

KONSEKUENSI PENGOPERASIAN TENAGA NUKLIR TERHADAP LINGKUNGAN

Gatot Suhariyono, Sutarman

Puslitbang Keselamatan Radiasi dan Biomedika Nuklir (P3KRBiN), BATAN

Jl. Cinere Pasar Jum'at, PO Box 7043 JKSKL, Jakarta Selatan 12070

Telp. 021-7513906, Fax : 021-7657950

ABSTRAK

KONSEKUENSI PENGOPERASIAN TENAGA NUKLIR TERHADAP LINGKUNGAN. Tujuan makalah ini adalah memberikan informasi konsekuensi operasi tenaga nuklir terhadap lingkungan, sehingga diharapkan sebagai pengelola PLTN dapat mengantisipasi atau menekan seminimal mungkin dampak radiologi terhadap pekerja radiasi dan masyarakat pada umumnya, serta sosialisasi bahwa pengoperasian tenaga nuklir tidak memberikan dampak negatif, jika dilakukan pengendaliannya terhadap lingkungan secara sungguh-sungguh. Bagian yang perlu diketahui dari makalah ini adalah : 1. Perkiraan dosis ekivalen efektif kolektif dalam kondisi normal dari siklus operasi tenaga nuklir pada pekerja dan penduduk lokal / regional 10, 100 atau 10.000 tahun yang akan datang. 2. Dosis ekivalen efektif kolektif global dari berbagai sumber radiasi. 3. Perkiraan dosis per kepala tahunan dari tenaga listrik nuklir sampai tahun 2500. 4. Aspek non radiologi terhadap sistem pendingin, penggunaan lahan, pembuangan kimia, keuntungan limbah air panas, efeknya terhadap ikan, bentos, plankton, tanaman, binatang dan persiapan keadaan darurat nuklir.

ABSTRACT

THE OPERATION CONSEQUENCE OF NUCLEAR ENERGY TO ENVIRONMENT. Objective of the paper is to give information the operation consequence of nuclear energy to environment, so that expected as organizer of PLTN can anticipate or depress as minimum as possible radiology impact to the radiation workers and society in general, and also socialization that operation of nuclear energy do not give the negative impact, if conducted its control to environment seriously. Parts of which it is important to know from this paper are: one. Estimate of equivalent dose of collective effective in a normal condition is the operation cycle for nuclear energy at worker and local or regional resident 10, 100 or 10.000 next years. 2. Equivalent dose of global collective effective is for various the radiation sources. 3. Estimate of dose per caput annual of nuclear electric power until year 2500. 4. Aspect of non-radiology is to cooler system, usage of farm, dismissal of chemistry, advantage of hot water waste, its effect to fish, benthos, plankton, vegetation, animal and preparation of nuclear emergency.

PENDAHULUAN

Kegiatan pengolahan limbah radioaktif dan pengendalian efluen akan melibatkan bahan-bahan radioaktif. Dalam kondisi normal, bahan-bahan radioaktif yang dilepas ke lingkungan dan pengaruhnya terhadap publik relatif sedikit, namun dalam kondisi terjadi kecelakaan, bahan-bahan radioaktif tersebut yang dilepas ke lingkungan berpengaruh cukup besar terhadap kesehatan manusia. Hal ini dapat diperkirakan dari dampak radiologi yang berkaitan dengan jalur kritik radiologi ke manusia, pajanan radiasi, kuantitas dosis yang dipakai dan faktor resiko radiasi [1].

Bagian yang perlu diperhitungkan adalah proses pelepasan sumber radiasi (jenis, kuantitas dan bentuk kimia dari radionuklida yang dilepaskan) melalui dispersi radionuklida ke lingkungan dan transfernya ke manusia [1, 2]. Perkiraan dosis efektif perseorangan dan dosis efektif kolektif dipakai untuk memperkirakan kerusakan dan bahaya potensial dari efek kesehatan, seperti bahaya genetik dan kanker. Jika dosis perseorangan kecil, maka hubungan antara dosis efektif kolektif ekuivalen dan efek kesehatan diperkirakan linier. Perhitungan ini berkaitan dengan kapasitas 1 GW tenaga listrik per tahun dari reaktor nuklir. Oleh karena itu konsekuensi kesehatan publik secara nasional, regional atau global yang menggunakan tenaga nuklir, baik sekarang atau yang sudah direncanakan mungkin sulit dievaluasi.

