek jika asal dan waktu berlangsungnya proses pemasukan radionuklida tidak diketahui secara pasti.

TEKNIK-TEKNIK PEMANTAUAN RADIASI INTERNAL

Program pemantauan radiasi internal dapat dilakukan dengan beberapa cara, antara lain dengan teknik pemeriksaan langsung menggunakan alat pemecah radiasi seluruh tubuh (*whole body counter, WBC*), pemeriksaan/pengambilan sampel biologis dari dalam tubuh seperti urine, faeces dan darah yang dikenal dengan istilah *bio-assay*, maupun menggunakan teknik pencacahan langsung terhadap organ-organ tertentu seperti pencacahan kelenjar gondok dan paru-paru. Berikut ini dikemukakan beberapa teknik yang bisa dimanfaatkan untuk pelayanan pemantauan dosis radiasi internal bagi pekerja tambang.

1. Pencacah Radiasi Seluruh Tubuh

Pengendapan zat radioaktif di dalam tubuh ada kalanya dapat diukur langsung dari luar tubuh menggunakan alat cacah radiasi seluruh tubuh. Namun pencacahan langsung ini hanya efektif untuk pemeriksaan zat-zat radioaktif pemancar

sinar-X maupun gamma dan juga pemancar- β murni yang mempunyai energi- β cukup tinggi untuk menghasilkan spektrum Bremmstrahlung dalam organ-organ di dalam tubuh. Pengukuran dari luar tubuh dimungkinkan mengingat daya tembus radiasi ini terhadap jaringan lunak tubuh manusia cukup kuat. Radiasi jenis foton yang dipancarkan zat radioaktif dapat diukur menggunakan pencacah sintilasi sodium-iodine (NaI) berukuran besar.

Pencacah seluruh tubuh digunakan untuk memantau dan mengukur jumlah total radionuklida yang ada di dalam tubuh. Kesulitan dapat muncul dalam kegiatan ini karena ukuran tubuh manusia cukup besar untuk dicacah dengan detektor radiasi, juga karena radionuklida yang dicacah tidak terdistribusi secara merata di seluruh tubuh. Secara umum, identifikasi adanya radionuklida pemancar foton di dalam tubuh dapat dilakukan dengan cara menampilkan spektrum- γ tersebut melalui sistem penganalisa saluran ganda (*multi channel analyzer, MCA*). Oleh sebab itu, detektor radiasi untuk pencacah seluruh tubuh ini harus memiliki resolusi (daya pisah) spektrum- γ yang baik serta efisiensi deteksi yang tinggi terhadap foton. Detektor sintilasi NaI(Tl) ternyata dapat memenuhi kedua syarat tersebut.

Selama proses pengukuran radiasi, akan ada sejumlah radiasi latar eksternal yang tercacah oleh detektor. Radiasi latar itu dapat berasal dari radiasi kosmis, kalium-40 (^{40}K), uranium dan thorium beserta anak luruhnya (termasuk ^{226}Ra) dalam batuan serta material bangunan, dan gas radon beserta anak luruhnya yang terdapat dalam udara. Untuk mengidentifikasi radionuklida dengan aktivitas sangat rendah yang berada di dalam tubuh, radiasi dari sumber-sumber latar tersebut harus ditekan pada tingkat serendah mungkin.

Pemilihan secara hati-hati terhadap bahan yang digunakan untuk pembuatan kristal detektor dan wadahnya dapat mengurangi tingkat radiasi latar dari detektor itu sendiri. Kontribusi spektrum- γ dari sumber-sumber latar eksternal

dapat dikurangi dengan cara menempatkan alat cacah radiasi dalam ruangan berperisai radiasi dengan ketebalan yang memadai. Perisai radiasi tidak boleh berada terlalu dekat dengan detektor atau subyek yang akan diukur radiasinya. Hal ini dimaksudkan untuk menghindari terjadinya hamburan balik radiasi- γ dari subyek. Jika radiasi hamburan balik itu muncul, maka akan terjadi peningkatan dalam spektrum- γ pada daerah energi rendah.

