

POLUSI RADIOAKTIVITAS TERHADAP FLORA DAN FAUNA *)

H. Soewondo, Djojosoebagio **,
Bagian Endokrinologi dan Biologi Radiasi,
Fakultas Kedokteran Hewan, Institut Pertanian Bogor, Bogor.

Abstrak

Radionuklida yang penting pengaruhnya terhadap lingkungan adalah (1) radionuklida alamiah seperti seri peluruhan uranium, thorium dan actinium serta ^{40}K , ^{14}C dan ^{226}Ra maupun ^{228}Ra ; (2) hasil dari "fission products" seperti ^{131}J , ^{137}Cs dan ^{90}Sr ; (3) radionuklida yang merupakan unsur yang esensial dari suatu organisme dan sering dipakai sebagai tracer untuk mempelajari siklus radionuklida dan efek radiasi terhadap organisme didalam suatu sistim ekologis seperti ^3H , ^{32}P , ^{59}Fe , ^{131}J , ^{35}S , ^{22}Na , ^{45}Ca dan ^{42}K .

Pertimbangan yang utama yang harus dipikirkan sehubungan dengan pembuangan sampah-sampah radionuklida kedalam lingkungan adalah (1) dinamika dari radionuklida tersebut didalam suatu rantai atau siklus makanan (food chain); (2) kemampuan untuk berakumulasi pada suatu tingkat ekologis tertentu; (3) kemungkinan ditimbulkannya radiasi oleh radionuklida terhadap individu, populasi termasuk manusia.

Pengaruh radioaktivitas yang memasuki suatu ekosistem tidak saja bergantung kepada sifat-sifat fisik dari radionuklidanya tetapi ditentukan pula oleh cara pengelolaan oleh komuniti yang bersangkutan. Kerusakan-kerusakan atau perubahan-perubahan satu atau lebih didalam jalinan yang penting dari suatu ekosistem akan dapat merubah seluruh jalinan (web) yang dapat memberikan efek yang negatif terhadap kesejahteraan manusia. Efek ini dapat mempengaruhi macam, kualitas dan jumlah makanan untuk manusia, air, bahan-bahan untuk bahan bangunan, keindahan alam untuk rekreasi bahkan juga cuaca dan iklim.

Jika radionuklida yang berasal dari atmosfir sampai dibumi, zat-zat ini akan mencemari permukaan tanah dan tanaman. Seberapa jauh radionuklida ini akan bermigrasi dan memegang peranan didalam siklus biokimia bergantung kepada keadaan geografis dan keadaan ekosistem yang ada disekitarnya.

*) Dikemukakan oleh C. Soegiarto M.Sc.

***) Professor Fisiologi dari Bagian Endokrinologi dan Biologi Radiasi, Fak. Kedokteran Hewan Institut Pertanian Bogor, Alamat Sementara : Jabatan Biologi, Fakultas Sains, Universiti Kebangsaan Malaysia, Kuala Lumpur, Malaysia.

Dengan cara sederhana dapat digambarkan bahwa radionuklida masuk kedalam rantai makanan sbb. : (1) radionuklida \longrightarrow tanaman \longrightarrow manusia; (2) radionuklida \longrightarrow tanaman \longrightarrow hewan \longrightarrow manusia; (3) radionuklida \longrightarrow tanah \longrightarrow akar \longrightarrow tanaman \longrightarrow hewan \longrightarrow manusia; (4) radionuklida \longrightarrow air \longrightarrow air \longrightarrow organisme akwatik I \longrightarrow organisme akwatik II \longrightarrow manusia. Akumulasi radionuklida pada organisme akwatik bergantung kepada suatu faktor konsentrasi dari organisme tersebut.

Absorpsi dari ^{90}Sr oleh tanaman bergantung kepada tipe tanah, kelembaban tanah dan banyaknya kalsium didalam tanah. Cesium-137 terikat dengan kuat pada tanah sehingga lebih sedikit diserap oleh tanaman. Dari segi pengaruhnya didalam jangka panjang, ^{90}Sr ($t_{1/2}$: 28 thn) dan ^{137}Cs ($t_{1/2}$: 30 thn) adalah yang terpenting karena paruh umurnya yang lama. Karena paruh umur biologik dari ^{137}Cs sekitar 70 - 140 hari radionuklida ini tidak merupakan zat yang sangat merusak dibandingkan dengan ^{90}Sr yang mempunyai paruh umur biologik selama 50 tahun.

Radionuklida yang mencemari lautan mempunyai siklus yang berbeda-beda. Unsur-unsur yang membentuk ikatan kompleks yang kuat dengan zat-zat organik seperti ^{60}Co , ^{59}Fe , ^{144}Ce dan ^{106}Ru akan masuk rantai makanan laut (marine food chain) sedang hasil dari "fission products" lebih banyak masuk kedalam rantai makanan teresterial (land food chain), seperti ^{137}Cs dan ^{90}Sr . Ikan dan hewan akwatik mengumpulkan radionuklida lebih banyak melalui insang, sirip ekor dan melalui kulit tubuhnya. Tanaman laut mempunyai faktor konsentrasi yang lebih tinggi dari pada hewan laut.

Species yang hidup adalah merupakan suatu indikator yang baik dan tepat dari pada data teoritis yang diperoleh dengan alat-alat modern yang ada. Meskipun alat-alat ini akan dapat menentukan adanya radionuklida didalam suatu jumlah yang sangat rendah namun data ini tidaklah berarti jika dibandingkan dengan apa yang dapat diakibatkan oleh radioaktivitas terhadap organisme yang hidup didalam suatu waktu yang lama. Hanya dengan jalan mengamati komuniti dapatlah kita mengetahui efek radiasi yang dengan sebenarnya terjadi didalam alam.

Problema radioaktivitas lingkungan di Negara kita haruslah mendapat perhatian yang lebih baik. Apa yang dapat kita pelajari tentang migrasi dan radiasi didalam suatu ekosistem akan dapat memberikan bantuan didalam menentukan (1) apakah pembuangan/pembebasan sampah-sampah radioaktif adalah suatu tindakan yang tepat : (2) kalau cara pembuangan sampah-sampah radionuklida ini diteruskan sebanding dengan meningkatnya produksi tenaga atom apakah keuntungan yang diperoleh akan seimbang dengan resiko yang akan dihadapi.

Dari segi bioekonomis bila kita tentukan ongkos-ongkos keselamatan/pengamanan terhadap kerusakan-kerusakan biologis dari suatu pusat penyebab radiasi sebagai fungsi dari "permissible dose rate", maka akan kita jumpai bahwa relatif tidak akan diperlukan ongkos yang tinggi bila kita tidak atau kurang memperhatikan terhadap radiasi

yang diderita oleh karyawan-karyawan ataupun komuniti yang ada disekitarnya. Sebaliknya bila tindakan pengamanan diberikan dengan baik dan seksama (zero dose rate) maka ongkos-ongkosnya secara teoritis akan mencapai "infinitif". Jadi bila kita ingin menikmati keuntungan dari suatu tenaga nuklir haruslah kita dapat mengambil suatu jalan tengah (kompromi) dengan "dose rate" (dengan jalan menghindarkan "high dose rate") yang dapat meyakinkan kita dengan suatu resiko yang masih dapat diterima, tanpa menyebabkan kerusakan-kerusakan biologis, tetapi masih menguntungkan ditilik dari segi ekonomis.

I. PENDAHULUAN

Radiasi latar belakang (background radiation) yang terdapat didalam suatu lingkungan sebagian disebabkan oleh peluruhan (decay) dari zat-zat radioisotop yang terdapat disekitarnya termasuk yang terdapat didalam tubuh hewan maupun manusia dan sebagian lagi disebabkan oleh radiasi kosmos. Di bumi radiasi kosmos hanya memegang peranan yang kecil sekali karena adanya suatu perlindungan yang merupakan perisai yang terbentuk oleh medan magnet dari bumi. Disamping itu masih dijumpai lagi terbentuknya perisai yang terjadi dari massa-atmosfir yang harus dilalui oleh butir-butir radionuklida untuk dapat mencapai bumi.

Bertambah maju dan berkembangnya tenaga nuklir bagi keperluan militer dan maksud-maksud damai selalu diikuti oleh persoalan-persoalan lingkungan yang aktual yang langsung maupun tidak langsung erat hubungannya dengan keselamatan dan kesejahteraan manusia. Persoalan-persoalan yang unik dan memintakan perhatian yang khusus ialah mengenai peranan radionuklida yang dibuang atau dilepaskan kedalam lingkungan dan efeknya terhadap lingkungan tersebut.

Persoalan-persoalan tersebut diatas disebabkan karena adanya 'fall out', pembangunan reaktor, pembuangan sampah-sampah radioaktif, perang nuklir yang mungkin timbul dan proyek-proyek lainnya yang memanfaatkan tenaga nuklir sebagai salah satu tehnik pendekatan dan pemecahan sesuatu masalah. Radiasi didalam suatu sistim biologis adalah laksana sebuah pisau yang bermata dua. Ia merupakan sebuah alat yang sangat berguna dan bermanfaat tetapi juga merupakan musuh yang perkasa. Pada satu pihak radiasi dapat memberikan suatu perubahan-perubahan didalam masyarakat menurut pola yang diinginkan dan dapat memberikan kemudahan-kemudahan dan meningkatkan kesejahteraan manusia sedangkan di pihak lain mempunyai potensi untuk merusak dan menghancurkan kesehatan, kehidupan dan kesejahteraan manusia dimasa mendatang. Akibat adanya sifat yang ganda dari tenaga nuklir ini mengharuskan manusia, homo sapiens, berusaha dan memikirkan didalam setiap aplikasi dan penggunaan enersi nuklir untuk mempertimbangkan dengan seksama antara risiko yang mungkin dihadapi dan keuntungan yang akan diperoleh.

"Sangat disesalkan" bahwa keuntungan-keuntungan yang terpendam yang akan dapat diberikan oleh tenaga nuklir adalah begitu besar sehingga ada kemungkinan bahwa aspek yang kedua ialah aspek merusak dan menghancurkan akan diabaikan. Pengabaian ini akan dapat menimbulkan bahaya-bahaya yang tidak perlu terjadi bagi pemakainya, teman-teman sekerja, pasien-pasien yang menerima pengobatan ataupun diagnosa dengan menggunakan teknik nuklir,

penduduk yang tidak tahu menahu yang hidup jauh dari pusat instalasi nuklir bahkan dapat pula menimbulkan mala petaka kepada generasi yang akan datang.

Sebenarnya semua organisme yang hidup, sejak kejadiannya di bumi ini sampai masa kini, selalu mengalami ataupun menerima radiasi yang berasal dari radiasi latar. Sebagaimana disebutkan di muka, radiasi latar ini berasal dari kosmos, dari matahari, dari unsur-unsur radioaktif alamiah yang terdapat didalam bumi, dari bahan-bahan bangunan, dari dalam tubuh individu sendiri dan lain sebagainya. Radiasi latar ini akan bervariasi besarnya dengan tinggi altituda dan tempat, karena adanya perbedaan macam radionuklida yang terkandung didalam tanah. Makin tinggi suatu altituda maka makin besar pula peranan radiasi kosmos.

Tidak semua bahaya dari suatu radiasi disebabkan oleh efek langsung dari radiasi itu sendiri. Adanya kemungkinan pembuangan sampah-sampah radioaktif yang kurang hati-hati dapat pula merusak organisme didalam suatu lingkungan yang akan dapat mengakibatkan kerusakan seluruh rangkaian dan hubungan timbal balik yang ada diantara organisme tersebut dengan lingkungannya.

Setiap suatu instalasi nuklir akan dibangun suatu data dari radiasi latar hendaklah dikumpulkan. Pengumpulan data ini hendaklah dilakukan selama 6 bulan sampai satu tahun untuk memberikan petunjuk berapa besarnya radiasi alamiah sebelum ditempat itu dibangun fasilitas tenaga nuklir. Data ini nantinya akan memberikan petunjuk apakah fasilitas-fasilitas nuklir yang dibangun nantinya, setelah datanya juga dikumpulkan, menyebabkan meningkatnya radiasi latar atau tidak. Survey dari radiasi latar hendaklah dilakukan terhadap radionuklida di sungai-sungai, di udara dan ditempat lainnya yang dianggap perlu. Haruslah diusahakan bahwa dosis radiasi latar sebelum instalasi tersebut dibangun baik bangunan itu merupakan instalasi reaktor atom, pusat-pusat penelitian yang menggunakan teknik nuklir maupun fasilitas kedokteran seperti fasilitas untuk radiografi dan radiotherapi.

Species yang hidup adalah merupakan suatu indikator yang baik dan tepat untuk suatu jangka waktu yang panjang. Adanya kenyataan-kenyataan yang kita hadapi tentang akibat radiasi adalah menjadi suatu keharusan bahwa standard keselamatan terhadap bahaya nuklir perlu ditetapkan, ditinjau kembali dan disesuaikan dengan keadaan setempat dan diusahakan agar selalu menggunakan kriteria yang mutakhir.

2. BEBERAPA KONSEP DASAR

Radionuklida yang penting terhadap lingkungan dapat dibagi kedalam 3 kategori yaitu radionuklida yang memang telah ada dialam dan merupakan sumber dari radiasi latar dan mempunyai paruh umur yang panjang. Radionuklida yang masuk kedalam kategori kedua ialah Radionuklida sebagai hasil dari "fission products" dengan paruh umur antara beberapa jam sampai sekitar 30 tahun. Radionuklida yang merupakan unsur-unsur yang esensial bagi organisme dapatlah kita masukkan kedalam kategori ketiga.

2.1. Sampah-sampah radioaktif

Sumber-sumber yang utama dari radiasi latar adalah seri peluruhan dari uranium, thorium dan actinium. Radiasi intern terhadap manusia dan hewan disebabkan adanya ^{40}K , ^{14}C , ^{226}Ra , dan ^{228}Ra yang terdapat didalam tubuhnya. Radon-222 dan ^{220}Rn adalah merupakan radiasi in-

tern akibat pernafasan. Radiasi dari radionuklida ini bergantung kepada tempat dimana organisme hidup dan bergantung pula kepada dietnya.

Radionuklida yang dihasilkan dengan cara fisi uranium adalah diantara radionuklida yang dibuat oleh manusia yang penting dan merupakan sumber radiasi lingkungan yang berasal dari "fall out" atau berasal dari sampah-sampah radioaktif dari pusat-pusat reaktor. Dengan ^{131}I sebagai pengecualian radionuklida dari kategori ini bukanlah merupakan zat yang esensial bagi suatu organisme. Semua isotop ini akan masuk kedalam sistem ekologis dan akan beredar didalam sistem ini. Cesium-137 mempunyai sifat metabolik yang sama dengan kalium sedangkan strontium sama sifatnya dengan kalsium. Sifat kimianya yang demikian ini dan paruh umurnya yang panjang adalah merupakan pencemaran lingkungan yang banyak memintakan perhatian.

Radionuklida yang dibuat oleh manusia sebagai hasil "activation product" atau ledakan nuklir diantaranya adalah ^{32}P , ^{45}Ca , ^{59}Fe dan sebagainya (Tabel 1). Radionuklida ini merupakan isotop-isotop yang esensial bagi tanaman dan hewan termasuk manusia. Isotop ini sering sekali dipakai didalam penelitian metabolisme sesuatu organisme, populasi maupun komunitas. Hasil interpretasi dari data-data yang diperoleh akan dapat memberikan penjelasan-penjelasan mengenai proses-proses fisiologis dan sifat-sifat morfologis dari organisme hidup. Sebagian dari unsur ini akan masuk pula kedalam ekosistem.

Sebagian besar sampah-sampah radioaktif berasal dari reaktor nuklir. Sebagian lagi (didalam jumlah yang relatif kecil) berasal dari instalasi-instalasi yang menggunakan radionuklida sebagai teknik kerja seperti rumah sakit atau pusat-pusat penelitian. Sampah radioaktif ini dapat masuk kedalam ekosistem didalam bentuk gas, cairan atau didalam bentuk padat. Kemungkinan dapat terjadi bahwa zat-zat radioaktif ini akan mencemari tanah atau air didalam jumlah yang tinggi dan dapat mengakibatkan kerusakan-kerusakan biologis pada organisme termasuk manusia.

