

KONSEKUENSI KECELAKAAN REAKTOR CHERNOBYL TERHADAP KESEHATAN DAN LINGKUNGAN

Zubaidah Alatas

Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi – BATAN

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

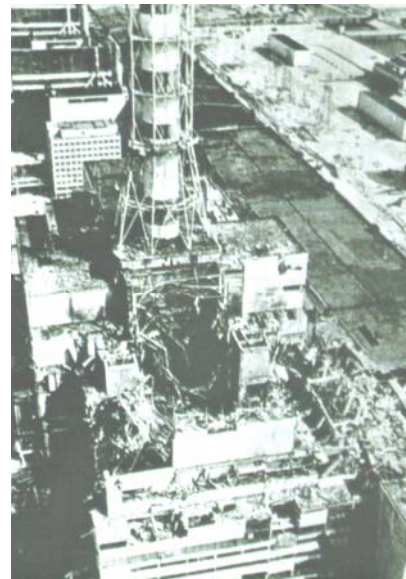
PENDAHULUAN

Kecelakaan nuklir yang paling parah dalam sejarah industri nuklir terjadi pada tanggal 26 April 1986 di Unit 4 reaktor instalasi daya nuklir Chernobyl di negara yang dulu dikenal sebagai Republik Ukrainia, Soviet Union. Ledakan yang menghancurkan pengungkung dan struktur inti reaktor (Gambar 1) menimbulkan kebakaran selama 10 hari dan menyebabkan terjadinya pelepasan sejumlah besar materi radioaktif ke lingkungan. Awan yang berasal dari reaktor yang terbakar tersebut menyebarkan berbagai jenis radionuklida, terutama yodium (^{131}I) dan cesium (^{137}Cs), ke hampir seluruh bagian Eropa.

Radionuklida ^{131}I , senyawa yang mempunyai organ target kelenjar tiroid dan berumur paro pendek (8 hari), terlepas ke lingkungan dalam jumlah yang banyak pada beberapa minggu pertama kecelakaan. Sedangkan radionuklida ^{137}Cs yang mempunyai waktu paro lebih lama (30 tahun), memberikan kontribusi paparan radiasi eksterna dan interna pada tubuh, masih terdeteksi keberadaannya dalam tanah dan pada beberapa makanan yang berasal dari beberapa wilayah di Eropa. Deposit radionuklida paling besar terjadi di wilayah sekitar reaktor yang sekarang dikenal sebagai Negara Belarus, Federasi Rusia, dan Ukraina (Gambar 2).



A



B

Gambar 1. Keadaan Reaktor daya nuklir Chernobyl sebelum (A) dan sesudah (B) terjadinya kecelakaan nuklir pada tahun 1986.

Diperkirakan sekitar 350.000 pekerja termasuk tentara, pekerja di reaktor, polisi, dan petugas pemadam kebakaran yang kali pertama terlibat dalam kejadian tersebut pada tahun 1986-1987. Sekitar 240.000 dari pekerja tersebut, terlibat dalam kegiatan mitigasi di reaktor dan berada dalam radius 30 km dari reaktor. Sedangkan jumlah *liquidator* yang terlibat mencapai 600.000, tetapi hanya sebagian kecil dari mereka yang terpapar radiasi dosis tinggi.

Lebih dari 5 juta orang yang bertempat tinggal di beberapa daerah di Negara Belarus, Rusia dan Ukraina dengan tingkat aktivitas ^{137}Cs lebih dari 37 kBq/m^2 , dan mereka dikategorikan sebagai penduduk yang terkontaminasi radionuklida. Di antaranya, sekitar 400.000 orang bermukim di daerah dengan tingkat kontaminasi lebih tinggi, yaitu di atas 555 kBq/m^2 ^{137}Cs yang disebut sebagai daerah *strict radiation control*. Dari populasi tersebut, hanya sekitar 116.000 orang yang dievakuasi pada tahun 1986 dari daerah sekitar reaktor Chernobyl yang dikenal dengan istilah *exclusion zone* ke daerah yang tidak terkontaminasi. Sedangkan 220.000 orang lainnya dipindahkan secara bertahap pada tahun berikutnya.



Gambar 2. Wilayah administratif di sekitar reaktor Chernobyl.

KONSEKUENSI TERHADAP KESEHATAN

Tiga kategori populasi yang terpapar radiasi akibat kecelakaan Chernobyl adalah:

1. Petugas kedaruratan (*emergency workers*) dan *liquidators* (*recovery operation workers*) yang bekerja di reaktor Chernobyl dan berada dalam *exclusion zone* setelah kecelakaan;
2. Penduduk yang dievakuasi dari daerah terkontaminasi; dan
3. Penduduk yang tinggal di daerah terkontaminasi tetapi tidak dievakuasi.