Kontribusi penulis dalam makalah ini memberikan informasi konsekuensi operasi tenaga nuklir terhadap lingkungan, sehingga diharapkan sebagai pengelola PLTN (Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir) dapat mengantisipasi atau menekan seminimal mungkin dampak radiologi terhadap pekerja radiasi dan masyarakat pada umumnya. Penulis juga memberikan sosialisasi bahwa pengoperasian tenaga nuklir tidak memberikan dampak negatif, jika dilakukan pengendaliannya terhadap lingkungan secara sungguh-sungguh. Sesuatu yang baru dari makalah ini adalah : 1. dapat memperkirakan dosis ekuivalen efektif kolektif dalam kondisi normal dari siklus operasi tenaga nuklir pada pekerja dan penduduk lokal / regional 10, 100 atau 10.000 tahun yang akan datang. 2. dosis ekuivalen efektif kolektif global dari berbagai sumber radiasi. 3. Perkiraan dosis per kepala tahunan dari tenaga listrik nuklir sampai tahun 2500. 4. Aspek non radiologi, terhadap sistem pendingin, penggunaan lahan, pembuangan kimia, keuntungan limbah air panas, efeknya terhadap ikan, bentos, plankton, tanaman, binatang dan persiapan keadaan darurat nuklir.

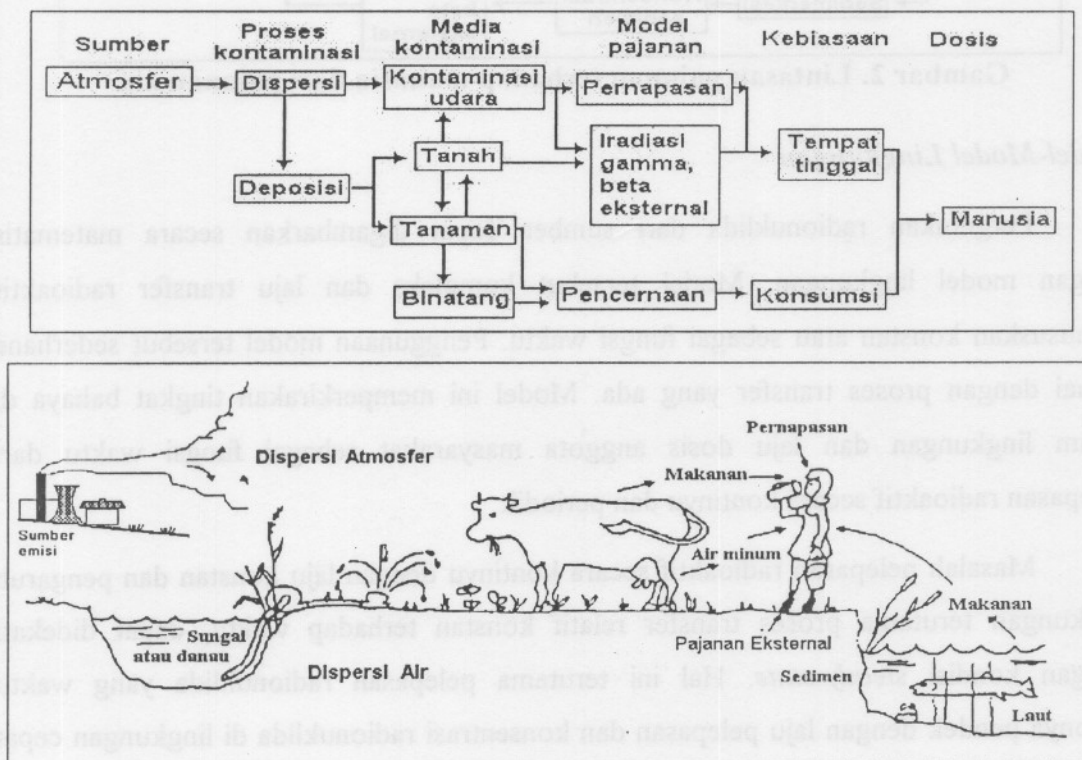
DASAR TEORI

Lintasan Paparan

Selama operasi normal, efluen yang dilepaskan ke lingkungan pada siklus bahan bakar nuklir membawa sedikit radionuklida. Hal ini karena waktu paronya pendek atau mobilitasnya ke lingkungan terbatas. Beberapa radionuklida seperti ^3H , ^{85}Kr , ^{14}C dan ^{129}I menjadi terdistribusi secara regional dan global, karena waktu paronya panjang dan cepat terhambur ke lingkungan [3, 4, 5, 6].

Lintasan Atmosfer

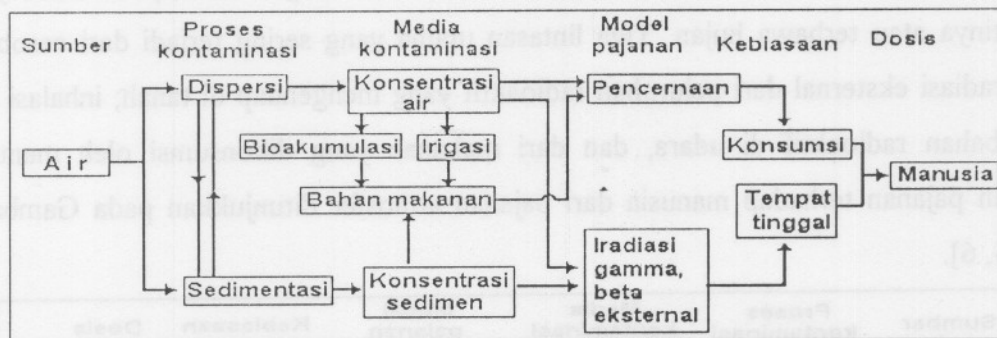