Untuk pembuangan sampah-sampah radioaktif bisa dipergunakan 2 metoda yang umumnya dengan cara pengenceran dan kemudian baru dibebaskan melalui air ataupun udara. Cara ini biasa dipakai terhadap gas atau cairan dengan radioaktivitas yang rendah. Cara yang kedua ialah mengkonsentrasikan sampah-sampah radioaktif terlebih dahulu dengan penguapan atau filtrasi dan kemudian disimpan dengan suatu cara untuk menghindarkan masuknya sampah-sampah ini kedalam ekosistem.

Perkataan atau istilah "fall out" mulai dikenal didalam 1945. Istilah ini mengistilahkan sampah-sampah radioaktif akibat ledakan nuklir yang mencemari permukaan bumi. Atom-atom yang **terbanyak** terbentuk akibat ledakan nuklir ini adalah yang mempunyai berat atom antara 80 dan 108 (seperti ^{90}Sr) atau yang mempunyai berat atom antara 126 dan 154 (seperti ^{137}Cs dan ^{131}I).

2.2. Faktor Konsentrasi

Konsentrasi dari suatu radionuklida dinyatakan dalam kesatuan radioaktivitas untuk setiap kesatuan berat dari suatu organisme atau alat tubuh atau tenunan (mci/kg). Dapat pula dinyatakan sebagai perbandingan antara

aktivitas suatu radionuklida dan kesatuan berat dari carriernya yang stabil. Untuk strontium kita kenal, misalnya, pci ^{90}Sr per gram kalsium dan untuk kesatuan cesium kita kenal akan pci ^{137}Cs per gram kalium.

Kemampuan suatu organisme didalam media air untuk mengumpulkan zat-zat radioaktif dinyatakan dengan perbandingan dari radioaktivitasnya terhadap radioaktivitas itu dari media dimana organisme itu hidup. Parameter ini disebut faktor konsentrasi (concentration factor) yaitu perbandingan antara konsentrasi dari radionuklida didalam organisme dan yang terdapat didalam suatu larutan dan biasanya dinyatakan dengan :

$$K = \frac{C}{C'}$$

dimana C adalah konsentrasi dari radionuklida didalam organisme akwatik dan C' konsentrasi dari radionuklida yang sama didalam media cairan (Polikarpov, 1966).

2.3. Distribusi radionuklida didalam ekosistem

Jalan radionuklida untuk sampai kepada manusia bergantung kepada sifat-sifat radionuklidanya dan keadaan pencemarannya. Radionuklida yang melekat pada permukaan tanaman yang dapat dimakan manusia, maka rantai makanan ialah : tanaman --- manusia. Radionuklida yang lain mungkin mencemari tanah. Dari tanah radionuklida ini diserap oleh tanaman melalui akar kemudian sampai kepada hewan sampai kepada manusia karena memakan atau minum bahan-bahan yang berasal dari hewan. Didalam proses ini mungkin hambatan metabolik (metabolic barriers) mencegah sampainya radionuklida ketempat-tempat atau tenunan-tenunan yang mudah dirusakkan.

Radionuklida sebagai sampah-sampah radioaktif dapat sampai kepada manusia terutama melalui makanan. Tanaman dapat dicemari oleh radionuklida dengan berbagai cara. Tanaman dapat langsung dicemari oleh radionuklida yang ada didalam atmosfer yang melekat pada daun-daun, buah-buahan maupun biji-bijian. Radionuklida dapat dihanyutkan oleh hujan dan kemudian diserap oleh akar-akar dari tanaman pada permukaan tanah. Radionuklida dapat pula mengendap dan masuk kedalam tanah dan kemudian sampai kepada tanaman karena penyerapan oleh akar. Penyerapan radionuklida yang ada didalam tanah oleh tanaman adalah suatu proses yang tidak efisien. Radionuklida yang masuk kedalam tanah biasanya telah diencerkan dan kadang-kadang terikat dengan kuat kepada mineral-mineral didalam tanah sehingga sukar untuk diabsorpsi oleh tanaman. Hasil radionuklida dari "fission products" didalam tanah bermigrasi dengan sangat lambat. Dari keadaan ini maka terjadilah bahwa tanaman dengan akar-akar yang terdapat pada permukaan tanah akan menyerap sebagian besar dari radionuklida yang mencemari sesuatu daerah dan radionuklida dengan paruh umur yang pendek akan "kehilangan" radioaktivitasnya sebelum dapat diserap.

Radionuklida yang mencemari tanaman dapat sampai kepada manusia dengan cara langsung bila ia makan tanaman (sayuran, buah-buahan) atau dengan cara tidak langsung bila ia makan bahan makanan yang berasal

dari hewan, seperti daging, susu dan telur (Gambar 1). Hewan dipadang rumput dapat sangat efektif mengumpulkan radionuklida yang mencemari padang (rumput-rumputan) dan mengkonsentrasikannya didalam tubuhnya. Faktor-faktor seperti sifat-sifat metabolik dari radionuklida dan cara pemberian makanan hewan ternak akan mempengaruhi jumlah radionuklida yang terkumpul didalam tubuhnya.

Sampah-sampah radioaktif dapat pula sampai kepada manusia melalui rantai makanan akwatik (Gambar 2). Radionuklida yang mencemari air permukaan dapat langsung sampai kepada manusia atau terlebih dahulu melalui organisme akwatik seperti ganggang, plankton, moluska, crustaceae dan ikan (Kaye and Ball, 1962). Suatu ekosistem bukan hanya merupakan himpunan dari tanaman, hewan dan mikroorganisme yang kebetulan hidup didalam suatu daerah dan mempunyai toleransi yang baik terhadap iklim sekelilingnya. Yang penting dari suatu komunitas ekologis ialah bahwa anggota-anggotanya bergantung satu sama lain. Didalam banyak hal mereka tidak dapat hidup tanpa hadirnya anggota komunitas yang lain. Peranan yang dilakukan oleh setiap species didalam komunitas itu sangat penting untuk mengikuti dan mengetahui pengaruh dari suatu radiasi (Odum, 1971).

2.4. Efek radiasi terhadap ekosistem.

Problema yang dihadapi oleh suatu organisme, termasuk manusia, terhadap efek radiasi adalah suatu problema *in vivo* yang menyangkut dinamika dan interaksi dari komponen-komponen yang membentuk tenunan dan membentuk suatu sistem. Dengan mempelajari perubahan-perubahan fisiologis yang berhubungan rapat dengan perubahan-perubahan morfologis setelah radiasi dapatlah difahami pengaruh-pengaruh dan fungsi-fungsi yang saling berhubungan dari suatu tenunan dari suatu sistem.

Dosis radiasi yang di terima oleh suatu organisme termasuk manusia yang disebabkan oleh radionuklida yang terkumpul didalam tubuh berbanding lurus dengan lamanya radionuklida itu "tersimpan" didalam tubuh organisme tersebut. Strontium-90 yang terkumpul didalam tulang seperti halnya kalsium diekskresikan dari tubuh sangat lambat. Akibatnya radionuklida ini akan lebih merusak dari pada ^{137}Cs yang terkumpul didalam tenunan yang lunak dan jauh lebih cepat diekskresikan keluar tubuh.

Kerusakan yang ditimbulkan oleh sebuah radionuklida akan meningkat bila zat ini terkonsentrasi didalam alat tubuh tertentu. Jodium-131 misalnya, yang masuk kedalam tubuh hampir seluruhnya terkumpul didalam kelenjar thyroid. Didalam percobaannya Sri Asminah dan Djojosoebagio (1970) berhasil melakukan radiosurgery total terhadap kelenjar thyroid dari anak-anak ayam berumur 1 bulan dengan memberikan ^{131}J sebanyak 200 uci secara sub-cutanea. Sebaliknya Djojosoebagio dan Turner (1964) dapat menentukan kerja kelenjar thyroid didalam hewan-hewan percobaan dengan memberikan ^{131}J dengan dosis rendah. Demikian pula aktivitas tubuh dapat memberikan suatu efek terhadap terkumpulnya radionuklida didalam alat-alat tubuh (Djojosoebagio, 1965; 1966; 1968) atau ekskresi radionuklida dari tubuh (Djojosoebagio, 1972). Berdasarkan hal-hal tersebut diatas rasanya tidak terlalu berlebihan bila

dinyatakan bahwa untuk manusia radionuklida yang berbahaya secara potensial ialah ^{131}J , ^{90}Sr , ^{89}Sr , ^{137}Cs dan ^{14}C .

Masalah-masalah yang dihadapi oleh pencemaran lingkungan oleh zat-zat radioaktif dapat disederhanakan dengan Gambar 3 (Comar and Lengemann, 1967). Input adalah merupakan pencerminan terhadap lingkungan dan output adalah suatu kerusakan-kerusakan dari suatu sistem ekologis ataupun perubahan patologis pada manusia, hewan ataupun organisme lainnya. Perubahan dari input menjadi output melewati suatu jalan yang tersusun dan mempunyai interaksi satu sama lain yang merupakan fungsi dari hewan maupun tanaman didalam suatu komunitas. Perubahan-perubahan patologis yang diderita oleh manusia melewati tahap ini umumnya didalam bentuk suatu rantai makanan.

Radiasi dapat pula merubah atau mengarahkan suatu suksesi ekologis (ecological succession). Efek spesifik bergantung dari macam, dosis dan laju (rate) dari suatu radiasi. Dengan dosis yang rendah dan suatu pendedahan (exposure) yang lama, suksesi mungkin merubah atau memodifikasi species tertentu lebih banyak dari species yang lainnya. Dengan demikian akan terjadilah suatu perubahan dari suatu suksesi ekologis yang berlainan dari pada asalnya. Karena beberapa radionuklida menjadi terkonsentrasi didalam rantai makanan, organisme adalah lebih baik sebagai bahan-bahan indikator (monitor) dari pada bahan lain yang terdapat dilingkungan seperti tanah dan air.

Disamping radionuklida dianggap sebagai pencemar lingkungan, radioekolog ¹⁾ juga menggunakan radionuklida sebagai suatu alat untuk teknik untuk menentukan struktur dan fungsi dari sistem ekologis. Data dan keterangan dasar yang diperoleh ini akan memberikan bantuan yang penting didalam memperkuat pendapat-pendapat dari peneliti-peneliti yang tidak menggunakan teknik nuklir (non-nuclear technologist) terhadap masalah-masalah lingkungan.

1) Suatu ilmu baru dan muda sejalan dengan berkembangnya ilmu pengetahuan nuklir. Meskipun ilmu ini mempelajari lingkungan, ilmu ini tidak masuk sub-discipline ekologi tetapi masuk sub-discipline dari Radiobiologi.

3. ABSORBSI DAN AKUMULASI RADIONUKLIDA OLEH TANAMAN TERESTRIAL

Bermigrasinya radionuklida kedalam tanaman darat dapat disebabkan oleh 2 keadaan. Pertama dari radionuklida yang terkumpul didalam tanah dan kedua dari radionuklida yang mencemari tanaman dari atmosfer dan tidak terlebih dahulu terkumpul didalam tanah. Pencemaran yang kedua ini biasanya disebut pencemaran langsung (direct contamination). Data yang banyak didapat ialah dari pengamatan pengumpulan yang kumulatif didalam tanah yang kemudian mencemari tanaman yang ada hubungannya dengan rantai makanan yang penting pada manusia. Absorpsi (uptake) adalah proses masuknya radionuklida kedalam organisme dan sebagai hasilnya adalah akumulasi. Absorpsi yang sebenarnya susah diperhitungkan karena proses ini akan diikuti oleh kehilangan radionuklida yang simultan. Jadi pengambilan ataupun absorpsi dan pengumpulan didalam konteks ini adalah perbedaan antara "intake" dan "loss".

3.1. Masuknya radionuklida kedalam tanaman dari penimbunan akumulatif didalam tanah.

Dari sekian banyaknya tanaman radionuklida sebagai hasil dari "Fission products", ^{90}Sr dan ^{137}Cs memegang peranan penting didalam siklus biota. Zat-zat radioaktif ini mempunyai analog kimia dengan kalsium yang merupakan komponen yang esensial dari kerangka tubuh dan dengan kalium yang merupakan yang esensial dari metabolisme intraseluler.

Strontium yang radioaktif mula-mula ada didalam bentuk strontium oksida yang kemudian dengan uap air didalam atmosfer membentuk strontium hidroksida dan akhirnya dengan CO_2 dari atmosfer membentuk strontium karbonat dan strontium bikarbonat. Setelah strontium ini terkumpul didalam tanah maka akan terjadi reaksi-reaksi kimia dan kimia fisik dengan zat-zat kimia yang terdapat didalam tanah. Sebagian membentuk komponen yang tidak larut didalam air dan sebagian lagi berada didalam bentuk ion yang mudah larut didalam air. Ion-ion strontium ini mempunyai kemampuan untuk berpisah tempat dengan aktivitas kimia yang tinggi. Jumlah macam-macam strontium terdiri dari bentuk-bentuk yang larut didalam air, bentuk-bentuk yang dapat dipertukarkan (exchange forms) dan bentuk-bentuk yang tidak dapat dipertukarkan (non-exchange forms) dan bergantung kepada berbagai faktor yang mempengaruhi sifat-sifat tanahnya, antaranya iklim dan aktivitas ekonomis (penggarapan) dari manusia yang menguasai tanah itu. Ion-ion strontium yang didalam keadaan larut didalam air akan mudah diserab oleh tanaman. Strontium mempunyai mobilitas yang lebih baik dari pada cesium (Warlton, 1963).

Sifat dari ^{90}Sr dan ^{137}Cs didalam tanah dipengaruhi oleh beberapa zat kimia. Bila didalam tanah dijumpai kation NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} , H mempercepat mobilitas dari strontium dan cesium didalam tanah. Ion SO_4^{2-} dan PO_4^{3-} memperendah mobilitasnya. Ion-ion Sr^{2+} kurang mengalami hidratisasi dari pada ion-ion Ca^{2+} dan karenanya Sr^{2+} akan lebih mudah diserab (diabsorb) oleh mineral didalam tanah. Perbedaan-perbedaan dari besar atau kecilnya hidratisasi pada ion-ion juga akan mempengaruhi laju penyerapan ion-ion ini oleh tanaman (Polyakov, 1973).

Mudah atau tidaknya ^{137}Cs diserab oleh tanaman bergantung kepada susun-

an tanah dimana unsur-unsur ion terkumpulkan. Pada daerah dimana tanahnya banyak mengandung mineral (mineral soil) dan relatif sedikit mengandung zat-zat organik ^{137}Cs akan susah atau sedikit diserab oleh tanaman. Hal ini disebabkan karena ^{137}Cs akan terikat pada "lattice" dari "clay mineral". Bila didalam tanah ini konsentrasi kalium tinggi maka penyerapan ^{137}Cs akan makin berkurang. (Fredrikson *et al*, 1966). Pada beberapa daerah tropis didapati tanah laterit (lateritic soil) yang mengandung sedikit clay mineral. Akibatnya ^{137}Cs akan mudah diserab oleh tanaman.

Tipe tanah ketiga ialah tanah organik (organic soil). Dari tanah ini ^{137}Cs lebih mudah dan lebih bebas masuk kedalam tanaman dari pada dari tanah yang banyak mengandung mineral. Hal ini disebabkan karena sedikitnya "clay mineral" yang terdapat didalam tipe tanah ketiga ini.

Radionuklida yang lain tidak banyak diberikan perhatian. Hal ini disebabkan 2 hal. Pertama disebabkan karena paruh umurnya yang pendek, seperti ^{137}J atau karena jumlah diserab dari tanah sangat sedikit sekali (sering dari uranium dan thorium) sehingga tidak menimbulkan perubahan-perubahan yang mengkhawatirkan.

3.2. Pencemaran tanaman secara langsung.

Sesudah fission products yang berada diatmosfir sampai kepada tanaman, maka radionuklida dapat melekat pada permukaan tanaman. Radionuklida yang mencemari tanaman pada permukaan daun-daun hanya sebagian kecil saja akan diserab kedalam tunasan sedangkan sebagian besar akan hanyut oleh hujan atau oleh proses-proses lainnya. Hilangnya radionuklida ^{90}Sr dan ^{137}Cs didaerah kering dapat pula disebabkan oleh terjadinya perubahan-perubahan pada kutikulanya (Moorby, 1963). Hal yang sama berlaku pula untuk ^{131}J (Loutit, 1960). Didalam keadaan panas ^{131}J akan meninggalkan daun-daun dengan cara penguapan lebih baik dari pada ^{90}Sr (Marter, 1963; Martin, 1963; 1964; 1965).