Dengan pengecualian terhadap operator yang berada di reaktor (*on-site reactor*) dan petugas kedaruratan yang berada dekat dengan reaktor saat terjadi kecelakaan, sebagian besar dari *liquidators* dan masyarakat yang tinggal di daerah terkontaminasi menerima dosis radiasi seluruh tubuh relatif rendah, dibandingkan dengan tingkat radiasi latar yang terakumulasi lebih dari 20 tahun sejak kecelakaan.

Dosis radiasi paling tinggi, berkisar 2 – 20 Gy, diterima oleh petugas kedaruratan dan *on-site reactor* yang berjumlah sekitar 100 orang selama beberapa hari pertama kecelakaan. Dosis radiasi tersebut bersifat fatal pada sebagian pekerja. Dosis yang diterima *liquidators* yang bekerja untuk periode waktu yang pendek selama 4 tahun setelah kecelakaan, berkisar lebih dari 500 mSv, dengan rerata sekitar 100 mSv, berdasarkan pada data dari *State Registries* di Belarus, Rusia, dan Ukraina. Sedangkan dosis efektif masyarakat yang dievakuasi pada tahun 1986 dari daerah terkontaminasi diperkirakan sekitar 33 mSv, dengan dosis tertinggi mencapai beberapa ratus mSv.

Konsumsi makanan terkontaminasi radioaktif

yodium menyebabkan paparan radiasi yang nyata pada kelenjar tiroid penduduk yang tinggal di daerah terkontaminasi. Dosis pada tiroid bervariasi bergantung pada usia, tingkat kontaminasi ¹³¹I pada tanah, dan laju konsumsi susu. Dosis tiroid diperkirakan mencapai 50 Gy, dengan dosis rerata di daerah terkontaminasi sekitar 0,03 sampai beberapa Gy, bergantung pada daerah tempat tinggal dan usia. Dosis pada kelenjar tiroid penduduk kota Pripyat yang terletak di kawasan reaktor Chernobyl, secara nyata menurun karena mengkonsumsi tablet yodium stabil. Mengkonsumsi susu dari sapi yang memakan rumput yang terkontaminasi segera setelah kecelakaan adalah satu faktor utama penyebab tingginya dosis pada tiroid anak-anak, dan penyebab timbulnya kanker tiroid pada sebagian besar anak-anak beberapa waktu kemudian.

Selama 20 tahun terakhir setelah kecelakaan, masyarakat umum telah terpapar radiasi baik secara eksterna (¹³⁷Cs di tanah) maupun melalui kontaminasi interna radionuklida (terutama ¹³⁷Cs) dalam makanan, air, dan udara. Dosis efektif rerata untuk populasi umum di daerah kontaminasi yang terakumulasi dari tahun 1986 sampai 2005 diperkirakan 10 – 30 mSv di berbagai daerah di negara Belarus, Rusia dan Ukraina. Pada daerah *strict radiation control*, dosis rerata sekitar 50 mSv dan lebih. Beberapa penduduk menerima paparan radiasi sampai beberapa ratus mSv. Perlu diketahui bahwa dosis rerata yang diterima penduduk yang bermukim di area terkontaminasi *fallout* (jatuhan) radionuklida sebagai akibat dari kecelakaan reaktor Chernobyl,

umumnya lebih rendah dari yang diterima penduduk yang tinggal di tempat dengan paparan radiasi latar alam yang tinggi, yaitu di India, Iran, Brazil, dan China (mencapai 100-200 mSv dalam 20 tahun).

Sebagian besar dari 5 juta penduduk yang tinggal di daerah Belarus, Rusia, dan Ukraina yang terkontaminasi, belakangan ini diperkirakan menerima dosis efektif tahunan lebih rendah dari 1 mSv dari jatuhnya radionuklida akibat kecelakaan Chernobyl, sebagai tambahan terhadap dosis radiasi alamiah. Sedangkan pada sekitar 100.000 penduduk yang berada di daerah dengan tingkat kontaminasi lebih tinggi, sampai saat ini masih menerima paparan radiasi lebih besar dari 1 mSv per tahun dari *fallout* Chernobyl. Meskipun penurunan tingkat paparan radiasi di masa akan datang yang sebagian besar dosis radiasi dari kecelakaan telah terakumulasi, diperkirakan menjadi lebih rendah, yaitu sekitar 3 – 5% per tahun,