Bahan radioaktif yang dilepas ke atmosfer akan terbawa angin dan terhambur oleh proses pencampuran atmosfer secara normal. Radionuklida yang terhirup dan masuk ke dalam tubuh, maka radionuklida tersebut masuk ke tubuh secara internal, sedangkan iradiasi beta atau gamma dari cerobong terpajan secara eksternal. Bahan radioaktif mengalami proses deposisi melalui tumbukan dengan suatu permukaan yang dilewatinya atau terbawa hujan. Tiga lintasan utama yang sering terjadi dari cerobong yaitu iradiasi eksternal dari peluruhan radioaktif yang mengendap di tanah; inhalasi dari bahan-bahan radioaktif di udara, dan dari makanan yang dikonsumsi oleh manusia. Lintasan paparan terhadap manusia dari paparan atmosfer ditunjukkan pada Gambar 1 [3, 4, 5, 6].



Gambar 1. Lintasan paparan terhadap manusia dari paparan atmosfer.

Lintasan Air

Bahan radioaktif yang terlepas ke lingkungan air akan dilarutkan dan dihamburkan oleh pergerakan air, tetapi kemungkinan diabsorpsi menjadi sedimen (endapan). Tingkat aktivitas dalam fase air dapat membuat manusia terpajan baik secara eksternal maupun internal melalui konsumsi air minum atau melalui akumulasi air segar dan bahan makanan air laut. Irigasi menyebabkan air masuk ke dalam tanah dan dapat mencemari manusia. Radionuklida yang terkumpul dalam endapan menimbulkan pajanan eksternal bagi pekerja yang menghabiskan waktunya di sungai, danau, muara dan laut. Jika sedimen tersebut sampai di tanah pertanian, maka rantai makanan menjadi lebih penting daripada pajanan eksternal. Lintasan air diperlihatkan pada Gambar 2. Radionuklida yang terlepas ke sungai ditransfer ke laut melalui muara. Dispersi awal radionuklida di laut dipengaruhi kondisi lokal laut terutama air pasang surut dan sedimentasi [3, 4, 5, 6].



