

KONSEP DAN APLIKASI DOSIS EFEKTIF SEBAGAI BESARAN PROTEKSI

Eri Hiswara

Bidang Keselamatan Kerja dan Dosimetri PTKMR – BATAN

- Jalan Lebak Bulus Raya No.49, Jakarta 12440
Kotak Pos 7043 JKSKL, Jakarta 12070
- e.hiswara@batan.go.id

PENDAHULUAN

Bahan nuklir, zat radioaktif dan atau sumber radiasi lainnya merupakan bahan yang banyak membawa manfaat dan berperan penting dalam upaya meningkatkan mutu hidup manusia. Selain bahan nuklir yang dapat digunakan untuk memproduksi energi listrik, berbagai zat radioaktif dan atau sumber radiasi lainnya telah dimanfaatkan di berbagai bidang terutama medik, industri dan pertanian.

Selain membawa manfaat yang sangat besar, penggunaan ketiga bahan ini (yang untuk memudahkan selanjutnya disebut hanya sebagai radiasi) memiliki efek yang berbahaya bagi kesehatan manusia. Efek kesehatan radiasi dapat berupa efek deterministik dan efek stokastik. Efek deterministik merupakan efek yang dapat terjadi pada suatu organ atau jaringan tubuh tertentu yang menerima radiasi dengan dosis tinggi, sementara efek stokastik merupakan efek akibat penerimaan radiasi dosis rendah di seluruh tubuh yang baru diderita oleh orang yang menerima dosis setelah selang waktu tertentu, atau oleh turunannya. Dengan adanya kedua jenis efek yang berbahaya ini maka setiap aplikasi radiasi harus dapat dikendalikan melalui suatu mekanisme teknologi yang dikembangkan dengan dasar fenomena yang terjadi jika radiasi berinteraksi dengan jaringan tubuh.

Upaya pemahaman tentang fenomena yang terjadi jika radiasi berinteraksi dengan jaringan tubuh ini termasuk dalam cabang ilmu pengetahuan dan teknologi (iptek) proteksi radiasi. Secara luas, iptek proteksi radiasi mencakup semua upaya pemahaman dan tindakan

yang dilakukan untuk melindungi makhluk hidup dan lingkungannya dari efek pajanan (*exposure*) radiasi.

Jika proteksi radiasi dimaksudkan sebagai upaya perlindungan yang dilakukan dengan fokus pada manusia dan lingkungannya, maka upaya perlindungan dengan fokus sumber radiasi itu sendiri disebut sebagai keselamatan radiasi. Berdasar definisinya, keselamatan radiasi adalah tindakan yang dilakukan untuk mengendalikan sumber radiasi dalam rangka memberikan perlindungan bagi makhluk hidup dan lingkungannya dari efek pajanan radiasi. Untuk keperluan praktis, kedua istilah ini sering disebut sebagai ‘proteksi dan keselamatan radiasi’, atau bahkan sering disebut hanya ‘proteksi radiasi’ walau sebenarnya yang dimaksud adalah proteksi dan keselamatan radiasi.

Dalam kaitan dengan efek kesehatan radiasi di atas, maka proteksi radiasi juga sangat berperan dalam mencegah terjadinya efek deterministik, dan mengurangi kemungkinan terjadinya efek stokastik. Rekomendasi dan pedoman praktis mengenai proteksi radiasi telah dikembangkan oleh Komisi Internasional Proteksi Radiologik (ICRP, *International Commission on Radiological Protection*) sejak tahun 1928, dan digunakan sebagai dasar oleh Badan Tenaga Atom Internasional (IAEA, *International Atomic Energy Agency*) untuk menyusun standar proteksi dan keselamatan radiasi yang diacu oleh hampir sebagian besar negara di dunia ini untuk kepentingan standar nasional negara masing-masing. Rekomendasi ICRP terakhir dalam proteksi radiasi ini diberikan pada publikasi 103,

sementara standar terakhir yang disusun IAEA yang mengacu publikasi 103 ICRP tersebut diberikan pada *Safety Standard Series GSR Part 3*.