Kematian Akibat Sindroma Radiasi Akut

Jumlah kematian akibat kecelakaan Chernobyl telah menjadi perhatian masyarakat umum, peneliti, media masa, dan politikus. Keresahan tentang mortalitas akibat dari kecelakaan ini menjadi meningkat dengan adanya pernyataan bahwa puluhan bahkan ratusan ribu orang telah meninggal akibat kecelakaan nuklir ini. Fakta yang ada adalah bahwa pada beberapa tahun kemudian sejak 1986, ribuan petugas kedaruratan, *liquidators*, dan juga penduduk yang tinggal di daerah terkontaminasi telah meninggal karena penyebab yang tidak ada hubungannya

Tabel 1. Dosis akumulasi rerata pada populasi yang terpapar *fallout* radionuklida lepasan kecelakaan reaktor Chernobyl.

Kategori populasi	Jumlah (orang)	Dosis rerata (mSv)
<i>Liquidators</i> (1986-1989)	600.000	~ 100
Penduduk yang dievakuasi (1986)	116.000	33
Penduduk di daerah <i>strict radiation control</i> (1986-2005)	270.000	>50
Penduduk di daerah terkontaminasi lainnya (1986-2005)	5.000.000	10-20

dengan radiasi.

Jumlah kematian akibat sindroma radiasi akut (SRA) selama tahun pertama setelah kecelakaan terdokumentasi dengan baik. Berdasarkan UNSCEAR (2000), kasus SRA terjadi pada 134 petugas kedaruratan dan sekitar 28 dari petugas tersebut meninggal pada tahun 1986 akibat SRA yang parah. Dua orang pekerja meninggal pada Unit 4 akibat luka yang tidak ada hubungan dengan radiasi, dan satu kematian diperkirakan akibat *coronary thromosis*. Sebanyak 19 pekerja meninggal pada tahun 1987 – 2004 karena berbagai sebab; yang kematiannya tidak secara langsung sebagai akibat dari paparan radiasi. Di antara masyarakat umum yang terpapar radiasi dari *fallout* radionuklida, dosis radiasi yang diterima relatif rendah, berarti kasus SRA dan fatalitas lain yang terkait tidak akan terjadi.

Mortalitas Akibat Kanker

Tidak mungkin untuk dapat mengkaji jumlah kanker fatal akibat paparan radiasi dari kecelakaan Chernobyl. Selain itu, kanker yang diinduksi radiasi sampai saat ini tidak dapat dibedakan dari kanker yang disebabkan oleh faktor lain. Diprediksikan bahwa di antara 600.000 orang yang menerima paparan radiasi berlebih (*liquidator* 1986-1987, pengungsi, dan penduduk di daerah paling terkontaminasi), kemungkinan terjadi peningkatan mortalitas akibat kanker dapat mencapai beberapa persen yang disebabkan oleh paparan radiasi. Terdapat kemungkinan nantinya akan mencapai 4000 kanker fatal tambahan terhadap sekitar 100.000 kanker fatal yang diperkirakan terjadi sebagai akibat dari faktor penyebab kanker lainnya pada populasi tersebut. Di antara 5 juta penduduk yang tinggal di area kontaminasi lainnya, dosis yang diterima jauh lebih rendah, dan perkiraan yang lebih bersifat spekulatif terhadap mortalitas kanker adalah di bawah 1%.

Peningkatan mortalitas seperti ini sangat sulit diketahui dengan metode epidemiologi yang ada yang memberikan variasi normal pada laju

mortalitas kanker. Sejauh ini, studi epidemiologi pada penduduk yang tinggal di area terkontaminasi di Belarus, Rusia, dan Ukraina tidak menunjukkan bukti yang jelas dan meyakinkan tentang peningkatan mortalitas masyarakat umum akibat radiasi, dan khususnya akibat leukemia, kanker mampat (selain kanker tiroid) dan penyakit selain kanker.

Di antara lebih dari 4000 kasus kanker tiroid yang didiagnosis pada tahun 1992-2002 pada individu yang saat terjadi kecelakaan adalah anak-anak atau remaja, telah terjadi 15 kematian sampai tahun 2002 akibat kanker tiroid. Peningkatan kasus leukemia, kanker mampat, dan penyakit sistem sirkulasi akibat radiasi telah dilaporkan terjadi pada petugas kedaruratan dan *liquidators* di Rusia. Berdasarkan data dari *Russian Registry*, pada tahun 1991-1998, dari 61.000 pekerja Rusia yang terpapar radiasi dengan dosis rerata 107 mSv, sekitar 5% mengalami kematian sebagai konsekuensi dari paparan radiasi. Penemuan ini, harus dipertimbangkan sebagai data awal dan membutuhkan konfirmasi lebih lanjut dengan model studi yang lebih baik dan rekonstruksi dosis individual yang lebih hati-hati.