Besarnya butir-butir (particles) yang membentuk komponen-komponen radioaktif berpengaruh pula terhadap retensi zat-zat ini pada permukaan daun-daun. Butir-butir dengan garis tengah 40μ lebih sulit tinggal pada permukaan daun. Pada umumnya terdapat hubungan yang terbalik antara besarnya butir-butir dengan retensi pada permukaan daun. Butir-butir yang kecil akan lebih banyak tinggal pada permukaan daun dari pada butir-butir yang lebih besar (Romney *et al*, 1963; Russel and Passingham, 1961).

Pengamatan terhadap hasil "fission products" didalam bentuk gas yang mencapai permukaan bumi telah pula dilakukan oleh Chamberlain (1960; 1966). Ia mengemukakan bahwa radionuklida akan lebih banyak mencemari pinggir-pinggir daun dari pada permukaan daun-daun yang halus.

Radionuklida yang melekat pada permukaan tanaman ini kemudian akan sampai kedalam tunasan setelah diserab oleh bagian-bagian dimana zat-zat ini melekat dan sebagian lagi akan hanyut dari daun-daunan dan akan sampai pada akar-akar permukaan yang terdapat pada permukaan tanah dan diserab oleh tanaman melalui akar-akar tersebut. Jadi disini penyerapan radionuklida tidak menanti terkumpul terlebih dahulu didalam ta-

nah tetapi langsung diserab. Pada umumnya jika konsentrasi dari kalsium didalam tanah atau padang rumput adalah rendah sehingga konsentrasi kalsium didalam tanaman juga menjadi rendah maka akan dijumpai bahwa ^{90}Sr akan mudah diserab oleh tanaman.

Cesium-137 yang sampai pada permukaan tanah pada padang rumput akan mudah diserap oleh tanaman disebabkan pada permukaan tanah ini banyak mengandung zat-zat organik. Hal ini memberikan refleksi bahwa bahan-bahan yang berasal dari hewan mempunyai konsentrasi ^{137}Cs lebih tinggi pada hewan-hewan yang hidup di padang rumput dengan tanahnya yang mengandung lebih banyak zat-zat organik (Frederikson *et al.*, 1966).

Proses absorpsi (penyerapan) radionuklida oleh tanaman pada persawahan akan memberikan hasil yang berbeda dari pada daerah-daerah yang tidak digenangi air atau mendapatkan irigasi. Pada tanaman yang diberikan irigasi, tanaman ini selain dapat pencemaran yang langsung dengan mengumpulkan hasil-hasil dari "fall out", mungkin pula tercemar oleh zat-zat radionuklida yang ada didalam tanah dimana tanaman ini tumbuh atau dari air yang dipakai untuk mengairi daerah itu yang didatangkan dari tempat lain. Disamping itu pengairan dapat merubah atau memodifisir pertumbuhan dan perkembangan akar-akarnya dan merubah sifat-sifat fisik, kimia dan biologis dari tanahnya. Faktor-faktor ini akan dapat mempengaruhi penyerapan unsur-unsur dari substratnya. Jadi mungkin saja terjadi bahwa pencemaran pada padi akan berbeda dengan tanaman lain yang mengalami irigasi (Menzel, 1963).

Tempat-tempat terakhir dimana radionuklida ini akan berada didalam tetapan dari tanaman dipengaruhi pula oleh proses-proses fisiologis seperti lewatnya ion-ion dari permukaan yang akan menuju kedalam saluran xylem (centripetal ions penetration), transport ion dan ini didalam xylem sampai kepuncak tanaman, konsentrasi dari ion-ion pada puncak tanaman dan sebagainya.

Dapatlah disimpulkan disini bahwa pencemaran radionuklida terhadap tanaman darat bergantung kepada keadaan geografis, keadaan hijauan yang ada dan sifat-sifat metabolik dari radionuklidanya.

4. AKUMULASI RADIONUKLIDA OLEH HEWAN TERRESTRIAL

Orang telah sadar didalam menghadapi kenyataan bahwa makanan yang berasal dari hewan adalah salah satu bagian didalam rantai makanan yang membawa radionuklida kepada manusia. Oleh karenanya tidak sedikit pengamatan dan penelitian telah dilakukan terhadap metabolisme dari radionuklida tertentu didalam hewan ternak. Demikian pula penggunaan yang intensif dari radionuklida didalam bidang Ilmu Kedokteran Nuklir, telah memberikan rangsangan untuk melakukan pengamatan dan penelitian terhadap metabolisme zat-zat radioaktif yang sering dipergunakan didalam diagnostik, dengan menggunakan hewan-hewan laboratorium sebagai hewan percobaan yang hasilnya kemudian diekstrapolir pada manusia.

Didalam mempelajari akumulasi radionuklida oleh hewan-hewan, tiga hal yang utama perlu diperhatikan yaitu : (1) jalan yang ditempuh oleh radionuklida untuk masuk kedalam tubuh hewan; (2) transport radionuklida didalam

tubuh; (3) penyebaran dan retensi dari radionuklida didalam tubuh. Dari penelitian-penelitian didalam bidang ini, kita dapat mengambil kesimpulan adanya perbedaan-perbedaan dari species hewan didalam akumulasi radionuklida didalam tubuhnya dan akumulasi ini bergantung kepada sumber-sumber makanannya. Ini menunjukkan bahwa saluran makanan adalah merupakan jalan yang terpenting bagi hewan terrestrial.

4.1. Jalan masuk radionuklida pada hewan.

Tempat absorpsi yang utama didalam tractus digestivus dari hewan carnivora dan omnivora adalah usus halus. Pada herbivora dengan lambung tunggal, disamping usus halus, usus besar dipakai pula sebagai tempat untuk absorpsi. Pada hewan-hewan ruminansia absorpsi dari berbagai bahan makanan terjadi pada berbagai kompartemen dari lambung (Wiseman, 1964; Eve, 1966).

Penelitian-penelitian mengenai absorpsi dari radionuklida pada tempat-tempat yang berbeda dapat dilakukan dengan menggunakan ferrioksida (Bergeim, 1926) dan chromium oksida (Corbett *et al.*, 1958). Didalam penelitiannya Cragle *et al.* (1965) mengemukakan bahwa 70 - 80% radioaktif jodium yang diberikan per oral pada sapi perah diabsorb melalui rumen dan recticulum. Moore dan Comar (1962) didalam meneliti absorpsi ^{137}Cs menemukan bahwa 1 jam setelah penyuntikan radionuklida ini kedalam berbagai lumen dari usus yang diikat, ^{137}Cs diserap oleh lambung sebanyak 6.6%; oleh duodenum 77%; oleh jejunum 76%; oleh ileum 78%; oleh cecum 13% dan oleh colon 39%. Data ini memberikan gambaran kepada kita bahwa radionuklida ini dapat diabsorpsi pada seluruh bagian dari usus. Paling efisien dari absorpsi ini ialah didalam duodenum, jejunum dan ileum.

Pengaruh keadaan kimianya dari suatu radionuklida juga akan mempengaruhi absorpsi oleh usus. Ruthenium biasa dicampur dengan asam nitrit (nitric acid) didalam suatu pengelolaan kimia dari suatu sumber uranium yang mengandung fission products dan akan membentuk suatu derivatif nitrosyl-ruthenium. Didalam bentuk ini ruthenium akan merupakan suatu sampah radioaktif. Bila radioruthenium yang carrier free diberikan per oral kepada kelinci didalam bentuk chlorida, dioksida dan kompleks nitrato nitrosyl-ruthenium maka akan didapati absorpsi sebanyak 3% didalam bentuk chlorida dan oksida dan 13% didalam bentuk nitrato nitrosyl-ruthenium (Bruce, 1963). Percobaan ini menunjukkan pula bahwa meskipun ruthenium oksida adalah tidak larut tetapi cairan lambung adalah cukup asam untuk melarutkan zat ini dan merubahnya menjadi bentuk chlorida yang kemudian dapat diserap oleh saluran usus.

Strontium-90 titanat akan lebih sedikit atau kurang mengalami retensi didalam tulang dibandingkan dengan $^{90}\text{SrCl}_2$ (McClellan and Bustad, 1964).

Komposisi dari diet juga akan memberikan pengaruh terhadap absorpsi radionuklida. Didalam suatu diet dimana konsentrasi kalsium rendah atau kurang kalsium maka strontium akan lebih mudah diserap oleh usus. Didalam pengamatannya pada penduduk pedesaan di Venezuela, Amerika Selatan, Djojosoebagio (1972), dengan menggunakan "gell powder dan electroplating techniques", mengemukakan bahwa ^{55}Fe dan ^{59}Fe didalam bentuk sulfat akan lebih baik diserap bila diet mengandung cukup pro-

tein hewan maupun asam askorbat. Sebaliknya diet yang hanya terdiri dari karbohidrat dan sayuran saja akan mengurangi absorpsi besi.

Demikian pula halnya dengan ^{65}Zn . Retensi dari radionuklida ini didalam tubuh akan berkurang bila konsentrasi Zn didalam diet ditingkatkan. Sebaliknya bila suatu mengalami defisiensi Zn, retensi ^{65}Zn didalam tubuh akan meningkat (Furchner and Richmond, 1962; Zeigler *et al.*, 1964).

Selain keadaan diet ikut memegang peranan didalam absorpsi dan retensi suatu radionuklida, keadaan fisiologis dari individu ikut pula memegang peranan. Ini jelas sekali terlihat terhadap absorpsi dan retensi ^{55}Fe dan ^{59}Fe . Absorpsi dan retensi zat radioaktif ini akan meningkat didalam keadaan defisiensi besi, kehamilan, anemia dan meningkatnya erythropoiesis. Bila pengambilan besi didalam tenunan meningkat, menurunnya erythropoiesis dan meningkatnya fosfat dan fitat (phytate) didalam diet maka absorpsi dan retensi ^{55}Fe dan ^{59}Fe akan menurun (Brown, 1962, Djojosebagio, 1974).

Umur (Gran, 1960) dan perbedaan species (Richmond, 1958; McClellan *et al* 1961) juga mempengaruhi absorpsi radionuklida. Pada hewan-hewan yang muda ^{89}Sr lebih banyak diserap dibandingkan dengan hewan yang telah tua usianya. Mereka juga mengemukakan bahwa absorpsi total dari ^{137}Cs mereka jumpai pada mencit, tikus, anjing, kera dan manusia. Pada hewan ruminansia absorpsi ^{137}Cs kurang sempurna.

Jalan yang lain bagi radionuklida untuk sampai kedalam tubuh hewan terrestrial dan manusia ialah melalui tractus respiratorius. Sampainya radionuklida kedalam tubuh manusia melalui alat pernapasan adalah suatu masalah tersendiri bagi pembangunan industri-industri yang menggunakan tenaga atom sebagai sumber energi. Sifat-sifat aerosol radioaktif yang dapat mengganggu kesehatan manusia melalui saluran pernafasan adalah besar dari butir-butirnya, penyebaran, kemampuan untuk larut, kekuatan reaktivitas kimia dan sifat-sifat elektrostatisnya.

Penelitian didalam bidang ini telah banyak dilakukan dengan menggunakan hewan laboratorium sebagai hewan percobaan diantaranya dengan uranium (Fish, 1961) thorium (Hodge, *et al.*, 1960; Boecker *et al.*, 1963); plutonium (Bair and McClanahan, 1961; Bair and Willard, 1963) polonium (Morrow and Gibb, 1958) dan radon (Miller, 1964; Lie, 1964; Stava, 1965); Pada umumnya butir radionuklida yang kecil akan melekat diseluruh saluran pernafasan. Makin besar suatu butir-butir maka perlekatan pada saluran pernapasan akan berkurang. Butir-butir yang lebih besar dari 10 μ tidak akan dapat melekat dan melewati alveoli dan akan terkumpul pada bagian saluran pernapasan bagian atas dan kemudian dibersihkan dari daerah itu dengan cara-cara fisiologis yang lainnya. Karena kemampuan untuk menyaring dari rongga hidung adalah penting sekali. Sebagaimana diketahui sebagian besar dari radionuklida di-atmosfir akan membentuk suatu agglomerasi dengan zat-zat lain (Standard, 1959).

Dari segi fisiologis pembuangan radionuklida dari saluran pernapasan (lung clearance mechanism) dapat terjadi dengan 3 kemungkinan. Pertama pembuangan radionuklida ini dilakukan oleh rambut getar dan lendir yang terdapat didalam saluran pernapasan. Gerakan dari transport butir-butir akan

terjadi dari bronchiolus terminalis menuju ke bronchus dan akhirnya sampai ke trachea. Dari sini akan diteruskan kesistim lain yaitu melalui tractus digestivus (saluran makan).

Cara yang lain ialah radionuklida yang larut akan berdifusi melewati membran alveoli dan masuk kedalam pembuluh darah. Dan cara yang terakhir ialah dengan cara phagocytosis. Setelah mengalami pangsakan dengan cara phagocytosis maka radionuklida ini akan dibawa kedalam saluran lymphhe atau dikumpulkan didalam kelenjar lymphhe (Casarett, 1960; Fenn, 1921).

Selain melalui saluran pencernaan saluran makanan dan saluran pernapasan radionuklida dapat pula masuk kedalam tubuh hewan terrestrial dan manusia melalui kulit, meskipun jalan ini tidak memegang peranan yang penting.

Tritium oksida dapat diabsorb melalui kulit dengan baik. Didalam suatu atmosfer yang terdapat uap air dengan tritium, tritium akan dapat masuk kedalam tubuh melalui pernapasan dan melalui kulit. Masuknya tritium oksida melewati kulit bergantung kepada tekanan air, waktu pendedahan (exposure) dan temperatur kulit (Lobitz and Daniels, 1961; Delong *et al.*, 1954; Pinson and Langham, 1957).

Kemampuan ^{131}J untuk menembus kulit telah pula diteliti pada manusia (Tas and Feige, 1958; Kutzim, 1956) dan pada hewan (Wood *et al.*, 1965). Dua sampai 10% ^{131}J dengan konsentrasi sebesar 2% dijumpai didalam air seni dan kelenjar thyroide bila zat ini diusapkan pada kulit tangan manusia selama 14 jam. Bila jodium yang sama diusapkan pada kulit domba maka 2-14% dari dosis yang diberikan akan didapati didalam kelenjar thyroide. Penyerapan uranium melalui kulit dapat terjadi dengan mudah dan dapat menimbulkan tanda-tanda keracunan yang akut. Bentuk-bentuk yang mudah diserap oleh kulit ialah dalam bentuk uranyl nitrate; uranyl fluoride; uranyl pentachloride; uranyl trioksida; natrium diuranate dan ammonium diuranate (Orcutt, 1949).

4.2. Transport radionuklida didalam tubuh.

Sebagaimana diketahui radionuklida mempunyai sifat-sifat kimia yang sama dengan unsur-unsurnya (isotop) yang stabil. Jadi proses-proses metabolisme didalam tubuh dari isotop yang radioaktif adalah sama dengan isotopnya yang stabil. Pengetahuan fisiologi dan biokimia dari mineral didalam tubuh hewan dan manusia maupun tumbuhan adalah penting untuk dapat mengamati perjalanan radionuklida didalam tubuh.

Pada umumnya unsur-unsur ini baik yang stabil maupun yang radioaktif berada didalam peredaran darah (plasma) didalam beberapa bentuk, ialah didalam bentuk ion yang bebas, dalam ikatan dengan protein atau membentuk ikatan-ikatan anorganik maupun organik dengan berat molekul yang rendah. Cesium-137 akan berada dalam bentuk ion bebas sedangkan ^{90}Sr dan ^{45}Ca akan terdapat didalam semua bentuk yang disebutkan diatas.

Kalsium yang bukan radioaktif akan berada didalam tubuh didalam keadaan keseimbangan antara beberapa kompartement tulang, cairan tubuh, usus dan ginjal (Djojosoebagio, 1964; McLean and Urist, 1961). Hal yang sama akan terjadi pula pada ^{90}Sr (McClean and Hastings, 1935). Besi-55 dan 59 mempunyai sifat-sifat yang sama dengan besi yang stabil dan ter-

ikat kepada transferin, sebuah β -globulin (Laurell, 1947; Jandl and Katz, 1963; Djojosoebagio, 1974).