Prinsip proteksi radiasi yang dikembangkan ICRP sejak tahun 1977 dan digunakan hingga saat ini terdiri atas tiga komponen utama, yaitu (a) pembenaran, (b) optimisasi proteksi, dan (c) pembatasan dosis. Penerapan prinsip ini memerlukan prosedur dan metode untuk kuantifikasi pajanan radiasi persion yang terjadi. Secara khusus, penerapan prinsip optimisasi dan pembatasan dosis memerlukan definisi besaran proteksi yang sesuai, termasuk satuan yang tepat untuk mengkaji besaran tersebut untuk situasi pajanan yang ada.

Dosis efektif merupakan besaran proteksi yang digunakan untuk menentukan dan mengendalikan penerimaan dosis radiasi oleh manusia, dan juga untuk menerapkan prinsip optimisasi. Dosis efektif dimaksudkan untuk digunakan pada dosis rendah untuk pengelolaan risiko efek stokastik. Besaran ini juga merupakan besaran utama dalam proteksi radiasi untuk tiga situasi pajanan radiasi yang diberikan pada publikasi 103 ICRP, yaitu situasi pajanan terencana situasi pajanan kedaruratan, dan situasi pajanan yang ada.

Dalam tulisan ini akan diuraikan secara lebih rinci mengenai konsep dan aplikasi dosis efektif ini. Selain itu dibahas pula keterbatasan aplikasi dosis efektif dalam kaitannya dengan pengkajian risiko radiasi, dan sejumlah masalah yang terkait dengan asumsi dan isu dalam konsep dosis efektif itu sendiri.

KONSEP DOSIS EFEKTIF

Besaran dosis efektif merupakan bagian dari kelompok besaran proteksi, yaitu besaran yang digunakan untuk mengkaji hubungan dosis dengan risiko kesehatan akibat penyerapan energi pada suatu organ atau jaringan. Besaran proteksi yang lain adalah dosis serap organ dan dosis tara.

Penyerapan energi pada organ atau jaringan diperkirakan oleh suatu besaran fisik yang disebut sebagai dosis serap, atau lebih khusus lagi dosis

serap rata-rata pada organ atau jaringan, D_T . Untuk dosis rendah diasumsikan bahwa nilai D_T berkorelasi dengan efek stokastik radiasi pada organ atau jaringan tersebut.

Penggunaan dosis serap rata-rata sebagai indikator peluang terjadinya efek stokastik bergantung pada kelinieran hubungan dosis-tanggapan. Hubungan ini tidak linier untuk efek deterministik, sehingga dosis serap tidak sertamerta relevan untuk efek deterministik kecuali jika dosisnya tersebar merata di seluruh jaringan atau organ.

Peluang terjadinya efek stokastik diketahui bergantung, tidak hanya pada dosis serap, namun juga pada jenis dan energi radiasi yang datang. Dosis serap dari radiasi yang berbeda akan memberikan efek biologik yang berbeda pula di dalam organ atau jaringan tubuh. Untuk memperhitungkan kedua parameter terakhir ini diperkenalkan faktor bobot radiasi, w_R . Dosis serap rata-rata dari radiasi R pada organ atau jaringan T disebut dosis tara (*equivalent dose*), H_T .

Nilai faktor bobot radiasi, w_R , diberikan oleh ICRP berdasar data radiobiologik yang tersedia dan dievaluasi dari waktu ke waktu. Nilai terakhir yang diberikan pada Publikasi 103 hanya terdiri atas tiga angka (1 untuk foton, elektron dan muon, 2 untuk proton dan pion bermuatan, dan 20 untuk partikel alfa, fragmen fisi dan ion berat), kecuali untuk neutron yang diberikan sebagai fungsi energinya.

Selanjutnya, dosis efektif, E , diberikan sebagai dosis tara yang diberi bobot sesuai dengan organ atau jaringan yang tersinar. Hal ini disebabkan oleh karena organ atau jaringan memiliki kepekaan masing-masing terhadap radiasi yang datang. Secara matematis, dosis efektif didefinisikan sebagai:

$$E = \sum_T w_T H_T = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R}$$

dengan H_T atau $w_R D_{T,R}$ adalah dosis tara pada organ atau jaringan T, dan w_T faktor bobot jaringan.

Seperti dosis tara, satuan dosis efektif

dalam SI adalah joule per kilogram (J/kg), dengan nama khusus sievert (Sv). Satuan lama untuk dosis tara adalah rem, dengan 1 Sv = 100 rem.