Kanker Tiroid Pada Anak-Anak

Salah satu jenis radionuklida yang terlepas pada kasus kecelakaan Chernobyl adalah ¹³¹I yang terjadi pada beberapa bulan pertama. Kelenjar tiroid mengakumulasi yodium dari pembuluh darah sebagai bagian dari metabolisme normal organ ini. Oleh karena itu, *fallout* radionuklida ini akan menyebabkan terjadinya paparan radiasi interna pada kelenjar tiroid penduduk yang masuk tubuh melalui inhalasi dan ingesti, khususnya susu. Kelenjar tiroid adalah salah satu organ yang paling rentan terhadap induksi kanker oleh radiasi. Anak-anak diketahui merupakan populasi yang paling sensitif. Konsekuensinya, terjadi peningkatan kasus kanker tiroid yang sangat nyata di antara individu yang terpapar radiasi pada saat masih anak-anak ketika kecelakaan reaktor Chernobyl terjadi.

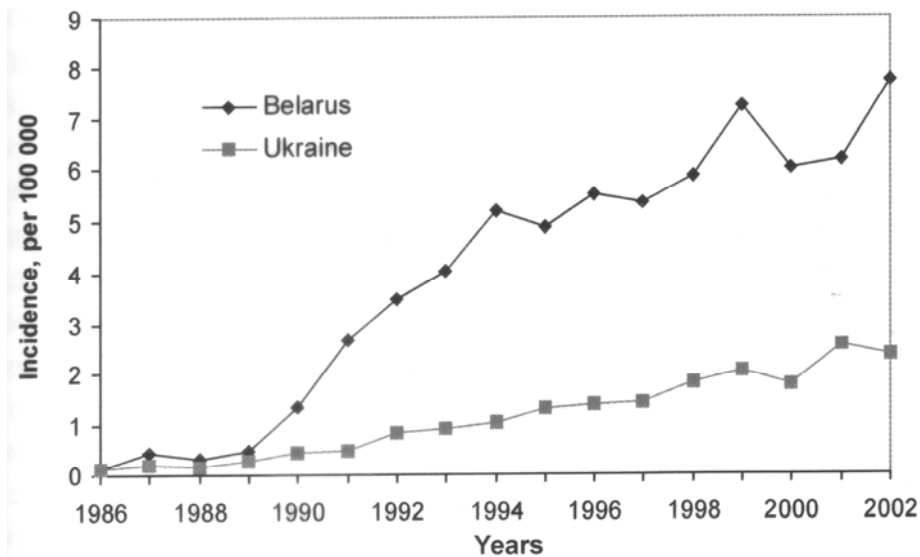
Pada tahun 1992-2002 di Belarus, Rusia dan Ukraina, tercatat lebih dari 4000 kasus kanker tiroid yang didiagnosis pada individu yang pada saat kecelakaan berusia antara 0-18 tahun (Gambar 3). Diperkirakan akan terus terjadi peningkatan jumlah kasus kanker tiroid sampai beberapa tahun lagi meskipun seberapa besar risiko jangka panjang yang mungkin akan terjadi sulit untuk dikuantifikasi.

Perlu diketahui bahwa tindakan mitigasi awal dapat meminimalisasi konsekuensi kesehatan akibat kecelakaan ini. Tablet yodium stabil yang dikonsumsi selama 6 – 30 jam pertama dari kecelakaan mereduksi dosis pada tiroid penduduk kota Pripyat dengan faktor rerata 6. Pripyat adalah kota terbesar yang paling dekat dengan reaktor nuklir Chernobyl dan sekitar 50.000 penduduknya dievakuasi dalam waktu 40 jam setelah kecelakaan. Lebih dari 100.000 orang telah dievakuasi dalam waktu beberapa minggu setelah kecelakaan dari area yang paling terkontaminasi di Ukraina dan Belarus. Tindakan ini dapat mereduksi paparan radiasi yang diterima penduduk yang berarti pula memperkecil dampak kesehatan akibat kecelakaan yang terkait dengan radiasi.