Berbagai jenis bahan perisai beraktivitas radionuklida latar sangat rendah telah digunakan, mulai dari balok-balok timbal sampai dengan batuan kapur yang dipilih secara khusus. Meskipun demikian, baja dengan ukuran sangat besar lebih sering dipakai sebagai perisai radiasi karena kandungan radioaktif alamnya sangat rendah serta murah dan mudah dalam pembuatannya. Kombinasi penggunaan perisai radiasi yang terdiri atas dinding baja di sebelah luar dengan lapisan timbal di sebelah dalamnya untuk mengurangi hamburan balik radiasi berenergi rendah memberikan keuntungan tersendiri. Untuk mencegah anak luruh gas radon dalam udara masuk ke dalam ruang pencacahan, maka suplai udara untuk ruang pencacahan harus terlebih dahulu dilewatkan melalui penyaring absolut.

2. Pencacahan Organ

Untuk kondisi tertentu, pencacahan terhadap organ-organ khusus dapat juga dilakukan. Pencacahan organ ini dimaksudkan sebagai tindak lanjut atas hasil yang diperoleh dari pencacahan seluruh tubuh. Sebagai contoh untuk organ-organ khusus ini adalah pencacahan kelenjar gondok dan paru-paru. Pencacahan ini dilakukan dengan detektor gamma NaI(Tl) dengan ukuran lebih kecil yang ditempatkan bersentuhan langsung dengan leher, berdekatan dengan lokasi kelenjar gondok. Pencacahan ini dapat dilakukan di ruangan yang tidak berperisai radiasi. Apabila detektor NaI(Tl) dikalibrasi dengan berbagai macam radioisotop dengan bentuk geometri yang sama dengan ukuran organ

yang akan dicacah, maka akan diperoleh efisiensi detektor pada berbagai energi- γ yang dipancarkan radioisotop. Dalam proses pengukuran, detektor NaI(Tl) dihubungkan dengan sistem analisa saluran ganda sehingga pada layar analisa akan ditampilkan berbagai puncak spektrum radiasi- γ dari berbagai macam radioisotop. Dengan menganalisa tinggi spektrum beserta letak munculnya spektrum tersebut dapat diidentifikasi aktivitas dan energi dari spektrum- γ yang bersangkutan. Dari identifikasi ini dapat diketahui jenis serta aktivitas radioisotop yang mengendap di dalam organ yang dicacah. Perhitungan dosis internal yang diterima organ dapat dilakukan dengan cara membandingkan aktivitas yang terukur dengan nilai batas masukan tahunan (BMT) untuk radioisotop bersangkutan.

Pencacahan paru-paru sering dilakukan terhadap personil pekerja radiasi yang menangani senyawa uranium kering maupun berbentuk gas, dimana selama proses penanganan tersebut pekerja mempunyai potensi kemasukan radionuklida melalui proses penghirupan. Dalam proses pencacahan paru-paru ini pekerja yang diperiksa dicacah menggunakan detektor NaI(Tl) berukuran besar dalam keadaan tidur terlentang. Detektor ditempatkan pada posisi pusat tepat di atas daerah paru-paru.

3. Pengambilan Sampel dari Dalam Tubuh

Radionuklida pemancar sinar- α maupun - β tidak dapat diukur secara langsung dari luar tubuh karena energi dari kedua jenis radiasi itu akan terserap seluruhnya oleh jaringan atau organ yang mengikatnya. Radionuklida pemancar sinar- α maupun - β hanya dapat dipantau melalui ekskresi, seperti pemantauan melalui faeces untuk jenis radionuklida yang tidak larut, pemantauan melalui urine untuk radionuklida yang dapat larut, pemantauan melalui udara pernafasan untuk radionuklida berbentuk gas maupun uap dan sebagainya. Pemeriksaan dengan teknik pengambilan sampel dari dalam tubuh ini dilakukan dengan cara menganalisa bahan-bahan

yang keluar atau diambil dari tubuh, seperti urine, faeces, udara pernafasan, darah dan sebagainya. Dengan proses kimia yang sesuai, teknik pengambilan sampel ini mampu mengidentifikasi berbagai jenis radionuklida yang mengendap di dalam tubuh pekerja radiasi.