Tabel 1 memberikan faktor bobot radiasi yang diberikan oleh Komisi Internasional untuk Proteksi Radiologik (ICRP) pada publikasi 60 (tahun 1991) dan revisinya pada publikasi 103 (tahun 2007).

Tabel 1. Faktor bobot jaringan, w_T .

Jaringan atau organ	ICRP 60	ICRP103
Gonad	0,20	0,08
Sumlah tulang (merah), kolon, paru-paru, lambung	0,12	0,12
Payudara	0,05	0,12
Bladder, esofagus, hati, tiroid	0,05	0,04
Permukaan tulang, kulit	0,01	0,01
Otak, kelenjar ludah	-	0,01
Jaringan sisa *)	0,05	0,12
Total	1,00	1,00

*) Jaringan sisa:

ICRP 60: adrenalin, otak, usus besar, usus kecil, ginjal, otot, pankreas, limpa, *thymus*, *uterus*

ICRP 103: adrenalin, ekstratoraksik, *gall bladder*, jantung, ginjal, *lymph nodes*, otot, mukosa oral, prostat (laki), usus kecil, limpa, *thymus*, uterus/serviks (pr.)

Seperti terlihat pada Tabel 1, terjadi perubahan yang cukup signifikan pada beberapa nilai faktor bobot jaringan antara yang diberikan terakhir dengan yang diberikan sebelumnya. Berdasar data mutakhir risiko induksi kanker dan penyakit terwaris, dua jaringan baru (otak dan kelenjar ludah) dimasukkan. Nilai untuk gonad yang berkurang dari 0,20 menjadi 0,08 menandakan berkurangnya secara signifikan risiko untuk penyakit terwaris. Namun, nilai untuk payudara bertambah dari 0,05 menjadi 0,12 karena adanya temuan dari studi epidemiologik dan lebih difokuskannya insidensi kanker pada perhitungan kerusakan. Sedang jumlah jaringan sisa juga bertambah untuk menghindari penyimpangan minor dini dari penambahan dosis efektif.

Baik dosis tara pada jaringan, H_T , maupun dosis efektif, E , merupakan perjumlahan dari pajanan internal dan pajanan eksternal. Dengan demikian, dosis efektif memberikan nilai tunggal

untuk kuantifikasi pajanan untuk membandingkan dengan nilai batas dosis, penghambat dosis (*dose constraint*), dan tingkat acuan yang digunakan untuk tujuan proteksi radiasi.

Dalam prakteknya, besaran dosis efektif tidak dapat diukur langsung. Perhitungan dosis efektif dilakukan secara bertahap, dengan menggunakan fantom komputasional dan data fisiologi manusia acuan pria dan wanita. Gambar 2 memperlihatkan tahapan dalam penentuan dosis efektif ini.

Seperti terlihat pada Gambar 2, dosis serap dari masukan radionuklida atau pajanan eksternal diubah menjadi dosis tara pria (H_T^M) dan wanita (H_T^F). Dalam perhitungannya digunakan fantom komputasional Pria Acuan dan Wanita Acuan dewasa yang merupakan pencitra tomografik medik dan tersusun atas volume *pixels* (*voxels*) tiga dimensi, dan juga faktor bobot radiasi untuk masing-masing jenis radiasi yang diterima.

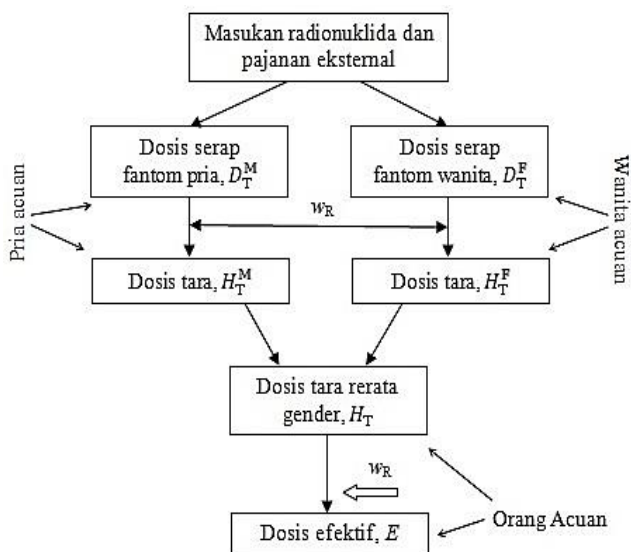
Selanjutnya, untuk tujuan proteksi radiologik, dosis efektif yang dihitung hanya memiliki satu nilai untuk kedua jenis kelamin. Dalam hal ini digunakan konsep Orang Acuan yang dosis taranya merupakan rata-rata dosis tara pria dan wanita. Dosis efektif kemudian diperoleh dengan mengalikan dosis tara Orang Acuan dengan faktor bobot jaringan yang merupakan nilai yang dirata-ratakan untuk semua usia dan kedua jenis kelamin, atau:

$$E = \sum_T w_T \left[\frac{H_T^M + H_T^F}{2} \right]$$

Fantom komputasional, atau biasa disebut pula sebagai fantom antropomorfik, digunakan untuk menghitung koefisien dosis pajanan eksternal yang menghubungkan besaran proteksi dengan besaran fisik yang mengkarakterisasikan medan radiasi. Secara praktis, besaran fisik yang biasanya dihitung atau digunakan adalah dosis serap, kerma udara dan fluens partikel. Dosis efektif, dengan demikian misalnya, dapat dihubungkan dengan fluens partikel oleh koefisien dosis.

Untuk pajanan internal, dosis efektif terikat digunakan sebagai dosis efektif dari masukan

radionuklida yang diinterasikan selama periode 50 tahun untuk pajanan kerja dan hingga usia 70 tahun untuk anggota masyarakat. Selain beberapa radionuklida berumur pendek yang memberikan dosisnya hanya dalam waktu sekitar satu tahun, banyak radionuklida yang lain dengan waktu paro panjang yang menyinari jaringan hingga beberapa tahun.

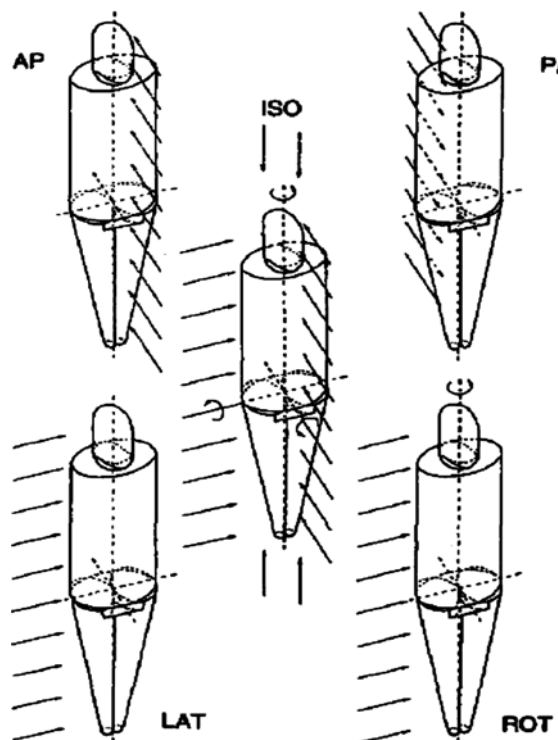


Gambar 2. Tahapan dalam penentuan dosis efektif.

Nilai koefisien dosis telah dihitung oleh ICRP dan diterbitkan dalam berbagai publikasinya. Nilai koefisien dosis berdasar publikasi 103 saat ini juga tengah disusun. Namun karena perhitungan memerlukan waktu, saat ini ICRP telah menerbitkan kompilasi nilai koefisien dosis yang dihitung berdasar data pada publikasi 60 dan diterbitkan sebelumnya dalam publikasi 68, 72 dan 74. Secara keseluruhan, nilai koefisien dosis yang diberikan adalah nilai dosis efektif per satuan pajanan untuk sumber eksternal, dosis efektif terikat per satuan masukan radionuklida melalui inhalasi atau ingesti, dan nilai dosis tara yang terkait untuk berbagai organ dan jaringan.