Leukemia, Kanker Mempat dan Penyakit Sirkulasi

Sejumlah studi epidemiologi, termasuk pada korban bom atom, pasien yang menerima tindakan radioterapi dan populasi yang terpapar radiasi akibat kerja di sektor kesehatan dan industri nuklir, telah menunjukkan bahwa radiasi pengion dapat menyebabkan kanker mempat dan leukemia (kecuali *chronic lymphoid leukemia*, CLL). Informasi terakhir ini juga menunjukkan adanya peningkatan risiko penyakit sirkulasi pada populasi yang terpapar radiasi dengan dosis lebih tinggi, seperti korban bom atom dan pasien radioterapi.

Peningkatan risiko leukemia akibat radiasi kecelakaan Chernobyl, diperkirakan hanya akan terjadi pada populasi yang terpapar. Studi terakhir menunjukkan adanya peningkatan leukemia kecuali CLL dua kali lebih besar pada petugas kedaruratan dan *liquidators* di Rusia yang terpapar lebih dari 150 mGy (dosis eksterna) pada tahun 1986 - 1996. Meskipun demikian, karena risiko leukemia yang diinduksi radiasi cenderung menurun beberapa dekade setelah kecelakaan, kontribusinya terhadap morbiditas dan mortalitas nampaknya menjadi kurang nyata dengan



Gambar 3. Laju kejadian kanker tiroid pada anak-anak dan remaja yang terpapar ¹³¹I sebagai lepasan dari kecelakaan Chernobyl.

bertambahnya waktu.

Terdapat sejumlah studi tentang leukemia dan morbiditas kanker pasca kecelakaan Chernobyl pada penduduk di area terkontaminasi di ketiga negara tersebut. Tetapi sampai saat ini tidak ada bukti yang dapat menunjukkan secara nyata bahwa kejadian leukemia atau kanker mempat (selain tiroid) meningkat pada anak-anak, janin, atau masyarakat di daerah terkontaminasi. Diperkirakan bahwa sebagian besar kanker mempat memerlukan masa laten yang jauh lebih lama dari leukemia atau kanker tiroid, sekitar 10–15 tahun atau lebih. Dengan demikian sepertinya menjadi terlalu awal untuk dapat mengevaluasi dampak keseluruhan dari paparan radiasi kecelakaan ini. Oleh karena itu, perawatan medis dan pemeriksaan tahunan pekerja yang terpapar dosis tinggi harus terus dilanjutkan.

Tidak adanya bukti terjadinya peningkatan risiko kanker selain kanker tiroid, tidak berarti bahwa tidak ada peningkatan yang sesungguhnya terjadi. Peningkatan seperti ini diperkirakan sangat sulit untuk diidentifikasi tanpa suatu studi epidemiologi yang berskala besar dengan perkiraan dosis individual.

Dijumpai adanya peningkatan morbiditas dan mortalitas akibat penyakit sistem sirkulasi pada petugas kedaruratan dan *liquidators* di Rusia. Timbulnya penyakit sistem sirkulasi harus diinterpretasikan secara khusus karena selalu terdapat kemungkinan ini merupakan sebagai konsekuensi tidak langsung dari faktor *confounding*, seperti stres dan gaya hidup. Penemuan ini juga masih perlu untuk dikonfirmasi dengan studi yang dirancang dengan lebih baik.

Katarak

Pemeriksaan mata anak-anak, petugas kedaruratan dan *liquidators* secara jelas menunjukkan bahwa katarak sebagai konsekuensi dari paparan radiasi akibat kecelakaan Chernobyl. Data dari studi pada petugas kedaruratan dan

liquidators menunjukkan paparan radiasi dengan dosis lebih rendah dari pengalaman sebelumnya, yaitu sampai sekitar 250 mGy, bersifat kataraktogenik. Studi lanjutan pada mata penduduk terpapar radiasi akibat kecelakaan Chernobyl akan memastikan risiko katarak akibat radiasi dan yang lebih penting lagi, memberikan data yang diperlukan untuk dapat mengkaji terjadinya disfungsi penglihatan.

Efek Reproduksi dan Pewarisan

Karena dosis radiasi yang diterima penduduk relatif rendah, maka tidak dijumpai adanya penurunan tingkat kesuburan baik pada laki-laki maupun perempuan dalam populasi masyarakat umum sebagai efek langsung dari paparan radiasi. Dosis tersebut juga tampaknya tidak memberikan efek yang berarti terhadap jumlah kelahiran, kondisi kehamilan, komplikasi dalam melahirkan atau kesehatan keseluruhan pada anak-anak.