Didalam bentuk dan ikatan masing-masing yang spesifik, radionuklida seperti juga isotopnya yang stabil akan mengalami proses fisiologis dan biokimia yang kemudian dapat dikumpulkan didalam sesuatu alat tubuh tertentu. Radionuklida ini akan dipergunakan untuk proses-proses yang spesifik seperti ^{131}J akan terkumpul didalam kelenjar thyroid untuk pembentukan hormon thyroxin; ^{59}Fe untuk proses erythropoiesis; ^{45}Ca dan ^{90}Sr untuk pembentukan tulang dan sebagainya. Bila zat-zat itu bekerja dan kemudian dirusak didalam tubuh, maka radionuklida dapat dikeluarkan dari tubuh melalui air seni, faeces, keringat ataupun pernapasan dan sebagian lagi akan dipakai kembali oleh tubuh (recycling) untuk membentuk zat-zat yang sama.

4.3. Retensi radionuklida didalam tubuh

Bergantung kepada afinitasnya yang spesifik dari radionuklida terhadap alat-alat tubuh tertentu maka akan didapati perbedaan konsentrasi yang berbeda (penyebaran relatif, relative distribution) didalam berbagai alat tubuh. Penyebaran relatif ini akan bergantung kepada waktu, Strontium, radium dan kalsium akan terkumpul didalam tulang, meskipun penyebaran didalam tulang inipun tidak merata. Strontium-90, misalnya akan terkumpul dipermukaan dari kristal tulang, pada tulang yang baru dibentuk dan disekitar Haversian canals (Comar and Wasserman, 1964).

Cesium-137 akan terkumpul didalam otot-otot. Percobaan yang dilakukan pada babi dan ayam (Ekman, 1961) menunjukkan bahwa mula-mula ^{137}Cs akan terkumpul lebih banyak pada otot diaphragma tetapi 4 minggu setelah pemberian radionuklida itu per oral ^{137}Cs akan banyak terkumpul pada otot-otot lain, terutama pada otot-otot yang banyak dipakai untuk bekerja.

Radioaktif cerium akan banyak terkumpul didalam hati dan didalam dosis yang toxic dapat menyebabkan degenerasi lemak pada hati (Magnusson, 1963).

Lamanya retensi radionuklida didalam tubuh bergantung kepada besarnya tubuh. Bila besar tubuh meningkat maka paruh umur biologik juga meningkat (Tabel 2). Ekskresi dari radionuklida dipengaruhi pula oleh beberapa faktor fisiologis lainnya, antaranya umur (Pendleton *et al.*, 1965); kehamilan (Bengtsson *et al.*, 1964) dimana ekskresi ^{137}Cs menurun setelah melahirkan. Demikian pula iklim dilaporkan mempengaruhi ekskresi ^{137}Cs . Didalam musim dingin ekskresi ^{137}Cs nampak menurun dengan paruh umur biologik 68 hari pada musim panas dan 130 hari pada musim dingin (Bani, 1966). Demikian pula perbedaan geografis menunjukkan adanya perbedaan kecepatan ekskresi ^{137}Cs dari dalam tubuh (Liden, 1964). Hal ini mungkin disebabkan karena perbedaan diet dan berakibat terjadinya laju metabolisme.

Pola yang sama akan didapati didalam ekskresi dan retensi dari berbagai radionuklida. Faktor-faktor yang lain seperti kerja, penyakit, macam diet dan tingkat keaktifan fisiologis akan mempengaruhi pula proses retensi dan ekskresi dari radionuklida didalam tubuh hewan maupun manusia.

Tidak akan jauh menyimpang bila kita harapkan bahwa data yang akan kita peroleh di daerah tropis dengan iklim dan diet yang berbeda dengan daerah dingin, akan memberikan hasil yang berbeda pula.

5. AKUMULASI RADIONUKLIDA OLEH ORGANIK AKWATIK

Salah satu hal yang cukup penting dan mendapatkan perhatian oleh ilmu pengetahuan di abad atom ini ialah untuk memberikan gambaran atau setidaknya-tidaknya mengira sampai berapa jauh resiko yang akan dialami oleh organisme akwatik terhadap pencemaran radioaktif. Sebagaimana kita sadari, makin meningkatnya jumlah penduduk di bumi ini maka sumber makanan yang masih luas dan relatif belum intensif dijamah ialah laut dan lautan. Jadi produktivitas dari lautan adalah merupakan suatu aspek ekonomis.

Laut lepas selain dapat dicemari oleh radionuklida langsung dari atmosfer, dapat pula dicemari oleh radionuklida dari darat. Transport radionuklida dari darat ke laut dipengaruhi oleh hujan, luas permukaan yang digenangi (dihanyutkan) air, kekuatan ikatan antara radionuklida dengan tanah, karang dan tanaman yang menutupi suatu daerah daratan dan juga dipengaruhi oleh laju erosi tanah yang masuk kedalam sungai-sungai dan kemudian ke laut serta tanaman laut lainnya.

5.1. Akumulasi radionuklida oleh tanaman akwatik.

Tanaman akwatik mengambil zat-zat kimia dan radionuklida dengan "absorpsi" langsung dari air disekelilingnya. Unsur-unsur langka (trace elements) ini akan dapat diasimilasikan oleh tanaman laut bila berada didalam bentuk ion didalam air dan terjadi suatu reaksi pertukaran ion pada permukaan organisme tersebut (Johnston, 1964). Jika unsur langka ini telah dipertukarkan dengan ion lain pada permukaan organisme maka akan terjadi beberapa kemungkinan. Pertama unsur ini dapat dipertukarkan kembali kedalam air dengan unsur lain. Kedua, dapat terbentuk kompleks pada permukaan organisme dan akan lebih lama berada pada permukaan dan kemungkinan terakhir akan masuk kedalam organisme.

Didalam percobaannya dengan menggunakan tanaman air tawar Wlodek (1968) mengemukakan bahwa ^{137}Cs mula-mula ada didalam ikatan yang tidak kuat pada permukaan tanaman dan kemudian ikatan ini akan terlepas. Pengumpulan ion-ion langka seperti Cu, Fe dan Zn dimasukkan kedalam sel melewati membran sel dari larutan berkonsentrasi rendah tanpa memerlukan energi dari sel. Didalam proses transport kedalam sel ini nampak tidak ada hambatan terhadap difusi. Laju pemasukkan unsur-unsur ini bergantung kepada jumlah tempat yang masih tersedia didalam sel. Demikian pula sifatnya terhadap radionuklida kobalt dan mangan. Radionuklida lainnya seperti zirconium, niobium dan cerium terkumpul pada tanaman laut dengan absorpsi pada permukaan luarnya. Hanya sejumlah kecil saja yang akan masuk kedalam sel (Seltman, 1958; Kyker, 1962). Radionuklida seperti zirconium, ruthenium dan cerium akan membentuk suatu ikatan atau suatu kompleks yang kuat didalam bentuk larutan atau koloid dengan permukaan tanaman seperti dengan ganggang. Unsur-unsur ini juga akan terikat pada permukaan plankton dan sampah-sampah organik lainnya.

Ganggang laut dan phytoplankton tidak memegang peranan yang penting didalam memindahkan radionuklida terutama ^{90}Sr , ^{137}Cs dan ^{65}Zn kepada hewan-hewan (Chipman, 1958, Rice 1956).

5.2. Akumulasi radionuklida oleh hewan akwatik.

Bunga karang (sponge) mengambil makanan atau unsur langka tidak dalam bentuk larutan tetapi didalam bentuk butir-butiran. Butir-butiran ini dihanyutkan oleh suatu aliran air yang lemah yang disebabkan oleh sel-sel bunga karang disebut choanocyte. Butir-butiran ini akan mengalami pencernaan intraseluler dan butir-butiran yang tidak dapat dicernakan akan dikeluarkan keluar tubuhnya masuk kembali kedalam air.

Dari literatur yang dikumpulkan nampaknya hewan akwatik lebih banyak mengumpulkan radionuklida langsung dari lingkungannya. Pengambilan radionuklida ini dilakukan melewati permukaan tubuh, insang dan sirip. Meskipun makanan juga memegang peranan didalam distribusi radionuklida pada hewan-hewan akwatik, peranan makanan ini tidak begitu penting jika dibandingkan dengan pengumpulannya secara langsung dari lingkungannya.

Sebagai gambaran sepintas disini dapat dikemukakan data dari Townsle *et al.*, (1960) yang mengemukakan agar seekor ikan sebesar 20 gram mengumpulkan ^{65}Zn melalui makanan yang sama aktivitasnya dengan yang didapat langsung dari air sekitarnya, ikan ini harus menghabiskan 13.000 ekor crustaceae. Ini menunjukkan bahwa pengumpulan ^{65}Zn langsung dari air disekitarnya lebih efisien dari pada melalui makanan. Demikian pula percobaan dari Templeton (1962) menunjukkan bahwa ikan laut yang diberi makanan dengan ^{90}Sr makanan ini bukan merupakan sumber yang utama dari ^{90}Sr yang terdapat didalam tubuhnya.

Crustaceae mengumpulkan radionuklida lebih langsung dari lingkungan air disekitarnya dari pada dari makanan didalam bentuk ganggang yang diberi label radioaktif (Matsue and Hirano, 1956). Ikan air tawar mengumpulkan ^{45}Ca dan ^{32}P terutama sekali dari air lingkungan. Sembilan puluh empat persen dari kalsium yang diperlukannya diambil dari air lingkungan dan sisanya (6%) melalui makanan. Kalsium didalam tubuhnya dikumpulkan lebih banyak melalui insang sedangkan ^{32}P dikumpulkan pula (disamping melalui insang) melalui sirip ekor (Tomiyama *et al.*, 1955).

Ikan-ikan yang mendapatkan makanannya dalam bentuk benthos (benthos feeding fishes) yang berada didalam suatu lingkungan yang dicemari oleh radionuklida mengumpulkan radionuklida sampai 78% didalam tubuhnya dari air dan bukan dari makanan (Lebedeva, 1962).

Meskipun sebagian besar peneliti menganggap bahwa akumulasi radionuklida oleh organisme akwatik terjadi langsung dari air lingkungan, sebagian dari peneliti (tidak banyak) beranggapan bahwa rantai makanan adalah jalan yang utama terjadinya akumulasi radionuklida didalam tubuh hewan-hewan akwatik, terutama ikan (Krumholz and Foster, 1957; Davis and Foster, 1958; Williams and Pickering 1961).

Pola dari hewan-hewan laut didalam mengumpulkan unsur-unsur kimia terutama sekali terjadi langsung dari absorpsi unsur-unsur kimia ini dari air disekitarnya. Zat-zat organik yang rumit dan kompleks diakumulasikan kedalam tubuh hewan-hewan ini melalui proses pengambilan makanan secara heterotropik. Cara ini terutama sekali terjadi didalam pengumpulan zat karbon untuk hewan-hewan tersebut. Sebagian kecil dari fosfor dan un-

sur-unsur langka yang terdapat didalam molekul biologis tertentu juga dikumpulkan dengan cara proses sistim makanan heterotropik (Polikarpov, 1966).

Bila organisme akwatik mati maka zat-zat radioaktif akan dapat mengendap pada dasar laut atau perairan tawar dan tinggal disana bersama sel-sel detritisnya atau dapat pula lepas dari sel-sel yang telah rusak dan masuk kembali kedalam air lingkungan.

Pada penelitian dengan ganggang ternyata bahwa bila ganggang ini mati maka ^{137}Cs dan ^{144}Ce akan tetap tinggal pada sel-sel detritis dan bahkan sel detritis ini masih dapat menyerap ^{144}Ce dari air lingkungan. Sebaliknya ^{90}Sr akan kembali larut dalam air lingkungan bila ganggang ini mati dan rusak (Williams, 1960; Rice, 1956; Spooner, 1966).

Konsentrasi radionuklida didalam air selain tergantung kepada faktor konsentrasi dari radionuklidanya juga bergantung kepada kepadatan biomas plankton yang terdapat disesuatu daerah. Hanya biomas yang padat (10 gm/m^3 ; atau lebih) dan dengan faktor konsentrasi yang tinggi (sampai 1000) barulah organisme ini akan berarti didalam ikut menentukan konsentrasi radionuklida didalam lingkungan. Meskipun demikian, peranan organisme akwatik ini didalam proses migrasi dari zat-zat kimia tetap tidak dapat diabaikan. Peranannya adalah didalam migrasi horizontal dan vertikal, didalam proses filtrasi biologis, dalam pembentukan feces dan pada kematian-kematian dari organisme tersebut. Pada waktu terjadi migrasi ataupun organisme itu dipunahkan oleh organisme lain, maka organisme akwatik ini akan diganti dengan generasi yang baru. Dengan jalan demikian konsentrasi radionuklida didalam air yang tercemari ini makin lama makin berkurang.

Disamping adanya migrasi yang vertikal dari radionuklida terdapat pula radionuklida yang berada pada lapisan permukaan air didalam waktu yang cukup lama. Radionuklida ini terkumpul didalam organisme akwatik mengalami proses sedimentasi. Plankton yang spesifik, berbagai bentuk invertebrata, telur ikan, larvae dan sebagainya akan tetap berada dalam permukaan air laut (hyponeuston). Organisme akwatik dari klas ini akan tetap ada pada permukaan laut meskipun percampuran dilapisan ini terjadi dengan baik (Harley, 1956).

Untuk penentuan radionuklida didalam air laut terdapat beberapa macam indikator biologis yang baik antaranya ganggang laut cokelat, ganggang laut merah dan tenunan lemah atau lunak (daging) hewan-hewan laut untuk ^{137}Cs ; ganggang laut cokelat, kulit kerang dan tulang-tulang hewan alut untuk ^{90}Sr ganggang untuk ^{95}Zr , ^{95}Nb dan ^{131}J ; ganggang dan crustaceae untuk ^{106}Ru .

6. FAKTOR KRITIS DALAM PROSES AKUMULASI RADIONUKLIDA PADA MANUSIA.

Tujuan akhir dari pertumbuhan dan perkembangan suatu ilmu pengetahuan, dengan segala macam bentuk efek sampingannya, adalah untuk kesejahteraan manusia. Ini tidak terkecuali didalam bidang ilmu pengetahuan nuklir. Manusia sebagai organisme yang paling tinggi perkembangannya diantara organisme lainnya mempunyai kemampuan untuk melakukan sesuatu berdasarkan keinginan dan penilaiannya didalam menguasai organisme lainnya.

Oleh karenanya adalah penting untuk mengetahui faktor-faktor yang kritis sehubungan dengan terjadinya pencemaran lingkungan oleh zat-zat radioaktif. Yang dimaksud dengan faktor kritis adalah faktor-faktor atau hal-hal yang utama yang dapat menyebabkan kelainan-kelainan biologis. Faktor-faktor ini adalah sedemikian rupa sehingga faktor-faktor lain dapat diabaikan didalam menyebabkan kelainan-kelainan biologis yang timbul. Dengan mengetahui faktor-faktor kritis ini dapatlah kita dengan segera menanggulangi suatu pencemaran dengan tepat tanpa membuang tenaga dan biaya dengan menangani faktor-faktor lain yang sebenarnya tidak penting didalam menyebabkan kelainan-kelainan biologis yang merugikan.

Kebiasaan (habit) makan akan memberikan jalur yang berbeda dari radionuklida untuk sampai kepada manusia. Penduduk yang sebagian besar dari kalsiumnya diperoleh dari bahan-bahan yang berasal dari hewan akan lebih kurang tercemari strontium radioaktif dari pada penduduk yang memperoleh sebagian besar dari kalsiumnya dari bahan-bahan yang berasal dari tanaman. Hal ini disebabkan karena pada penduduk yang kedua ini hambatan biologis (biological barrier) yang disebabkan oleh hewan ditiadakan.

Dari radionuklida yang terdapat di alam baik yang dihasilkan untuk tujuan damai maupun untuk tujuan peperangan ialah ^{131}J , ^{90}Sr , ^{89}Sr , dan ^{137}Cs . Jalur kritik dari ketiga radionuklida ini dapat diperhatikan pada gambar 3.