Gambar 3 memberikan lima geometri standar fantom anthropomorfik yang digunakan untuk perhitungan koefisien dosis pajanan eksternal dengan penjelasan sebagai berikut:

- Geometri antero-posterior (AP) – geometri penyinaran dimana radiasi pengion berkas paralel monoenergi datang pada bagian depan tubuh dengan arah orthogonal terhadap sumbu panjang tubuh.
- Geometri postero-anterior (PA) – geometri penyinaran dimana radiasi pengion berkas paralel monoenergi datang pada bagian belakang tubuh dengan arah orthogonal terhadap sumbu panjang tubuh.
- Geometri lateral – geometri penyinaran dimana radiasi pengion berkas paralel monoenergi datang pada bagian sisi tubuh dengan arah orthogonal terhadap sumbu panjang tubuh. Jika perlu lebih khusus dapat digunakan lateral kanan (dari sisi kanan ke sisi kiri tubuh) dan lateral kiri (dari sisi kiri ke sisi kanan tubuh).



Gambar 3. Geometri penyinaran fantom anthropomorfik. AP = antero-posterior, PA = postero-anterior, ISO = isotropik, LAT = lateral, dan ROT = rotasional.

- Geometri rotasional – geometri penyinaran dimana radiasi pengion berkas paralel monoenergi datang dari arah orthogonal terhadap sumbu panjang tubuh, dan berputar

dengan laju yang sama di sekitar sumbu panjang. Atau, dengan memutar tubuh pada laju yang sama di sepanjang sumbu panjangnya, sambil menyinari tubuh dengan radiasi berkas lebar dari sumber stasioner yang berada pada sumbu di sudut kanan ke sumbu panjang tubuh.

- e. Geometri isotropik—didefinisikan oleh medan radiasi yang fluens partikel monoenergi per satuan sudut padatnya tidak bergantung pada arah.

Untuk pajanan kerja dari radiasi eksternal, dosis efektif secara khusus dapat diperkirakan dengan pengukuran oleh alat ukur radiasi lapangan atau perorangan yang dikalibrasi dalam besaran operasional. Untuk pengukuran dosis radiasi eksternal perorangan, besaran operasional yang digunakan adalah dosis tara perorangan $H_p(10)$ untuk radiasi tembus kuat seperti gamma dan neutron dan $H_p(0,07)$ untuk radiasi tembus lemah seperti sinar-X rendah dan beta, sementara besaran operasional $H^*(10)$ digunakan untuk pengukuran dosis radiasi eksternal lapangan dari radiasi tembus kuat dan $H'(0,07)$ untuk pengukuran dosis eksternal lapangan dari radiasi tembus lemah.

Untuk mengkaji dosis efektif dari pajanan internal (dosis efektif terikat), masukan radionuklida dievaluasi dari data pemantauan konsentrasi radionuklida di udara atau dari data bioassay. Pengkajian dosis efektif setelah terjadinya lepasan radionuklida dan kontaminasi dalam jumlah besar juga memerlukan informasi tentang jalur lepasan, pengukuran laju dosis dan spektrometri gamma di lapangan, pengukuran konsentrasi radionuklida di permukaan, tanah, air minum dan bahan pangan beberapa kali setelah lepasan, dan penggunaan data ini ke dalam model lingkungan untuk memperkirakan pajanan radiasi pada kelompok populasi yang ada.

APLIKASI DOSIS EFEKTIF

Tujuan utama penggunaan besaran dosis efektif adalah memberikan alat untuk menunjukkan kepatuhan pada nilai batas dosis.

Dengan demikian, dosis efektif telah digunakan secara luas untuk kepentingan pengawasan pemanfaatan radiasi dan bahan nuklir di seluruh dunia.

Dosis efektif digunakan untuk membatasi peluang terjadinya efek stokastik (kanker dan efek terwaris) dan tidak dapat digunakan untuk mengkaji kemungkinan terjadinya efek deterministik. Pada rentang dosis di bawah nilai batas dosis efektif tahunan, efek deterministik diyakini tidak akan terjadi. Hanya pada beberapa kasus (seperti pajanan lokal akut pada organ tunggal dengan faktor bobot jaringan rendah seperti kulit) penggunaan nilai batas dosis tahunan tidak cukup untuk menghindari terjadinya efek deterministik. Untuk kasus ini, dosis jaringan lokal juga perlu dikaji.

Dosis efektif pekerja yang dikaji dengan perjumlahan hasil pengukuran dosis tara perorangan, $H_p(10)$, dan dosis efektif terikat yang diperkirakan dari hasil pemantauan individual pekerja, disebut sebagai dosis rekaman (*dose of record*). Dosis rekaman berlaku untuk setiap pekerja untuk tujuan rekaman, laporan, dan bukti kepatuhan pada ketentuan mengenai nilai batas dosis.