Laju kelahiran mengalami penurunan di daerah terkontaminasi. Ini kemungkinan disebabkan karena adanya keawatiran tentang mempunyai anak yang tidak normal yang ditunjukkan dengan laju aborsi yang sangat tinggi, dan fakta bahwa sejumlah masyarakat usia muda pindah ke daerah lain. Tidak ada peningkatan pada efek herediter atau pewarisan yang disebabkan oleh radiasi yang diperkirakan berdasarkan pada koefisien risiko rendah oleh UNSCEAR (2000). Sejak tahun 2000, tidak ada bukti yang meubah kesimpulan ini.

KONSEKUENSI TERHADAP LINGKUNGAN

Pelepasan beberapa radionuklida utama dari Unit 4 reaktor nuklir Chernobyl berlangsung selama 10 hari setelah ledakan pada tanggal 26 April 1986. Pelepasan tersebut meliputi gas radioaktif, aerosol yang terkondensasi, dan sejumlah besar partikel bahan bakar reaktor. Jumlah total materi radioaktif yang lepas adalah sekitar 14×10^{18} Bq, termasuk $1,8 \times 10^{18}$ Bq ^{131}I ;

$8,5 \times 10^{16}$ Bq ^{137}Cs ; 10^{16} Bq ^{90}Sr ; dan 3×10^{15} Bq radioisotop Pu. Radionuklida yang berbentuk gas memberikan kontribusi sekitar 50% dari total lepasan.

Lebih dari 200.000 km² Eropa menerima tingkat aktivitas ^{137}Cs lebih besar dari 37 kBq/m². Lebih dari 70% daerah ini adalah bagian dari Belarus, Rusia dan Ukraina. Tingkat deposisi materi radionuklida tersebut sangat bervariasi. Sebagian besar radionuklida Sr dan Pu terdeposit pada jarak 100 km dari reaktor karena ukuran partikelnya yang besar.

Sebagian besar radionuklida dilepaskan akibat kecelakaan tersebut telah hilang karena mempunyai umur paro fisik yang singkat. Sedangkan ^{137}Cs akan terus menjadi masalah dan perhatian untuk beberapa dekade mendatang, demikian pula halnya dengan ^{90}Sr . Untuk jangka waktu yang panjang, sekitar ratusan sampai ribuan tahun mendatang, isotop Pu dan ^{241}Am akan tetap ada meskipun pada tingkat yang rendah.

Kontaminasi Radionuklida di Daerah Pemukiman

Radionuklida terdeposit paling banyak pada permukaan terbuka di daerah urban, seperti taman, jalan, lahan kosong, serta atap dan dinding bangunan. Konsentrasi ^{137}Cs meningkat di sekitar rumah karena ketika hujan telah terjadi pemindahan radionuklida ini dari atap ke tanah. Angin, hujan dan aktifitas manusia menyebabkan kontaminasi permukaan di kawasan pemukiman dan rekreasi, selama 1986 dan beberapa tahun kemudian, mengalami penurunan secara nyata. Saat ini, pada sebagian besar pemukiman yang dulunya menjadi target kontaminasi radionuklida dari Chernobyl, laju dosis radiasi di udara di atas permukaan tanah telah kembali ke tingkat latar alam. Tetapi, laju dosis udara ini masih melebihi dosis udara permukaan tanah di kebun dan taman pada beberapa pemukiman di Belarus, Rusia dan Ukraina yang tidak terkontaminasi.

Kontaminasi Radionuklida di Daerah Pertanian

Pada beberapa bulan pertama setelah kecelakaan, tingkat radioaktivitas tanaman pertanian dan hewan yang mengkonsumsi tanaman terutama disebabkan karena deposit radionuklida pada permukaan tanah. Deposit radioyodium menimbulkan keawatiran yang tidak lama, hanya dua bulan pertama setelah kecelakaan, karena peluruhan ^{131}I yang cepat. Radionuklida ini secara cepat diserap terkandung susu yang menyebabkan dosis radiasi pada tiroid penduduk yang mengkonsumsi susu tersebut, khususnya anak-anak di Belarus, Rusia dan Ukraina.

Selain itu, penyerapan radionuklida oleh akar tanaman dari tanah menjadi penting. Radioisotop Cs (^{137}Cs dan ^{134}Cs) merupakan radionuklida yang paling menimbulkan masalah. Bahkan setelah ^{134}Cs meluruh (umur paro 2,1 tahun), sampai pertengahan 1990an tingkat ^{137}Cs pada produk pertanian dari daerah yang terkontaminasi tinggi masih memerlukan remediasi lingkungan. Selain itu, ^{90}Sr dapat menyebabkan masalah di area yang dekat dengan reaktor, tetapi semakin jauh jarak dari reaktor semakin rendah tingkat kandungannya dalam tanah. Radionuklida lain seperti isotop Pu dan ^{241}Am tidak menimbulkan masalah bagi pertanian karena sangat sedikit yang ada dalam tanah untuk diserap akar tanaman.