6.1. Akumulasi jodium-131

Jodium-131 mempunyai paruh umur 8 hari. Didalam suatu ledakan nuklir ^{131}J secara relatif terbentuk didalam jumlah yang besar. Radionuklida ini akan masuk kedalam jalur makanan dan akan terkumpul dan terkonsentrasikan didalam kelenjar thyroid.

Didalam fallout radionuklida yang penting ialah yang berasal dari fall out troposfir sedangkan ^{131}J yang berasal dari fall out stratosfir tidaklah penting, disebabkan karena paruh umurnya yang pendek radionuklida ini boleh dikatakan lenyap karena peluruhan. Radionuklida jodium yang masuk dan terkumpul lebih dahulu didalam tanah sebelum diserap oleh tanaman kemudian sampai kepada manusia yang akan lenyap karena peluruhan. Jadi faktor kritik dari ^{131}J untuk sampai kepada manusia ialah ^{131}J yang mencemari tanaman secara langsung, kemudian dimakan oleh hewan dan akan sampai kepada manusia yang minum air susu hewan. Bagi penduduk yang tingkat sosial ekonominya rendah-umumnya dinegara tropis atau negara-negara yang sedang berkembang dimana sebagian bahan makanannya berasal dari tanaman maka ^{131}J akan dapat lebih cepat sampai kepada manusia. Pencemaran ^{131}J melalui tanaman dapat sangat dikurangi dengan jalan mengupas buah-buahan atau mencucinya terlebih dahulu.

Dengan jalan demikian maka radionuklida yang mencemari permukaan buah-buahan dan sayuran dapat dihilangkan (gambar 4). Sebagaimana dikemukakan dalam bab yang terdahulu ^{131}J dapat pula sampai kedalam tubuh manusia melalui pernapasan. Tetapi jalan ini tidaklah penting.

6.2. Akumulasi stontium-90

Strontium radioaktif yang timbul akibat ledakan nuklir adalah ^{90}Sr ($t_{1/2}$:

28 tahun) dan ^{89}Sr ($t_{1/2}$: 51 hari). Karena paruh umurnya yang panjang dan paruh umur biologiknya yang mencapai 50 tahun, ^{90}Sr ini mempunyai potensi merusak yang lama pula. Disamping itu radioaktif ini akan masuk kedalam tubuh bersama kalsium dan akan terikat didalam tulang dan selama itu pula merupakan radiasi intern.

Jalur yang utama dari strontium akan sampai kepada manusia ialah melalui makanan yang bersumber dari tanaman dan bahan-bahan yang berasal dari hewan (gambar 5). Berbeda dengan pencemaran ^{131}J , maka pencemaran tanaman yang langsung maupun tidak langsung (akumulasi terlebih dahulu didalam tanah) oleh ^{90}Sr ikut memegang peranan didalam proses migrasi radionuklida ini kedalam tubuh manusia. Sebagaimana telah dikemukakan didalam bab yang terdahulu, migrasi ^{90}Sr dari tanah, tanaman dan kemudian kepada manusia dipengaruhi oleh mobilisasi kalsium. Didalam setiap jalur makanan, mulai dari tanah, tanaman sampai manusia kalsium akan lebih baik diserap dari pada strontium. Jadi disini kalsium merupakan suatu hambatan biologis terhadap strontium.

Pencucian bahan makanan yang berasal dari tanaman juga merupakan hambatan-hambatan mekanik terhadap strontium yang mencemari tanaman secara langsung.

6.3. Akumulasi Cesium-137

Radioaktif ^{137}Cs mempunyai paruh umur selama 30 tahun dan paruh umur biologik antara 70 - 140 hari. Didalam sistim biologis unsur ini mempunyai sifat-sifat yang sama dengan kalium. Didalam bab 3 telah dikemukakan bahwa ^{137}Cs mempunyai afinitas yang kuat terhadap tanah. Karenanya hanya sebagian kecil saja yang akan diserap oleh tanaman melalui akar-akarnya, terutama akar permukaan.

Jadi dengan demikian maka jalur yang utama dari ^{137}Cs sampai kepada manusia ialah melalui pencemaran langsung dari tanaman (gambar 6). Karena paruh umur biologiknya yang jauh lebih pendek dari pada ^{90}Sr maka efek biologisnya juga jauh lebih kurang dari pada ^{90}Sr .

Hewan-hewan yang memakan tanaman yang tercemari oleh radionuklida ini akan meneruskan ^{137}Cs melewati bahan-bahan yang berasal dari hewan seperti daging, susu dan hasil-hasil dari susu yang mengalami pengolahan seperti keju, mentega dan sebagainya.

6.4. Akumulasi karbon-14 dan radionuklida lainnya.

Radionuklida sebagai hasil dari fission products selain ^{90}Sr , ^{137}Cs dan ^{131}J tidak banyak berarti sebagai radiasi intern terhadap manusia.

Karbon-14 sebagai hasil aktivasi neutron (neutron activation) mempunyai paruh umur selama 5800 tahun adalah yang paling penting. Sebagai diketahui karbon merupakan salah satu komponen yang penting didalam organ-organ hidup. Atmosfir, biosfir terrestrial, lautan baik pada permukaannya maupun dasar laut adalah merupakan sumber dari ^{14}C .

Radionuklida yang lebih penting yang ada hubungannya dengan makanan yang berasal dari lautan dibandingkan dengan makanan yang berasal dari terrestrial adalah hasil fission products ^{144}Ce dan hasil activation products

seperti ^{65}Zn , ^{55}Fe , ^{59}Fe dan ^{60}Co . Hal ini disebabkan karena beberapa hewan akwatik dari lautan dapat mengkonsentrasikan radionuklida ini didalam tubuhnya. Untunglah bahwa kerusakan-kerusakan yang disebabkan oleh radionuklida ini tidak berarti dibandingkan dengan radiasi ^{90}Sr dan ^{137}Cs . Strontium-90 dan ^{137}Cs lebih banyak mencemari terrestrial dari pada lautan (Djojosebagio, 1975).

Meskipun kita tahu bahwa sebagian besar pencemaran radionuklida kepada manusia adalah melalui makanan, ini tidak berarti bahwa mengganti kebiasaan makan, dengan kondisi menu yang lebih kurang, untuk mengurangi pencemaran adalah suatu tindakan yang bijaksana. Resiko untuk merubah kebiasaan makan atau macam makanan akan dapat menimbulkan kekurangan gizi dan akibat ini akan lebih merugikan dari pada menguntungkan ditilik dari segi kesehatan seseorang ataupun kesehatan masyarakat yang menyeluruh.

7. RADIASI DAN BIOEKONOMI

Didalam setiap pekerjaan yang dilakukan manusia selalu akan dihadapi suatu resiko yang akan merugikan dirinya. Mulai dari seorang pengendara beca yang menjalankan becanya dikeramaian kota, seorang direktur perusahaan yang mengendarai mercedes menuju kantornya setiap pagi, seorang dokter yang bekerja diantara orang-orang sakit, seorang peneliti yang bekerja sendiri dilingkari oleh 4 dinding tembok yang bisu sampai kepada penjaga malam dan seorang juru masak di restoran selalu akan menghadapi resiko didalam pekerjaannya. Resiko ini dapat berbentuk kerugian materi, kesejahteraan, kesehatan dan bahkan juga nyawa seseorang.

Resiko terhadap bahaya radiasi juga merupakan salah satu resiko diantara sekian banyak resiko yang dihadapi didalam kehidupan sehari-hari. Seperti dikemukakan didalam awal tulisan ini, sebenarnya sejak manusia menduduki planet bumi ini sejak itu pula radiasi telah didedahkan kepadanya yang bersumber dari radiasi latar.

Didalam setiap keadaan seseorang menyadari adanya resiko dan menerimanya dengan asumsi bahwa keuntungan yang mungkin diperoleh adalah jauh lebih besar dari pada kemungkinan suatu kerugian yang akan menimpanya. Setiap menghadapi suatu keadaan orang akan selalu berusaha untuk mengurangi resiko pada taraf seminimum mungkin. Tetapi sukarlah untuk mendapatkan suatu keadaan dengan resiko yang mencapai atau mendekati nol.

Radiasi didalam kenyataan yang sekarang kita hadapi, jelas memberikan keuntungan-keuntungan kepada populasi didalam bentuk keuntungan materi seperti didalam bidang industri, pertanian, ilmu pengetahuan, kesehatan, tenaga listrik dan sebagainya.

Didalam suatu kehidupan atau suatu populasi dimana faktor-faktor yang majemuk mempengaruhi taraf hidup, maka taraf hidup ini akan ditentukan oleh kemampuan dan keahlian dari populasi tersebut untuk membangun dan membina serta memanfaatkan bahan dan sumber-sumber alam lainnya yang diperlukan bagi kehidupannya. Phenomena ini bisa kita kenal dengan sebutan "bioeconomic".

Didalam kontek yang majemuk ini, maka radiasi hanyalah merupakan salah satu faktor saja didalamnya. Sebagaimana dikemukakan didalam bab pendahuluan dimana radiasi seolah-olah merupakan pisau yang bermata dua,

bila radiasi dimanfaatkan dengan suatu cara sehingga produktivitas meningkat maka taraf hidup dapat meningkat pula karenanya. Sebaliknya bila radiasi dipergunakan dengan cara sedemikian rupa sehingga produktivitas menurun, maka kesejahteraan dan taraf hidup populasi tersebut akan menurun pula.

Sebagaimana diketahui dan dikemukakan oleh pemberi kertas kerja terdahulu efek radiasi pada individu atau populasi yang menyebabkan kerusakan-kerusakan biologis dapat dimanifestasikan dalam bentuk menurunnya aktivitas dan vitalitas, kerusakan genetik, timbulnya leukemia dan terjadinya carcinogenesis lainnya, kelainan bentuk (malformation) dari fetus dan sebagainya. Kerusakan biologis ini dapat terjadi pada suatu populasi bila populasi ini mendapat dosis radiasi tertentu selama hidupnya. Kerusakan biologis didalam populasi ini makin lama akan makin meningkat dengan meningkatnya usia dan meningkatnya jumlah dosis akumulasi yang diterimanya. Bila hal yang demikian terjadi maka resiko yang dihadapi oleh populasi dalam jangka panjang mungkin tidak seimbang lagi dengan keuntungan yang diterima (gambar 7).

Oleh karena itu kita harus mengusahakan agar kerusakan-kerusakan biologis, jadi resiko yang dihadapi adalah seminimum mungkin, meskipun untuk mendapatkan resiko terhadap radiasi yang sama sekali nol adalah boleh dikatakan tidak mungkin. Harulah diusahakan agar populasi dan pekerja-pekerja pada instalasi nuklir dijauhkan dari "high dose rate". Didalam hal ini yang menjadi pertimbangan kedua ialah berapa banyak biaya yang dapat disediakan agar populasi dan pekerja-pekerja mendapat dedahan yang nol atau mendekati nol ("zero dose rate").

Dari gambar 7 secara teoritis dapat dikemukakan bahwa biaya yang diperlukan adalah sangat rendah sekali bila populasi dibiarkan mengalami kerusakan-kerusakan biologis yang besar karena mereka dibiarkan menerima dedahan radiasi yang tinggi ("high dose rate"). Biaya yang diperlukan adalah didalam bentuk untuk membangun perlindungan (shielding), teknik kerja jarak jauh (remote control procedure), pengamatan radiasi yang timbul dengan alat-alat atau dengan indikator biologis melalui survey dan studi ekologis dan lain sebagainya. Demikian pula Lokakarya yang sekarang diadakan ini juga merupakan usaha-usaha untuk mencari upaya untuk menjauhkan populasi dari "high dose rate". Sebaiknya bila populasi diusahakan untuk menerima kerusakan-kerusakan biologis yang minimal, maka ongkos dan biaya akan dapat sangat tinggi.

Disinilah perlunya suatu penilaian dan keputusan yang bijaksana. Jalan tengah haruslah dapat diambil agar dengan "dose rate" tertentu suatu resiko dapat diterima dan disamping itu, dari segi industri dan perhitungan ekonomis, keuntungan masih jauh bermanfaat dari pada kerugian-kerugian yang mungkin diakibatkannya. Dengan jalan demikian barulah sumber-sumber energi yang berasal dari nuklir akan bermanfaat bagi kita dan generasi yang akan datang. Keseimbangan yang menguntungkan antara resiko dan keuntungan dengan kriteria-kriteria yang mutakhir harus selalu dicari, ditentukan dan dicari kembali tanpa berhenti. Barulah dengan jalan demikian tenaga nuklir dengan radiasinya akan tetap menjadi hamba dan sahaya bagi manusia, raja dari kerajaan organisme di planet ini.

8. KESIMPULAN DAN SARAN-SARAN

Didalam pembangunan sebuah instalasi nuklir yang selalu menjadi titik perhatian adalah kemungkinan adanya pengaruh radiasi dengan dosis rendah dan merata (kronis) terhadap sistem ekologis. Data mengenai ini memang belum banyak, tidak saja di Negara kita atau di Negara-negara yang telah lebih dari 30 tahun memiliki reaktor atomnya. Data yang banyak terkumpul ialah mengenai pengaruh radiasi dengan dosis yang lebih besar dari pada radiasi yang disebabkan oleh lingkungan (radiasi disebabkan oleh radionuklida di alam sekitar).

Pengamatan terhadap pengaruh radiasi dengan dosis yang rendah memerlukan waktu yang cukup lama. Pada perawatan-perawatan yang bekerja pada bagian radioterapi yang menerima dosis akumulasi antara 63 sampai 116 rad selama 10 tahun menunjukkan adanya frekwensi mutasi kromosom yang meningkat dibandingkan dengan mereka yang tidak bekerja di bagian ini. Hal yang sama didapat pula pada sebagian besar radiolog. Pekerja-pekerja pada instalasi nuklir yang menerima dosis 1.4 R setiap tahun selama 15 tahun juga mengandung kromosom yang mengalami aberasi lebih banyak dibandingkan dengan pekerja lain yang tidak bekerja di instalasi nuklir (Spar, 1969).

Dengan meningkatnya ilmu pengetahuan dan makin mudahnya diperoleh zat-zat radioisotop, maka penggunaan zat-zat ini tidak hanya terbatas pada tempat-tempat yang tertutup seperti laboratorium-laboratorium dan rumah sakit, tetapi juga akan meluas ke lapangan yaitu didalam bidang pertanian, peternakan dan hidrologi (Djojosoebagio *et al.*, 1973). Zat-zat radioaktif ini akan lebih mudah dan cepat masuk kedalam ekosistem. Karenanya untuk melindungi alam sekitar dari polusi radioaktif maupun non-radioaktif, maka pengetahuan dasar tentang faktor-faktor yang mempengaruhi evolusi dan ekologi sangat diperlukan. Pengetahuan ini tidak saja bersumber dari species tertentu didalam laboratorium tetapi juga apa yang terjadi pada species di alam yang sebenarnya (Djojosoebagio *et al.*, 1976).

Ekologi adalah suatu cabang ilmu pengetahuan yang mempelajari hubungan timbal balik antara manusia dan organisme atau kelompok organisme dengan lingkungan biologis dan lingkungan fisik yang ada disekitarnya. Dapat pula ditafsirkan sebagai suatu studi terhadap struktur dan fungsi dari alam sekitar kita.

Radioekologi atau ekologi radiasi (radiation ecology) adalah suatu disiplin yang baru, masih muda dan berkembang mengikuti pertumbuhan dan perkembangan sains nuklir. Bidang ini menitik beratkan peranan zat-zat radioaktif radiasi dan lingkungan.

Pada tumbuh-tumbuhan dan hewan fase reproduksi dari suatu siklus kehidupannya adalah fase yang paling sensitif terhadap radiasi. Pengaruh radiasi pada suatu populasi organisme bergantung kepada ratio dari jumlah populasi yang menyeluruh didalam keadaan siklus kehidupan yang berbeda beda pada saat populasi tersebut menerima radiasi.

Disamping efek yang lethal yang dapat disebabkan radiasi, efek lainnya seperti efek genetik, efek terhadap reproduksi, perubahan-perubahan didalam pertumbuhan, tahan (resistant) terhadap penyakit dan perubahan terhadap faktor lingkungan adalah merupakan tumpuan perhatian dari seorang ekolog.