Walaupun kadang-kadang digunakan pada studi pilot untuk menyusun hipotesis efek radiasi pada kesehatan manusia, dosis efektif bukan besaran yang tepat untuk studi epidemiologi risiko radiasi. Analisis epidemiologi secara khusus memerlukan perkiraan dosis serap pada organ atau jaringan, memperhitungkan serinci mungkin keadaan saat pajanan terjadi dan karakteristik individu terpajan pada populasi yang dipelajari. Demikian pula untuk perhitungan probabilitas penyebab kanker pada individu terpajan yang diperlukan adalah dosis serap, dan bukan dosis efektif.

KRITIK TERHADAP DOSIS EFEKTIF

Meskipun telah dikembangkan ICRP sejak lama, konsep dosis efektif ini ternyata juga mendapat kritikan. Brenner, misalnya, menyatakan bahwa dosis efektif merupakan konsep ilmiah yang cacat. Beberapa asumsi dan

isu yang problematik dari dosis efektif menurut Brenner antara lain:

- a. Faktor bobot jaringan selalu berubah hampir tiap sepuluh tahun, seperti untuk gonad turun dari 0,25 pada tahun 1977 menjadi 0,08 tahun 2007, dan mortalitas kanker dipandang sebagai titik akhir (*endpoint*) karsinogenesis pada perhitungan faktor bobot tahun 1991 namun menjadi insidensi kanker pada perhitungan faktor bobot tahun 2007. Perubahan ini bukan disebabkan karena meningkatnya pengetahuan mengenai risiko radiasi, namun anggota yang baru di komite ICRP yang membahas hal ini memiliki pandangan yang berbeda mengenai titik akhir karsinogenesis yang terpenting.
- b. Dosis efektif didefinisikan sebagai tidak bergantung pada usia saat pajanan, sementara secara luas diketahui bahwa risiko radiasi sangat bergantung pada usia. Implikasi dari definisi ini adalah titik akhir karsinogenesis sama untuk semua usia; dan hal ini sangat problematik.
- c. Dosis efektif sering dikelirukan dengan dosis tara. Baik dosis tara (yang hanya untuk satu jaringan) dan dosis efektif (yang diberi bobot untuk semua jaringan) memiliki satuan yang sama, yaitu *sievert*. Hal ini bisa dilihat dari banyaknya makalah terkait CT scan yang mencampuradukkan dosis efektif dengan dosis tara ini.
- d. Penggunaan konsep dosis efektif makin sering salah. Walaupun dosis efektif dirancang untuk memberikan perbandingan antara satu medan radiasi dengan yang lain, makin banyak makalah yang menghitung dosis efektif, dan risiko kanker seumur hidup kemudian diperkirakan dari dosis efektif tersebut.

Untuk menghilangkan berbagai masalah di atas, Brenner menyarankan penggunaan konsep ‘risiko efektif’. Mirip dengan dosis efektif, risiko efektif, R , didefinisikan sebagai:

$$R = \sum_T r_T H_T$$

dengan r_T adalah risiko kanker spesifik jaringan seumur hidup per satuan dosis tara.

Konsep risiko efektif ini dikembangkan dengan memodifikasi dosis efektif dengan hanya fokus pada risiko kanker (berbeda dengan dosis efektif yang mengkombinasikan risiko kanker dan risiko pewarisan), karena yang menjadi perhatian utama dalam konteks proteksi radiasi adalah dosis rendah, dan mempertimbangkan hanya insidensi kanker sebagai titik akhir karsinogenesis, karena secara ideal titik akhir ini bukan nilai rata-rata dari insidensi kanker, mortalitas kanker dan banyaknya tahun hilangnya kehidupan, dan juga karena pada korban bom atom data insidensi kanker biasanya lebih kecil dibanding dengan data mortalitas kanker.