Kandungan radiocesium dalam bahan makanan tidak hanya dipengaruhi oleh tingkat deposisi tetapi juga oleh jenis ekosistem, tanah dan teknis manajemen pertanian. Umumnya terdapat reduksi transfer radionuklida ke tanaman dan hewan pada pertanian sistem intensif pada beberapa tahun pertama setelah pelepasan. Ini disebabkan antara lain oleh faktor cuaca, peluruhan fisik, dan migrasi radionuklida ke dalam tanah. Dalam dekade terakhir, terjadi penurunan dengan skala kecil yaitu sekitar 3-7 % per tahun. Masalah tetap masih ada di daerah terkontaminasi dengan sistem pertanian ekstensif pada tanah dengan kandungan organik tinggi.

Untuk periode waktu yang lama, ^{137}Cs dalam susu, daging dan makanan dari tanaman merupakan kontributor paling penting bagi dosis interna manusia. Dengan konsentrasi aktivitas ^{137}Cs yang menurun secara sangat lambat selama dekade terakhir dalam makanan dari tanaman dan hewan, kontribusi relatif ^{137}Cs pada dosis interna akan terus berlangsung mendominasi untuk beberapa dekade ke depan. Keterlibatan radionuklida lain yang berumur panjang, yaitu ^{90}Sr , Pu dan ^{241}Am terhadap dosis interna manusia tetap tidak signifikan.

Informasi terakhir menunjukkan konsentrasi aktivitas ^{137}Cs pada produk makanan pertanian yang dihasilkan di daerah terkontaminasi *fallout* chernobyl umumnya di bawah nilai batas nasional dan internasional. Meskipun demikian, di beberapa daerah dengan kontaminasi radionuklida yang tinggi (bagian dari daerah Gomel dan Mogilev di Belarus dan daerah Bryansk di Rusia) atau tanah rendah organik (daerah Zhytomir dan Rovno di Ukraina), susu yang dihasilkan masih mengandung ^{137}Cs dengan konsentrasi aktivitas melebihi nilai batas nasional 100 Bq/kg.

Kontaminasi Radionuklida di Hutan

Setelah kecelakaan, tanaman dan hewan di hutan dan pengunungan menunjukkan penyerapan radiocesium yang tinggi, dengan tingkat ^{137}Cs tertinggi dijumpai di hutan yang menghasilkan produk makanan. Konsentrasi aktivitas ^{137}Cs tinggi pada jamur, buah berry, yang telah berlangsung selama dua dekade. Oleh karena itu, sementara tingkat kontaminasi di daerah pertanian telah mengalami penurunan, kondisi tingkat kontaminasi pada produk makanan yang dihasilkan dari hutan tetap masih tinggi dan melebihi nilai batas yang diizinkan di beberapa negara. Di sebagian daerah di Belarus, Rusia, dan Ukraina, konsumsi makanan hasil hutan yang mengandung ^{137}Cs merupakan penyebab terbesar peningkatan dosis radiasi interna dan keadaan ini diperkirakan akan berlangsung untuk beberapa dekade.

Efek Radiasi Pada Tanaman dan Hewan

Irradiasi dari radionuklida yang dilepaskan dari kecelakaan Chernobyl menyebabkan sejumlah efek radiasi akut pada tanaman dan hewan yang tinggal di daerah yang terpapar dosis tinggi, yaitu daerah yang terletak pada radius 30 km dari reaktor. Di luar *exclusion zone*, tidak ada efek radiasi akut pada tanaman dan hewan yang pernah dilaporkan.

Respon lingkungan alam terhadap kecelakaan merupakan suatu interaksi yang kompleks antara besar dosis radiasi dan tingkat radiosensitivitas tanaman dan hewan yang bervariasi. Efek pada tingkat individual dan tingkat populasi yang disebabkan karena adanya kematian sel akibat radiasi telah diamati pada biota dalam *exclusion zone*. Efek tersebut berupa kematian tanaman ciniferous, kematian hewan invertebrata yang hidup di tanah dan hewan mamalia, serta hilangnya reproduktivitas tanaman dan hewan. Tidak ada efek radiasi yang berarti pada tanaman dan hewan yang terpapar dosis akumulatif lebih rendah dari 0,3 Gy selama bulan pertama setelah kecelakaan.