Perubahan-perubahan parameter yang disebutkan diatas yang disebabkan oleh radiasi akan dapat mempengaruhi peranan suatu organisme atau popula-

si terhadap struktur ekologis. Perubahan-perubahan yang dapat terjadi karena perubahan parameter ini dapat didalam bentuk hubungan antara mangsa dan predator, perubahan didalam jalur makanan, transfer energi dan zat-zat, bahkan sistim ekologispun dapat berubah karenanya.

Secara umum, hasil-hasil penelitian dan pengamatan yang sampai sekarang, menunjukkan bahwa tidak dijumpai adanya pengaruh ekologis selama dosis yang diterima organisme dari pembuangan sampah radioaktif tidak melebihi nilai MPC (maximum permissible concentration). Nilai MPC terhadap lingkungan didalam jangka waktu yang lamapun masih perlu diteliti. Sampai sekarang hal ini masih merupakan suatu masalah yang belum terpecahkan. Dari data yang sangat terbatas Djojosoebagio dan Muhammad (1976) menjumpai bahwa tikus-tikus pada daerah tropis nampak lebih sensitif dari pada hewan-hewan didaerah dingin. Jika kesimpulan sementara ini kemudian ternyata benar, akan menjadi pertanyaan apakah nilai MPC yang diterapkan dinegara-negara dengan 4 musim dapat pula dipakai didaerah tropis.

Manusia dapat menggunakan dan memanfaatkan radiasi dan alat-alat penyebab radiasi untuk kesejahteraan manusia, tetapi nampaknya hal ini tidak akan dapat dilaksanakan tanpa terjadinya pendedahan radiasi. Karena besarnya pendedahan yang "Permissible" didalam arti kata terdapat kerusakan-kerusakan dan kerugian-kerugian yang sangat minimal dibandingkan dengan keuntungan yang dicapai sangat penting dan memintakan perhatian pada setiap pengguna energi nuklir untuk maksud-maksud damai.

Suatu radiasi yang mempengaruhi suatu ekosistim mempunyai suatu interrelasi antara organisme yang ada didalamnya karena mereka ada bersama didalam suatu daerah. Mereka juga mempunyai hubungan timbal balik didalam proses fisiologis yang menyeluruh dari komunitas tersebut. Bergantung kepada besarnya dosis yang terdapat didalam lingkungan (dosis radiasi lethal, misalnya) dapat menyebabkan punahnya species (tanaman atau hewan) yang berguna bagi manusia. Species baru atau species yang dominan dapat timbul didaerah itu. Meningkatnya radiasi lingkungan dalam waktu yang lama akan dapat mempercepat punahnya suatu populasi dan dapat mempertinggi laju evolusi dengan terbentuknya mutant-mutant baru. Species tertentu yang waktu ini tertekan oleh species lain yang lebih cekatan dan gesit, mungkin akan tumbuh dan berkembang karena punahnya species saingannya yang lebih peka terhadap radiasi. Sebagai konsekwensinya mungkin terjadi suatu evolusi dengan tipe-tipe organisme yang tahan terhadap radiasi (radioresistant).

Akibat-akibat yang ditimbulkan oleh pembuangan sampah-sampah radioaktif bergantung bagaimana lingkungan dan sistim ekologisnya (hutan, danau, padang rumput, sungai, lautan dsb.-nya) mengatur distribusi-distribusi radioaktif tersebut. Mengingat hal-hal yang dikemukakan diatas dan diskusi didalam bab-bab sebelumnya, maka pengamatan-pengamatan dan penelitian-penelitian seperti dibawah ini perlulah dilakukan:

(1) Penelitian didalam bidang ekologi perlu direncanakan sebelum dan sesudah suatu instalasi atom atau nuklir dibangun. Dengan jalan demikian dapatlah ditetapkan suatu teori dasar terhadap radioekologi didaerah itu dan terhadap sistim ekologi pada umumnya. Daerah ini akan merupakan tempat studi bagi mahasiswa didalam mempelajari ekologi dan radioekologi.

(2) Dinamika dari radionuklida didalam jalur makanan¹ didalam kon-

disi lokal baik bagi akwatik (marine dan freshwater) maupun yang terrestrial.

(3) Penentuan jalur dari radionuklida yang mungkin menyebabkan radiasi pengion terhadap individu atau populasi (termasuk manusia).

(4) Menentukan kepekaan terhadap radiasi (radiosensitivitas) dari komponen-komponen yang terdapat didalam suatu ekosistem.

Dari data yang diperoleh nanti dapatlah fihak-fihak pembuat kebijaksanaan mempertimbangkan, pertama: apakah pembuangan sampah-sampah radioaktif adalah suatu tindakan yang tepat dan kedua: kalau cara pembuangan sampah-sampah radioaktif ini diteruskan sesuai dengan meningkatnya produksi tenaga atom, apakah keuntungan yang diperoleh akan seimbang dengan resiko yang dihadapi. Integrasi dan koordinasi antara beberapa disiplin perlulah dilaksanakan didalam melaksanakan pengamatan dan penelitian penelitian tersebut diatas.

Sebagaimana halnya dengan ahli-ahli lingkungan (environmental scientists), ahli radioekologi dimasa mendatang ditinjau air kita akan dapat memberikan sumbangan yang diperlukan sehubungan dengan meningkatnya kebutuhan energi dinegara ini. Penelitian terhadap akibat-akibat ekologis yang disebabkan oleh pembuangan-pembuangan sampah radioaktif dengan dosis rendah dan kronis adalah sangat diperlukan untuk menentukan lokalisasi yang tepat dan menentukan kriteria kerja bagi sesuatu reaktor nuklir.

Penelitian-penelitian yang kontinyu dengan menggunakan zat-zat radioaktif untuk menentukan jalur-jalur makanan, akumulasi biologis didalam sistem ekologis terrestrial dan akwatik akan memberikan keterangan-keterangan yang sangat berguna baik terhadap polusi radioaktif maupun yang non-radioaktif. Penentuan dan penelitian dengan menggunakan logam berat yang radioaktif misalnya akan dapat menentukan laju dan seberapa jauh zat ini terkumpul didalam jalan atau jalur makanan akwatik dan sampai kepada manusia.

Akhirnya seorang radioekologi akan selalu terlibat didalam penelitian-penelitian baik yang bersifat "applied" maupun yang bersifat dasar. Penelitian ini bersifat "applied" karena mempelajari jalur dan pengaruh radioaktivitas terhadap lingkungan. Sedangkan bersifat dasar atau "basic" karena zat-zat radioaktif ini juga membantu kita untuk memahami struktur dan fungsi dari suatu sistem ekologis.

Tabel 1. Radionuklida yang penting didalam pencemaran lingkungan

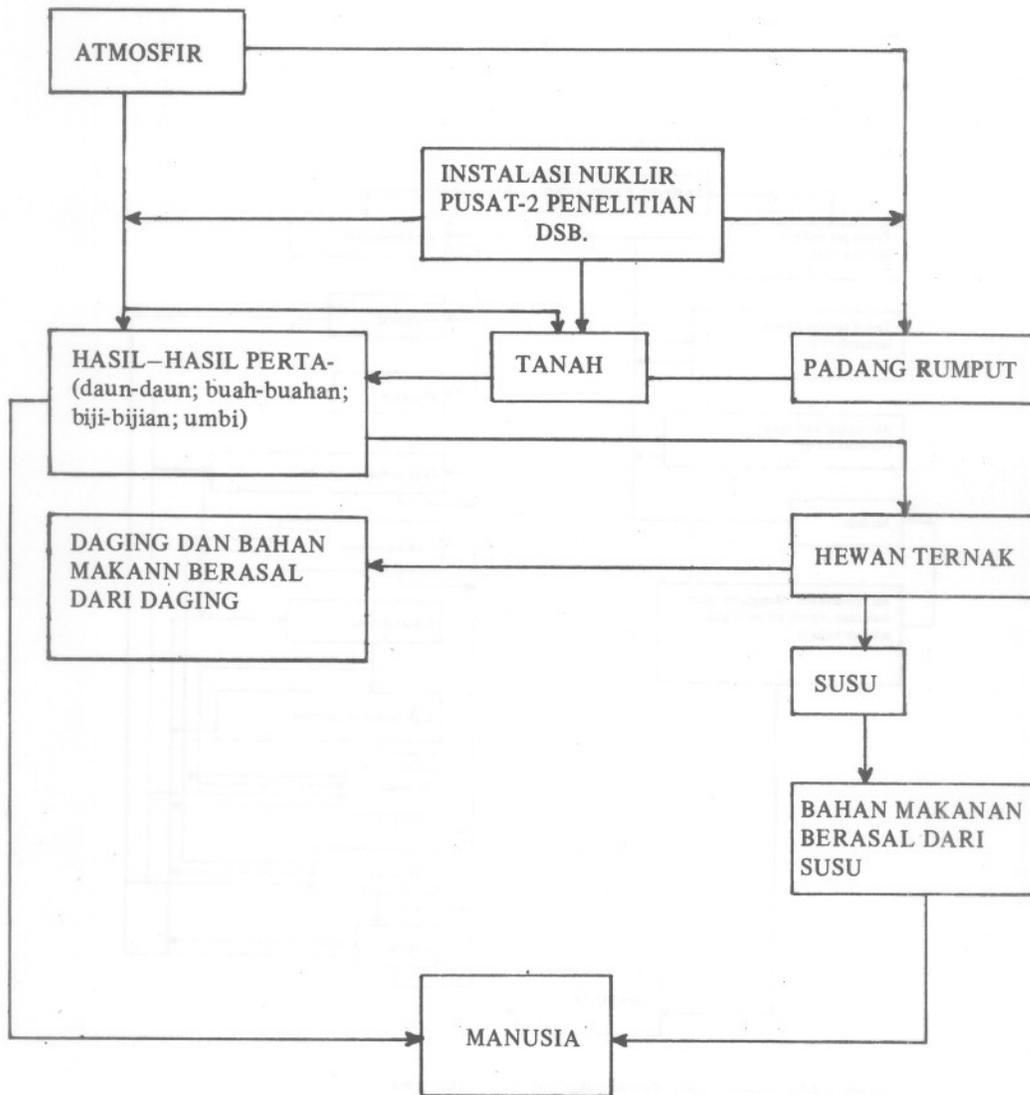
Klas	Radionuklida utama	Kepentingannya didalam aspek aspek ekologis
Alamiah	1. Serie dari peluruhan unsur-unsur Uranium, thorium dan Actinium	Mengakibatkan terjadinya radiasi latar (dengan paruh umur yang panjang)
	2. Kalium-40	
	3. Karbon-14	
Fission products	1. Strontium-89; 90	Mencemari lingkungan yang berasal dari "fall-out" dan/atau pembuangan sampah-sampah radioaktif
	2. Yitrium-90; 91	
	3. Zirconium-95	
	4. Niobium	
	5. Ruthenium-103; 106	
	6. Rhodium-1-6	
	7. Jodium-131	
	8. Cesium-137	
	9. Barium-137; 140	
	10. Praseodymium-143; 144	
	11. Neodymium-147	
	12. Promethium-147	
Radioisotop yang esensial untuk organisme	1. Hydrogen-3	Biasa dipakai untuk mempelajari metabolisme mineral, jalur kamanan dan pengaruh radiasi terhadap sistim ekologis.
	2. Karbon-14	
	3. Natrium-22; 24	
	4. Fosfor-32	
	5. Sulfur-35	
	6. Kalium-42	
	7. Kalsium-45	
	8. Mangan-54	
	9. Besi-59	
	10. Tembaga-64	
	11. Zink-65	
	12. Jodium-131	

Data : Witherspoon, 1973.

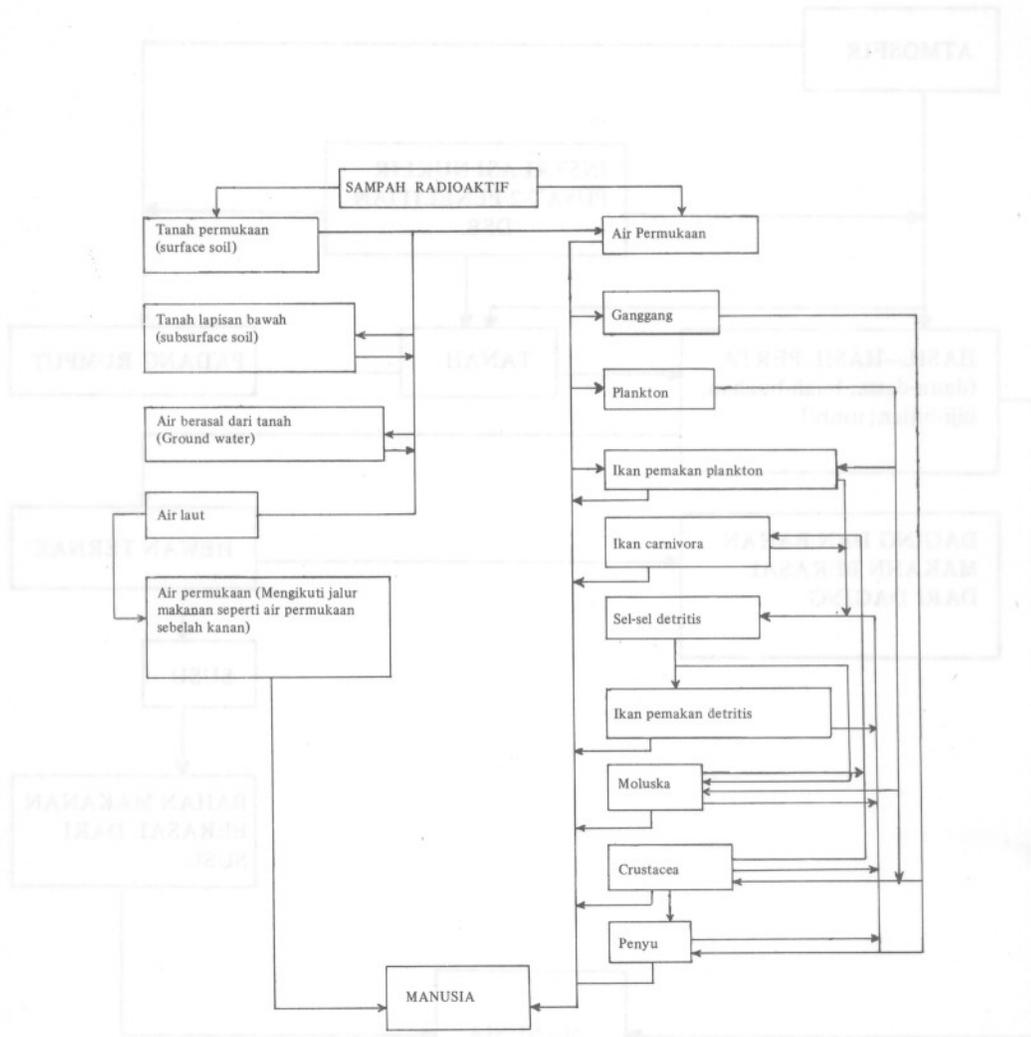
Table 2. Paruh umur biologik dari cesium-137 pada beberapa hewan terrestrial

Hewan/Species	Paruh umur biologik (hari)	Berat badan (kg)
NON RUMINANSA		
Manusia	110 (53 - 188)	70
Babi	18	28 - 105
Anjing	43.50	11
Monyet	40.50	4.10
Tikus	14	0.250
Mencit	6.60	0.025
RUMINANSA		
Sapi betina	30	250
Sapi jantan	41	870
Rusa	33	65 - 100
Domba	17	24 - 36
Menjangan (kijang)	17	44 - 53
UNGGAS		
Ayam	31	1.7 - 2.4
INSEK		
<i>Romala microptera</i>	4	5 gr.
<i>Melanoplus differentialis</i>	2	500 mgr.
<i>Melanoplus femurrubrum</i>	1.3	200 mgr.
<i>Chrysomela knabi</i>	0.4	25 mgr.