Brenner mengusulkan penggunaan nilai risiko insidensi kanker seumur hidup spesifik usia dan spesifik jaringan per satuan dosis tara yang diberikan oleh laporan Komite Efek Biologi Radiasi Pention (BEIR VII) dari Dewan Riset Nasional AS sebagai nilai r_T . Menurut Brenner, penggunaan risiko efektif akan sangat berguna dalam mengkuantifikasi risiko terkait dengan dosis rendah yang saat ini masih banyak diperkirakan dengan basis dosis efektif, sementara dosis efektif sendiri masih dapat digunakan untuk tujuan proteksi radiasi. Tabel 2 memberikan risiko insidensi kanker dari BEIR VII yang digunakan sebagai nilai r_T .

PEMBAHASAN

Seperi telah diuraikan sebelumnya, dosis efektif yang merupakan jumlah dosis tara jaringan yang diberi faktor bobot sesuai dengan jaringannya, dan memiliki satuan yang sama dengan dosis tara, yaitu *sievert* (Sv). Dalam komunikasi pengkajian pajanan radiasi hal ini menyebabkan terjadinya kebingungan dan kesalahpahaman, terutama jika pajanan hanya terjadi pada satu atau beberapa organ. Sebagai contoh, nilai dosis efektif pada tiroid akan lebih rendah daripada nilai dosis tara pada organ yang sama karena faktor bobot jaringannya hanya 0,04. Hal ini memberikan gambaran bahwa dosis yang

Tabel 2. Risiko insidensi kanker seumur hidup spesifik usia dan spesifik jaringan per satuan dosis tara berdasar BEIR VII.

Organ	Usia saat pajanan (tahun)										
	0	5	10	15	20	30	40	50	60	70	80
<i>Pria:</i>											
Lambung	76	65	55	46	40	28	27	25	20	14	3
Usus besar	336	285	241	204	173	125	122	113	94	65	30
Hati	61	50	43	36	30	22	21	19	14	8	3
Paru-paru	314	261	216	180	149	105	104	101	89	65	34
Prostat	93	80	67	57	48	35	35	33	26	14	5
Kandung kemih	209	177	150	127	108	79	79	76	66	47	23
Thyroid	115	76	50	33	21	9	3	1	0,3	0,1	0.0
Leukemia	237	149	120	105	96	84	84	84	82	73	48
Lain-lain	1123	672	503	394	312	198	172	140	98	57	23
<i>Wanita:</i>											
Lambung	101	85	72	61	52	36	35	32	27	19	11
Usus besar	220	187	158	134	114	82	79	73	62	45	23
Hati	28	23	20	16	14	10	10	9	7	5	2
Paru-paru	733	608	504	417	346	242	240	230	201	147	77
Payudara	1171	914	712	553	429	253	141	70	31	12	4
Rahim	50	42	36	30	26	18	16	13	9	5	2
Kandung telur	104	87	73	60	50	34	31	25	18	11	5
Kandung kemih	212	180	152	129	109	79	78	74	64	47	24
Tiroid	634	419	275	178	113	41	14	4	1	0,3	0,0
Leukemia	185	112	86	76	71	63	62	62	57	51	37
Lain-lain	1339	719	523	409	323	207	181	148	109	68	30

lebih besar akan diperlukan oleh suatu organ tunggal tertentu untuk menghasilkan kerusakan yang sama seperti dosis kecil yang diterima oleh organ dalam jumlah yang lebih banyak.

Untuk tujuan optimisasi proteksi dari kelompok individu pekerja atau populasi, ICRP telah memperkenalkan besaran dosis efektif kolektif. Besaran ini didefinisikan sebagai jumlah dosis efektif individu dari kelompok tersebut yang disinari oleh radiasi dari suatu sumber selama periode waktu tertentu. Dosis efektif kolektif ini dimaksudkan untuk tujuan prospektif dari pajanan yang direncanakan.

Dalam kerangka optimisasi proteksi ini, dosis efektif kolektif digunakan secara prospektif sebagai parameter dalam proses penentuan skenario operasi atau pekerjaan yang akan dilakukan. Dosis efektif kolektif juga dapat digunakan sebagai alat untuk membandingkan beberapa teknologi radiasi pada pemanfaatan medik dan membandingkan teknologi yang sama

pada lokasi yang berbeda, baik itu beda rumah sakit maupun beda negara.