Pengukuran radionuklida yang dikeluarkan oleh tubuh melalui ekskreta dapat dipakai sebagai indikator biologis tentang kemungkinan terjadinya kontaminasi interna. Karena metode pengambilan sampelnya cukup sederhana, maka kegiatan ini sering kali dilakukan secara rutin dalam kaitannya dengan program pemantauan dosis interna perorangan. Pencacahan urine misalnya, dapat dipakai untuk mengetahui kadar tritium di dalam tubuh para pekerja di reaktor nuklir, dapat pula dipakai untuk mengetahui jumlah pengendapan uranium di dalam tubuh pekerja yang berhubungan dengan uranium, seperti pekerja di penambangan, pengolahan, pengayaan, pabrikasi uranium dan olah ulang bahan bakar bekas. Pengukuran uranium dalam urine dilakukan dengan teknik fluorometri. Berbeda dengan tritium yang tersebar merata di dalam tubuh, kadar uranium di dalam urine sulit untuk dihubungkan dengan kandungan totalnya di dalam tubuh karena distribusi uranium dalam tubuh sangat bergantung pada jenis senyawa, kelarutan dan waktu pemasukannya.

PENUTUP

Ada risiko radiologis yang dihadapi oleh setiap pekerja tambang pada saat melakukan aktivitas pertambangan. Risiko radiologis muncul karena adanya radionuklida-radionuklida alamiah dengan kadar yang relatif tinggi pada hampir setiap bahan tambang. Pada saat dilakukan kegiatan pertambangan, radionuklida alamiah yang semula terikat kuat dalam matrik bahan tambang, dapat terlepas dalam bentuk debu, gas maupun aerosol yang terlarut dalam udara. Oleh sebab itu, tingkat radioaktivitas udara di daerah pertambangan relatif lebih tinggi dibandingkan dengan udara normal.

Tingginya tingkat radioaktivitas udara di daerah pertambangan menyebabkan pekerja tambang menghadapi risiko radiologis yang perlu mendapatkan perhatian. Radionuklida alamiah itu dapat masuk ke dalam tubuh dan berperan sebagai sumber radiasi internal yang berdampak negatif bagi kesehatan pekerja tambang. Untuk mengendalikan dampak risiko radiologis yang cukup berbahaya, maka sudah sewajarnya kalau pekerja tambang mendapatkan perlindungan radiologis yang memadai. Perlindungan radiologis yang paling sederhana dan sangat diperlukan adalah pemantauan radiasi eksternal di lokasi pertambangan. Diperlukan juga adanya pemantauan radioaktivitas udara di daerah pertambangan, sehingga dapat diambil tindakan proteksi bilamana kadarnya melampaui ambang yang diperbolehkan. Perlindungan radiologis lainnya adalah adanya pemantauan dosis internal, sehingga dapat diambil tindakan proteksi bilamana seorang pekerja tambang mengalami kontaminasi internal.

DAFTAR PUSTAKA

1. Anonim, Sources and Effects of Ionizing Radiation, *UNSCEAR 2000 Reports to General Assembly (Volume 1 : Sources)*, United Nations, New York (2000).
2. Anonim, International Basic Safety Standards of Protection Against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources, *Safety Series No. 115*, IAEA, Vienna (1996).
3. Anonim, Radiation : Doses, Effects, Risks, United Nations Environment Programme, P.O. BOX 30552, Nairobi, Kenya (1985).
4. Anonim, ICRP Publication No. 60, International Commission on Radiological Protection, Bethesda, USA (1990).
5. Anonim, Radon Reduction Method, United States Environmental Protection Agency, USA (September 1987).
6. Anonim, Radon In Homes, Information Bulletin No. 13, Australian Radiation Laboratory, Lower Plenty Road, Yallambie, Victoria 3085 (june 1990).
7. Anonim, Health Effects of Exposure to Low Level of Ionizing Radiation, BEIR V, National Academy Press, Washington, DC (1990).