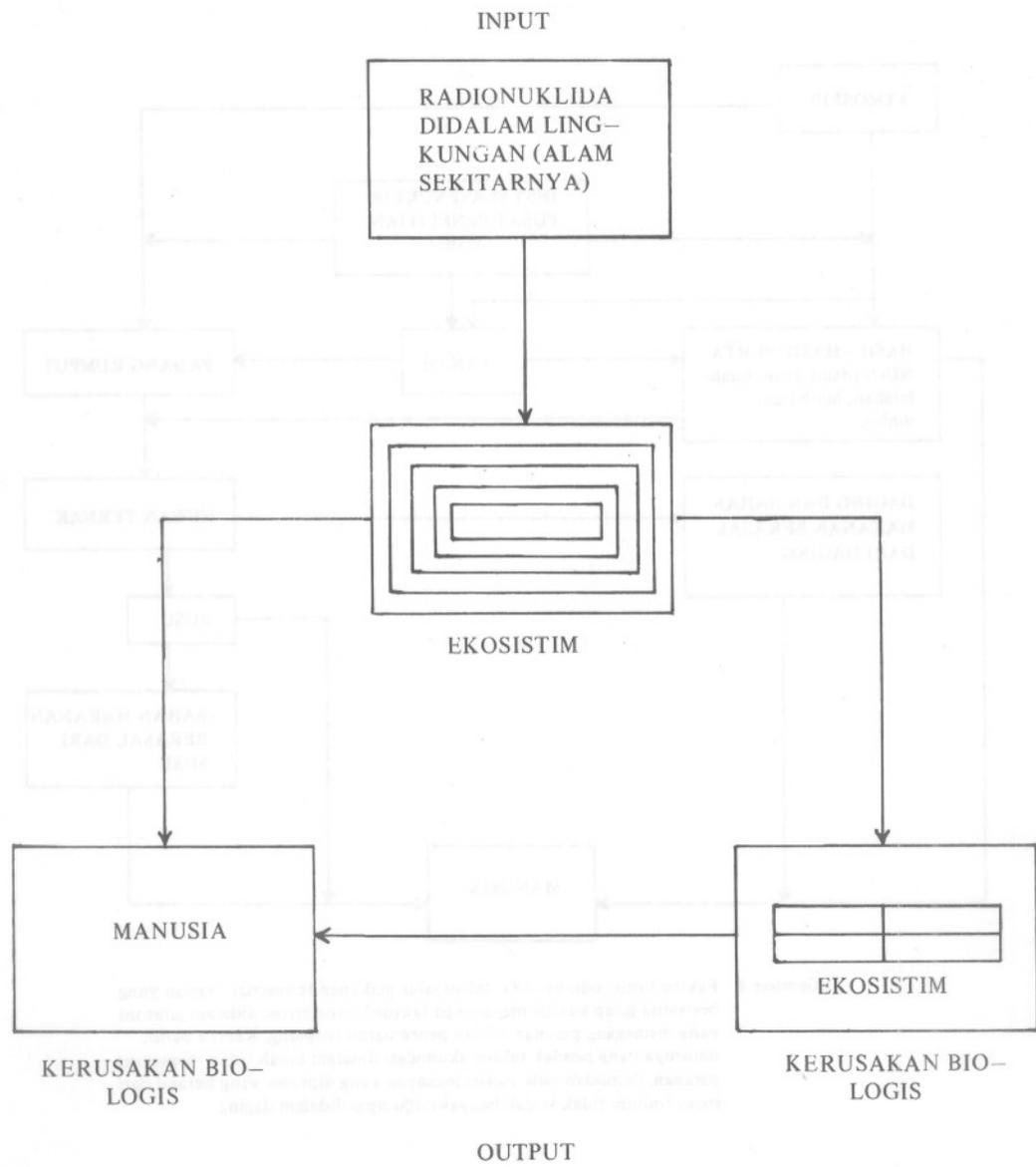
Data : Ekman, 1967.



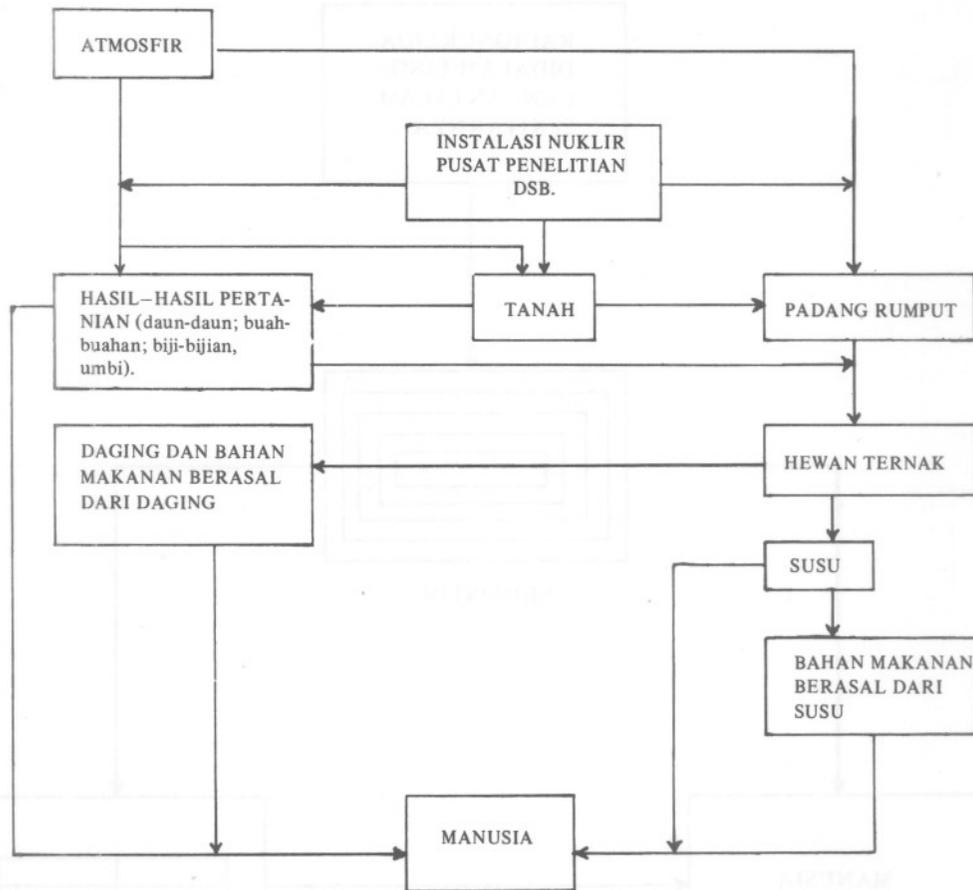
Gambar 1. Jalur makanan terrestrial. Dirubah berdasarkan Comar and Lengemann (1967).



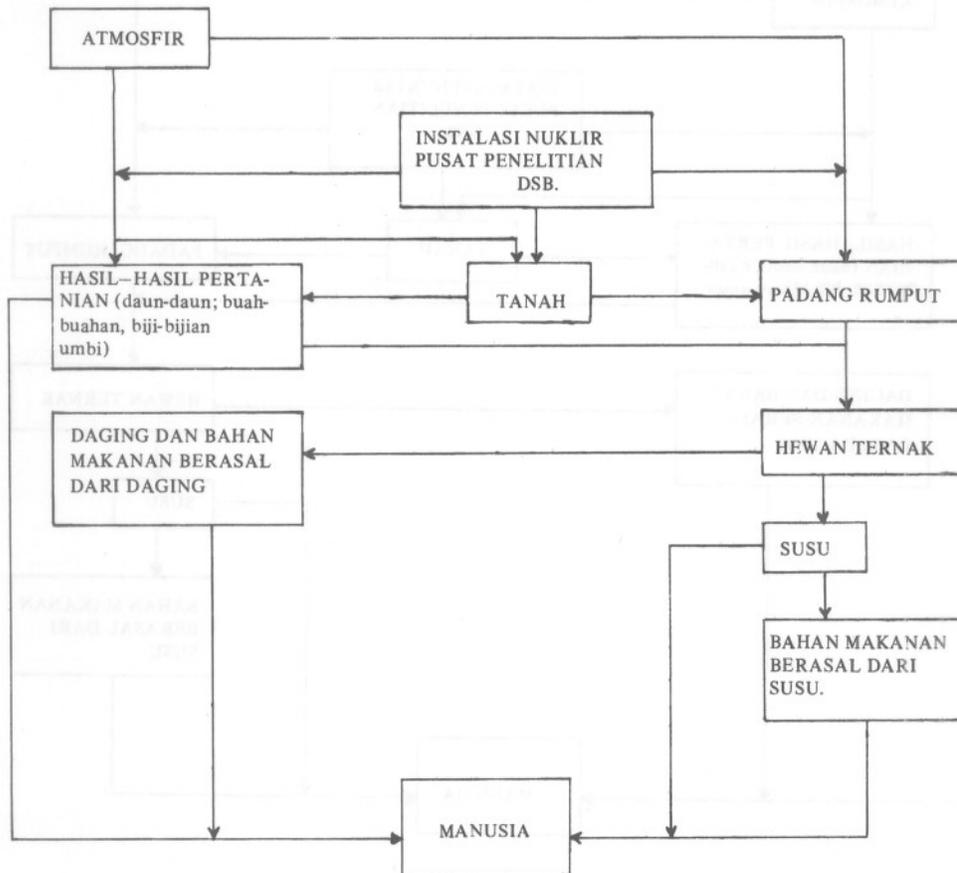
Gambar 2. Jalur makanan akwatik, Disederhanakan dari : Kaye and Ball (1968).



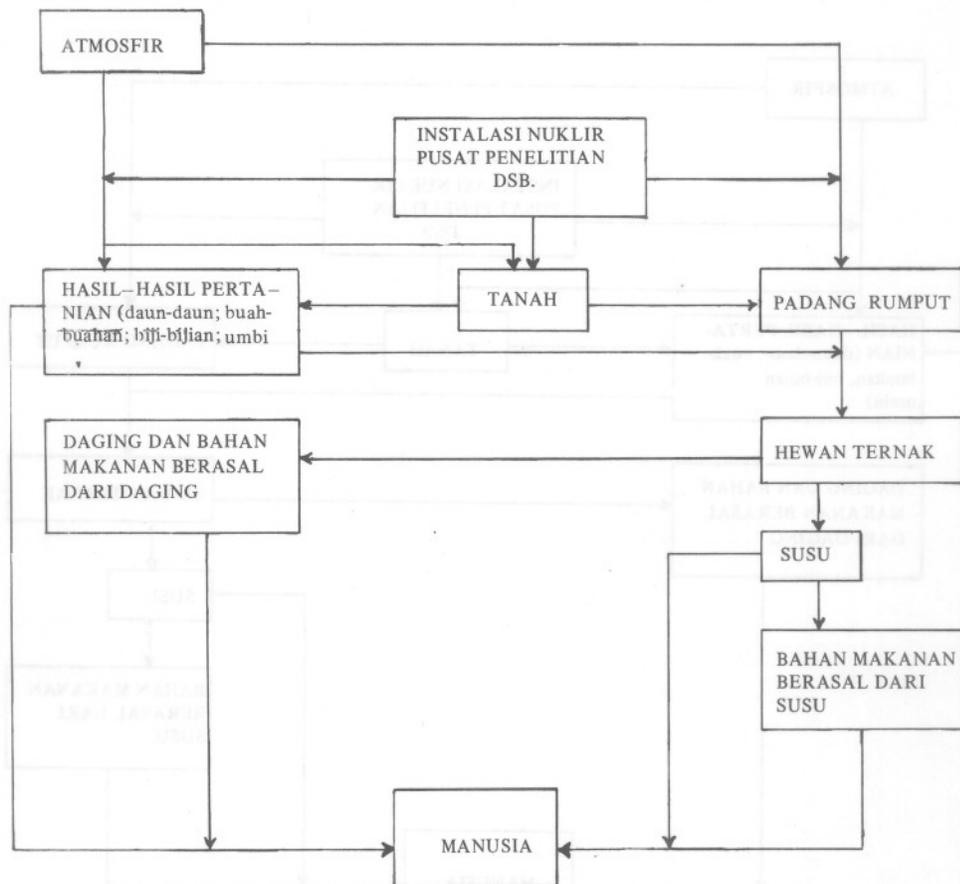
Gambar 3. Masalah global tentang pencemaran zat-zat radioaktif. Dirubah berdasarkan Comar and Lengemann (1967)



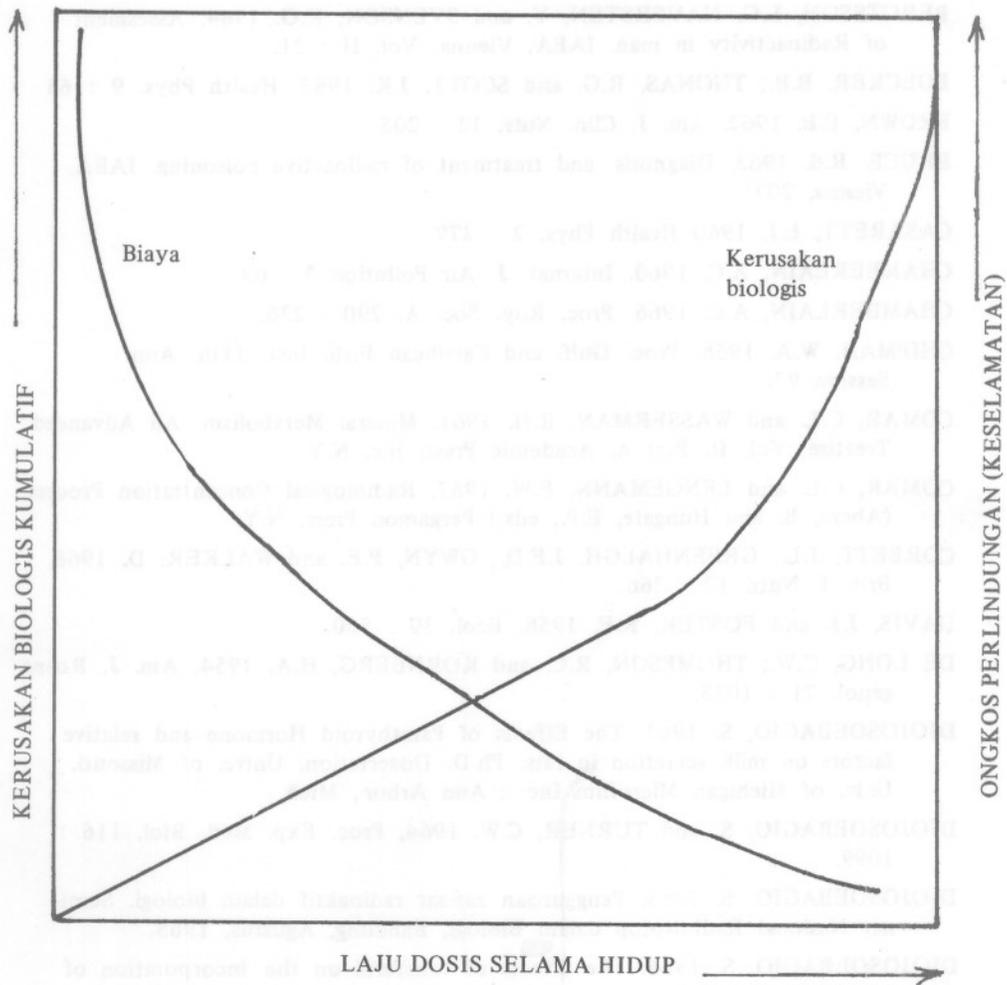
Gambar 4. Faktor kritis jodium-131 dalam jalur makanan terrestrial. Bagian yang berwarna gelap adalah merupakan faktor-faktor kritis. didalam jalur ini yang memegang peranan adalah pencemaran langsung. Karena paruh umurnya yang pendek faktor akumulasi didalam tanah tidak memegang peranan, demikian pula bahan makanan yang diproses yang berasal dari susu. Jodium tidak (tidak banyak) dijumpai didalam daging.



Gambar 5. Faktor kritis strontium-90 (dan strontium-89) dalam jalur makanan terrestrial. Bagian yang berwarna gelap adalah merupakan faktor-faktor kritis. Daging dan bahan makanan berasal dari daging tidak memegang peranan penting karena strontium tidak banyak terkumpul didalam bagian ini. Karena paruh umurnya yang panjang (kecuali strontium-89) bahan makanan berasal dari susu yang tersimpan lamapun merupakan faktor kritis bagi unsur ini.