Definisi dosis efektif kolektif di atas membawa banyak orang menggunakannya secara tidak tepat untuk menjumlahkan pajanan radiasi dalam rentang yang lebar, dalam periode waktu yang panjang, dan dalam daerah geografi yang luas, dan menghitung kerusakan radiasi dengan dasar penjumlahan ini. Secara teoritis hal ini bisa digunakan dan signifikan jika terdapat data yang cukup mengenai koefisien risiko untuk efek radiasi pada semua rentang dosis yang memberikan kontribusi pada dosis kolektif. Namun karena adanya ketidakpastian yang besar, data mengenai koefisien risiko tersebut tidak tersedia untuk rentang dosis yang sangat rendah.

Penggunaan dosis efektif untuk pengkajian risiko merupakan salah satu masalah yang dikritisi Brenner. Walau pada dasarnya dosis efektif dikembangkan untuk tujuan pemenuhan pada peraturan dan optimisasi proteksi, namun pada kenyataannya besaran ini banyak digunakan

untuk tujuan kajian dan perkiraan risiko radiasi pada dosis rendah. Hal ini dilakukan karena memang saat ini tidak ada besaran lain yang bisa digunakan untuk tujuan pengkajian risiko tersebut, sementara pengkajian risiko dibutuhkan untuk melihat seberapa besar peluang untuk terjadinya suatu akibat dari kegiatan yang melibatkan penggunaan sumber radiasi.

Namun demikian, ICRP memiliki posisi tersendiri dalam mengkaji pajanan yang diterima seorang pekerja radiasi jika nilai batas dosis dilampaui. Menurut ICRP, pengkajian semacam ini akan selalu harus memperhitungkan semua informasi yang tersedia untuk memberikan perkiraan terbaik terkait risikonya. Demikian pula perkiraan risiko untuk kelompok populasi harus didasarkan pada semua data yang ada.

Dalam hal penggunaan koefisien risiko hanya didasarkan pada insidensi kanker, seperti yang diusulkan Brenner, tampaknya merupakan hal yang tak dapat diterima. Hal ini mengabaikan perbedaan yang besar dalam laju kesembuhan perawatan dari beberapa jenis kanker. Nilai faktor bobot jaringan untuk kulit akan lebih besar dari nilai yang diberikan saat ini jika hanya memperhitungkan insidensi kanker. Perkembangan lebih lanjut dari perawatan kanker diperkirakan akan memberikan pengaruh terhadap nilai faktor bobot jaringan di masa mendatang. Berdasar kenyataan epidemiologik dan hasil percobaan bahkan saat ini tengah dikaji apakah penetapan nilai w_T tersebut perlu memperhitungkan pula efek non-kanker seperti penyakit kardiovaskuler.

KESIMPULAN

Dosis efektif merupakan besaran proteksi yang dikembangkan untuk tujuan pengawasan terhadap kepatuhan pada peraturan nilai batas dosis, dan juga untuk keperluan optimasi

proteksi. Namun demikian, dalam prakteknya besaran ini banyak digunakan untuk tujuan pengkajian risiko radiasi. Sementara ICRP berpendapat bahwa pengkajian risiko memerlukan semua informasi dan data yang tersedia untuk memperoleh hasil yang terbaik, ada pandangan lain bahwa pengkajian risiko dengan sederhana dapat dilakukan dengan menggunakan nilai risiko insidensi kanker seumur hidup spesifik usia dan spesifik jaringan yang diberikan BEIR VII.

DAFTAR PUSTAKA

- ICRP, *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, ICRP Publication 103, Ann. ICRP 37 (2-4) 2007.
- IAEA, *Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards*. Interim Edition. General Safety Requirements Part 3. No. GSR Part 3 (Interim). IAEA, Vienna, 2011.
- ICRP, *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, ICRP Publication 26, Ann. ICRP 1 (3) 1977.
- ICRP, *1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, ICRP Publication 60, Ann. ICRP 21 (1-3), 1991.
- ICRP, *Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60*. ICRP Publication 119. Ann. ICRP 41 (Suppl.), 2012.
- ICRP, *Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures*. ICRP Publication 116. Ann. ICRP 40 (2-5), 2010.
- Brenner, D.J., We can do better than effective dose for estimating or comparing low-dose radiation risks, dalam *Proceedings of the First ICRP Symposium on the International System of Radiological Protection*. Ann. ICRP 41 (3-4), 2012.
- UNSCEAR, *Effects of Ionizing Radiation, UNSCEAR 2006 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes Vol.I*, United Nations, New York, 2008.