Setelah terjadi penurunan tingkat paparan radiasi yang berlangsung secara aliamiah, melalui mekanisme peluruhan radionuklida dan migrasi radionuklida ke dalam tanah, populasi tanaman dan hewan kembali mulai pulih dari efek akut radiasi. Segera pada musim tumbuh berikutnya pasca kecelakaan, viabilitas populasi tanaman dan hewan telah pulih sebagai hasil dari pemulihan sistem reproduksi dan imigrasi dari daerah yang terpapar radiasi dengan tingkat yang lebih rendah. Dibutuhkan waktu beberapa tahun untuk kembali pulih dari efek yang timbul akibat radiasi pada tanaman dan hewan.

Efek genetik radiasi pada sel somatik dan genetik terjadi pada tanaman dan hewan yang berada dalam *exclusion zone* selama beberapa tahun pertama setelah kecelakaan. Pemulihan biota yang terpapar dipercepat dengan tidak adanya aktivitas manusia, seperti aktivitas pertanian dan industri. Sebagai hasilnya, populasi sejumlah tanaman dan hewan bertambah. Kondisi

lingkungan saat ini telah mempunyai dampak positif pada biota di *exclusion zone* yang telah menjadi kawasan yang unik untuk biodiversitas.

PENUTUP

Kecelakaan nuklir Chernobyl tahun 1986 merupakan suatu tragedi manusia sekarang, 20 tahun kemudian, beberapa badan PBB yaitu IAEA, WHO, UNDP, FAO, UNEP, UN-OCHA, UNSCEAR, dan WORLD BANK beserta perwakilan dari negara Belarus, Federasi Rusia dan Ukraina melakukan pengkajian terhadap dampak jangka panjang terhadap kesehatan, lingkungan dan sosial ekonomi yang ditimbulkan dari kecelakaan nuklir terbesar tersebut.

Kanker tiroid merupakan konsekuensi kesehatan utama dari kecelakaan yang dijumpai pada anak-anak akibat *fallout* radiyodium. Tidak dijumpai secara jelas adanya peningkatan kejadian kanker mepat atau leukemia akibat radiasi pada penduduk di daerah yang terkontaminasi paling tinggi.

Tingkat radiasi di lingkungan telah mengalami penurunan beberapa ratus kali karena proses alamiah. Oleh karena itu, sebagian besar daerah yang terkontaminasi sekarang telah aman untuk pemukiman dan aktivitas ekonomi. Kecuali di *exclusion zone* dan beberapa daerah terbatas tertentu yang masih merupakan kawasan terlarang untuk beberapa dekade mendatang.

Berbagai kegiatan penelitian tentang dampak kecelakaan Chernobyl yang ditargetkan terhadap sejumlah aspek dari kesehatan, lingkungan, dan juga sosial ekonomi harus terus

dilanjutkan untuk waktu yang lebih lama. Dengan mengacu pada berbagai hasil penelitian tersebut, UNSCEAR telah merencanakan menyusun *Report on Chernobyl* yang baru sebagai revisi terhadap UNSCEAR 2000 dengan informasi yang lebih valid dan lengkap secara ilmiah mengenai tingkat dan efek paparan radiasi akibat kecelakaan tersebut. Isi dari laporan yang baru serupa dengan UNSCEAR 2000 yaitu konsekuensi fisik dari kecelakaan, dosimetri, efek radiasi akut, *registries*, dan efek jangka panjang terhadap kesehatan dan lingkungan. Tetapi, laporan yang baru akan terfokus pada dosimetri dan epidemiologi, yang secara bersamaan akan memberikan informasi baru dan lebih lengkap mengenai efek jangka panjang terhadap kesehatan. UNSCEAR *Report on Chernobyl* yang baru direncanakan akan terbit tahun 2010.

DAFTAR PUSTAKA

1. UNITED NATION SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION. Sources and Effects of Ionizing Radiation. Vol. II. United Nation, New York. 2000.
2. IAEA, WHO, UNDP, FAO, UNEP, UN-OCHA, UNSCEAR, WORLD BANK. Chernobyl's Legacy: Health, Environmental and Socio-economic Impacts and Recommendations to the Governments of Belarus, the Russian Federation and Ukraine. 2nd revised version. IAEA, Vienna. 2006
3. INTERNATIONAL ADVISORY COMMITTEE. The International Chernobyl Project. Assessment of Radiological Consequences and Evaluation of Protective Measures. Technical Report. IAEA, Vienna. 1991.