Gambar 6. Faktor kritis cesium-137 dalam jalur makanan terrestrial. Bagian yang berwarna gelap adalah merupakan faktor kritis. Tanah tidak memegang peranan penting didalam jalur makanan unsur cesium, karena pada umumnya unsur ini akan terikat kuat dengan tanah. Pada tanah-tanah permukaan dan didaerah dimana tanah permukaan ini banyak mengandung "humus", faktor tanah dapat ikut aktif didalam proses jalur makanan. Jadi unsur cesium mencemari organisme terutama melalui pencemaran langsung.



Gambar 7. Biaya versus kerusakan-kerusakan biologis

DAFTAR PUSTAKA

- BAIR, W.J. and Mc CLANAHAN, B.J. 1961. Arch Environ. Health 2 : 648.
- BAIR, W.J. and WILLARD, D.H. 1963. Health Phys. 9 : 253.
- BANI, A.L. 1966. Health Phys. 12 : 501
- BERGEIM, O. 1926. J. Biol. Chem. 70 : 51
- BERGTSSON, L.G. NAVERSTEN, Y. and SVENSON, K.G. 1964. Assesment of Radioactivity in man. IAEA, Vienna, Vol. II : 21.
- BOECKER, B.B.; THONAS, R.G. and SCOTT, J.K. 1963. Health Phys. 9 : 165
- BROWN, E.B. 1962. Am. J. Clin. Nutr, 12 : 205
- BRUCE, R.S. 1963. Diagnosis and treatment of radioactive poisoning. IAEA, Vienna, 207
- CASARETT, L.J. 1960 Health Phys. 2 : 379
- CHAMBERLAIN, A.C. 1960. Internat. J. Air Pollution 3 : 63
- CHAMBERLAIN, A.C. 1966. Proc. Roy. Soc. A. 290 : 236.
- CHIPMAN, W.A. 1958. Proc. Gulf. and Carribean Fish. Inst. 11th. Ann. Session 97.
- COMAR, C.L. and WASSERMAN, R.H. 1961. Mineral Metabolism. An Advanced Treatise, Vol. II. Part A. Academic Press, Inc. N.Y.
- COMAR, C.L. and LENGEMANN, F.W. 1967. Radiological Concentration Process (Aberg, B. and Hungate, E.P., eds.) Pergamon Press, N.Y.
- CORBETT, J.L.; GREENHALGH, J.F.D.; GWYN, P.E. and WALKER, D. 1968, Brit. J. Nutr. 12 : 266.
- DAVIS, J.J. and FOSTER, R.F. 1958. Ecol. 39 : 530.
- DE LONG, C.W.; THOMPSON, R.C. and KORNBERG, H.A. 1954. Am. J. Roentgenol. 71 : 1038.
- DJOJOSOEBAGIO, S. 1964. The Effects of Parathyroid Hormone and relative factors on milk secretion in rats. Ph.D. Dissertation, Unive. of Missouri. Univ. of Michigan Microfilm Inc. ; Ann Arbor, Mich.
- DJOJOSOEBAGIO, S. and TURNER, C.W. 1964, Proc. Exp. Med. Biol. 116 : 1099.
- DJOJOSOEBAGIO, S. 1965. Penggunaan zat-zat radioaktif dalam biologi. Seminar Nasional Radioisotop dalam Biologi, Bandung, Agustus, 1965.
- DJOJOSOEBAGIO, S. 1966. The effects of calciferol on the incorporation of P-32 into cells of thyroparathyroidectomized animals. Eleventh Pasific Science Congress, August, 1966, Tokyo, Japan.
- DJOJOSOEBAGIO, S. 1968. The calorigenic effects of some systemic calcifying factors in lactating rats and on the growth rate of the litter. Second World Conference on Animal Production, July, 1968, Maryland, USA.
- DJOJOSOEBAGIO, S., 1972a. The effect of insuline on the disappearance rate of radioactive phosphorus in experimental animals. Unpublished Laboratory Data.

- DJOJOSOE BAGIO, S. 1972b. The use of nuclear energy in solving some problems in animal production in Malaysia. FAO/IAEA Panel on Tracer Techniques in Tropical Animal Production Studies, October, 1972, Jakarta
- DJOJOSOE BAGIO, S, NAZIR ABDULLAH and WIDJANG SISWORO 1973, The application of nuclear techniques in Agriculture in India. Report : IAEA, Vienna.
- DJOJOSOE BAGIO, S. 1974. Nutritional Anaemia study in Venezuela. Report : WHO, Geneva.
- DJOJOSOE BAGIO, S. 1975. Radioactive pollution in the Strait of Malaca and Singapore marine waters. Thirteenth Pacific Science Congress, August 1975, Vancouver.
- DJOJOSOE BAGIO, S. SANUSI JANGI and OTHMAN Hj. ROSS, 1976. Environmental education and research at the University Kebangsaan Malaysia. Symposium on Protection our Environment, Malaysian Institute of Chemistry, March, 1976.
- DJOJOSOE BAGIO, S. and MUHAMMAD bin OTHMAN, 1976, The effect of radiation on the behaviour of vitamin D treated experimental animals. In preparation for Symposium on Nuclear Medicine, Sydney, Australia, September 1976.
- EKMAN, L. 1961. Acta Vet. Scand. 2 : Suppl. 4.
- EKMAN, L. 1967, Radiological Concentration Process (Aberg, B. and Hungate, F.R. eds.), Pergamon Press. N.Y.
- EVE, I.S. 1966. Health Phys. 12 : 131
- FENN, W.O. 1921. J. Gen. Physiol. 3 : 439.
- FISH, B.R. 1961. Inhaled particles and vapors (Davis, C.N.), Pergamon Press, London.
- FREDRIKSON. L.; GARNER, R.J. and RUSSELL, R.S. 1966. Radioactivity in human diets. (Russell, R.S. ed.), Pergamon Press, Oxford.
- FURCHNER. J.E. MILLER, J.K. and CHANDLER P.T. 1965. Radioisotopes in animal nutrition and physiology. IAEA, Vienna, 499.
- GRAN. F.G. 1960. Acta Physiol. Scand. 48 : Suppl. 167;
- GOLDBERG, E.D. 1952. Biol. Bull. Woods Hale 102 : 243.
- HARLEY, J.H. 1956. Operation Troll. N.Y. Operation Office, USAEC Report NYO-4656.
- HARVEY, H.W. 1937. J. Mar. Biol. Ass; U.K. 22 : 203.
- HODGE, H.C.; MAYNARD, E.A. and LEACH, L.J. 1960. Univ. of Rochester Report UR-562.
- JANDL, J.H. and KATZ, J.H. 1963. J. Clin. Invest, 42 : 311.
- JOHNSTON, R. 1964. J. Mar. Biol. Ass. U.K. 44 : 87.
- KAYE, S.V. and BALL. S.J. 1962. Symposium on Radioecology (Nelson, D.J. and Evans, F.C, eds.), USAEC Conference, 670503.
- KRUMHOLZ, L.A. and FOSTER, R.F. 1957. The effects of atomic radiation

- on oceanography and fisheries. National Academy of Sciences - National Research Council, Wash., D.C. Publ. 551 : 88.
- KUTZIM, H. 1956. Arch. Klin. u. Exptl. Derm. 203 : 323.
- KYKER, G.C. 1962. Mineral Metabolism (Comar, C.L. and Bronner, F. eds.), An Advanced Treatise, Academic Press., N.Y.
- LAURELL, C.B. 1947. Acta Physiol. Scand. 14 : 1.
- LEBEDEVA, G.D. 1962. Radiobiologiya 2 : 43.
- LIDEN, K. 1964. Assessment of radioactivity in man. IAEA, Vienna, Vo. II. 33.
- LIE R. 1964. Health Phys. 10 : 1071.
- LOBITZ, W.C. Jr.; and DANIELS, F. Jr. 1961. Ann. Rev. Physiol. 23 : 207.
- LOUTIT, J.F. MARLEY, W.G. and RUSSELL, R.S. 1960. The nuclear reactor accident at Windscale, October 1957. A second Report to the Medical Research Council, H.M.S.O. London.
- LOWMAN, F.G. 1960. Disposal radioactive wastes, IAEA, Vienna, 2 : 105.
- MAGNUSSON, G. 1963. Acta Pharmacol. and Toxicol. 20 : Suppl. 2.
- MARTER, W.L. 1963. Health Phys. 9 : 1105.
- MARTIN, W.E. 1963. Health Phys. 9 : 1141
- MARTIN, W.E. 1964. Rad. Bot. 4 : 275;
- MARTIN, W.E. 1965. Health Phys. 11 : 1341.
- MATSUE, Y. and HRANO, R. 1956. Research on the effects and influence of the nuclear bomb test explosions, vol. II. Japan Soc. for the Promotion of Science, Ueno, Tokyo, 1099.
- McCLEAN, F.C. and HASTING, A.B. 1935. J. Biol. Chem. 108 : 285.
- McCLEAN, F.C. and URIST, M.R. 1961. Bone. An introduction to physiology of skeletal tissue. 2nd ed. Univ. of Chicago Press., Chicago, III.
- McCLELLAN, R.O.; McKENNE, J/R. and BUSTAD, L.J. 1961, Hanford Atomic Products Operation, USAEC Report HW-69500.
- McCLELLAN, R.O. and BUSTAD, L.K. 1964. Hanford Atomic Products Operation, USAEC Report HW-80500.
- MENZEL, R.G. 1963. Fed. Proc. 22 : 1398.
- MOORBY, J. and SQUIRE, H.M. 1963. Rad. Bot. 3 : 163.
- MOORE, W. Jr. and COMAR, C.L. 1962. Int. J. Rad. Biol. 5 : 247.
- MURRAY, J.L. 1965. Hanford Biology Res. Ann. Report for 1964, B. HWL-122 : 55.
- MILLER, C.F. 1964. Health Phys. 10 : 1065
- MORROW, P.E. and GIBB, F.R. 1958. Am. Ind. Hyg. Ass. J. 19 : 196.
- Nat. Acad. Science Res. Council. Wash. D.C. 1961. Effects of Inhaled radioactive particles, Publ. 848.
- ODUM, E.P. 1971. Fundamentals of ecology. 3rd ed. W.B. Saunders Co.; Philadelphia.

- ORCUTT, J.A. 1949. Nat. Nuc. Energy Series, Div. VI, Vol. I; McGraw Hill Book Co. Inc. NY.
- PENDLETON, R.C.; MAYS, C.W. LLOYD, R.D. and CHURCH, B.W. 1965. Health Phys. 11 : 1503.
- PINSON, E.A. and LANGHAM, W.H. 1957. J. Appl. Physiol 10 : 108.
- POLIKARPOV, G.G. 1966. Radioecology of aquatic organisms. Reinhold Book Div., N.Y.
- POLIKARPOV, YU, A. KODER, G.M. and KRINITSKII, V.V. 1973, Radioecology (Klachkovskii; Polikarpov, G.G. and Aleksakhin, R.M. eds.), John Wiley & Sons, N.Y.
- RICE, T.R. 1956. Limnol. Oceanogr. 1 : 123.
- RICE, T.R. and WILLIS, V.M. 1959. Limnol. Oceanogr. 4 : 277.
- RICHMOND, C.R. 1958. Los Alamos Scientific Lab. L.A. 2217.
- ROMNEY, E.M. LINDBERG, N.G.; Hawthorne, H.A; BYSTROM, B.G. and LARSON, K.H. 1963. Ecol. 44 : 343.
- RUSSELL, R.S. and POSSINGHAM, J.N. 1961. Progress in nuclear energy (Loutit, J.F. and Ressel, R.S. eds.) Series VI, Biological Sciences 3, Pergamon Press, Oxford.
- SALTMAN, P. 1958. Proc. and Intern. Conf. on Peaceful Uses of Atomic Energy, Un. Geneva, September. A/Conf. 15/P/857.
- SPAR, I.L. 1969. Med. Clin. N. Am. 53 : 965.
- SPOONER, G.M. 1949. J. Mar. Biol. Assoc. U.K. 28 : 587.
- SRI ASMINAH and DOJOSOEBAGIO, S. 1970. Pengaruh thyroxin dan testosteron pada pertumbuhan bursa Fabricius dan berat badan ayam-ayam yang mengalami radiotyroidom a. Seminar Nasional Biologi, Februari, 1970; Bogor.
- STANNARD, J.N. 1959. Prog. Nuc. Energy, Series VII; Pergamon Press, N.Y.
- STAVA, J.F. 1965, Health Phys. 11 : 1195.
- TAS, J. and FEIGE, J. 1958. J. Invest. Derm. 30 : 193.
- TEMPLETON, W.L. 1962. Proc. Seminar and Agric. and Public Health Aspects of Radioactive Contamination; FAO Rome.
- TOMIYAMA, T.; ISHIO, S. and KOBAYASHI, K. 1956. Research on the effects and influence of the nuclear bomb test explosions, Vol. II. Japan Soc. for the Promotion of Science, Ueno, Tokyo, 1157.
- TOWNSLEY, S.J.; Reid, D.F. and Ego, W.T. 1960. Uptake of radioisotopes and their transfer through food chains by marine organisms. Ann. Report (1959 - 1960) Univ. of Hawaii.
- WARLTON, A. 1963. J. Geophys. Res. 60 : 1485.
- WILLIAMS, L.G. 1960. Oceanogr. 5 : 301
- WISEMAN, G. 1964. Absorbtion from the intestine. Academic Press, London.
- WILLIAMS, L.G. and PICKERING, Q. 1961. Ecol. 42 : 205.

- WITHERSPOON, J.P. 1973. Medical Radiation Biology (Dalrymple, G.V.; Gaulden, M.E. Kollmorgen, G.M. and Vogel, H.H. eds.), W.B. Saunders, Co. Toronto.
- WLODEK, S. 1967. Radioecological Concentration Processes (Aberg, B. and Hungate, F.P. eds.) Pergamon Press, Oxford.
- WOOD, D.H. ELEFSON, E.E.; HORSTMAN, V.G, and BUSTAD, L.K. 1964. Biology of radioiodine (Bustad, L.K. ed.), Pergamon Press, London.
- ZHADIN, V.I. Il'inskaya, N.B. Suetovidov, A.N. and TROSHIN, A.S. 1955. Problems and methods of tagging insects and fishes with radioactive isotopes. Proc. of the Conference on the Achievements and Tasks of Soviet Biophysics. in Agriculture. Moskow, Akad. Nauk, SSSR; 276.
- ZEIGLER, T.R.; LEACH, R.M. Jr.; SCOTT, M.L.; HUEGIN, F.; Mc EVOY, R.K. and STRAIN W.H. 1964. J. Nutr. 82 : 489.

DISKUSI

PERTANYAAN :

Sjukri.

1. Apakah ada sampah radioaktif yang dibuang di laut masih mempunyai pengaruh terhadap ekosistem disekitarnya, bila masih ada sampai berapa jauh dapat dirasakan ?
2. Mengingat waktu paruh yang lama dari sampah radioaktif, apakah kemasan ini sudah bisa mengatasinya, mengingat syarat-syarat yang berat seperti terhadap korosi, tekanan air laut dalam arus dan sebagainya.
3. Apakah kerugian pembuangan sampah radioaktif dalam tanah (bekas tambang misalnya).

JAWABAN :

C. Sugiarto mewakili Prof. Soewondo.

- 2). Bila ada pengalaman, justru karena ada kekhawatiran terjadinya korosi pembuangan di laut mendapat tentangan-tentangan di berbagai negara.
- 3). Ada kemungkinan leakage/kebocoran container dan zat radioaktif terbawa air pindah ketempat lain, sekalipun sampai ini dianggap cara yang terbaik.

PERTANYAAN :

Dr. E. Tahir.

Hal waste product.

Mengingat ada pengaruh diet untuk mencegah penyerapan melalui usus, hal ini dapat dianjurkan untuk mereka yang exposure terhadap waste product radiasi.

Bagaimana dengan anjuran untuk pencegahan melalui jalan pernafasan ?

JAWABAN :

Prof. H. Soewondo

PERTANYAAN :

Roestan Roekmantara

Apakah dosis 1.4 R setiap tahun selama 15 tahun yang diterima pekerja radiasi yang menimbulkan aberasi kromosom itu dosis untuk seluruh tubuh ? Mengingat ICRP telah menentukan 5 Rem sebagai limit exposure untuk pekerja radiasi.

JAWABAN :

Prof. H. Soewondo Djojosoebagio.