Gambar 2. Lintasan pajanan terhadap manusia dari pajanan air.

Model-Model Lingkungan

Pergerakan radionuklida dari sumber dapat digambarkan secara matematis dengan model lingkungan. Model tersebut kompleks dan laju transfer radioaktif dikhususkan konstan atau sebagai fungsi waktu. Penggunaan model tersebut sederhana sesuai dengan proses transfer yang ada. Model ini memperkirakan tingkat bahaya di dalam lingkungan dan laju dosis anggota masyarakat sebagai fungsi waktu dari pelepasan radioaktif secara kontinyu dan periodik.

Masalah pelepasan radioaktif secara kontinyu dengan laju konstan dan pengaruh lingkungan terutama proses transfer relatif konstan terhadap waktu, dapat didekati dengan kondisi *steady-state*. Hal ini terutama pelepasan radionuklida yang waktu paronya pendek dengan laju pelepasan dan konsentrasi radionuklida di lingkungan cepat dicapai dalam kondisi *steady state* [7].

HASIL DAN PEMBAHASAN

Operasi Pembangkit Tenaga Nuklir

Hampir semua produk fisi terbentuk selama operasi pembangkit listrik tenaga nuklir terutama berasal dari elemen bahan bakar nuklir. Sebagian kecil lolos ke dalam pendingin melalui kelongsong bahan bakar yang cacat / rusak dan menambah radionuklida yang dihasilkan melalui aktivasi neutron dari struktur bahan, korosi dan pengotor. Banyak radionuklida yang terlarut di dalam pendingin dapat menyebar ke lingkungan melalui sistem proses dalam bentuk cair atau gas. Kuantitas bahan radioaktif yang dilepaskan dari reaktor ke lingkungan bergantung pada desain dan pengolahan limbah radioaktif. Pelepasan radionuklida yang dilepas ke lingkungan udara, meliputi gas mulia (seperti krypton dan xenon) dari proses fisi, gas-gas yang teraktivasi (^{14}C , ^{16}N , ^{35}S , ^{41}Ar), tritium, halogen (lithium, boron,) dan partikulat radioaktif (caesium, ruthenium dan cobalt). Radionuklida yang dilepas ke lingkungan air, meliputi tritium, produk fisi (seperti iodin (^{131}I dan ^{129}I)), dan produk aktivasi. Dosis efektif kolektif ekuivalen tahunan untuk pekerja pembangkit tenaga nuklir 10 man.Sv per GW(e) / tahun [8]. Dosis efektif ekuivalen penduduk dari berbagai radionuklida ditampilkan pada Tabel 1, sedangkan dosis efektif ekuivalen penduduk dari efluen daur bahan bakar nuklir diperlihatkan pada Tabel 2.

Tabel 1. Dosis ekuivalen efektif kolektif penduduk lokal dan regional dari operasi tenaga nuklir [8]

Radionuklida	Man. Sv per GW(e).a
Atmosfer :	
- Gas Mulia	0,6
- ^{35}S	diabaikan
- ^3H	0,5
- ^{14}C	2,8
- Radioiodin (terutama ^{131}I)	0,6
- Partikulat : caesium, ruthenium, cobalt	0,1
Air :	
- Tritium	0,03
- Partikulat : caesium, ruthenium, cobalt	0,04

Tabel 2. Dosis ekuivalen efektif kolektif penduduk lokal dan regional dari efluen daur bahan bakar nuklir [8]

Radionuklida	Man. Sv per GW(e).a
Atmosfer :	
- ^3H	0,1
- ^{85}Kr	0,03
- ^{14}C	0,2
- ^{129}I	kecil
- ^{90}Sr	kecil
- Pemancar alpha (transuranium)	0,02
Air :	
- Tritium	kecil
- ^{134}Cs dan ^{137}Cs	0,4
- ^{106}Ru	0,3
- ^{90}Sr	0,02
- Pemancar alpha :	0,0006
- ^{129}I	0,008

Pembuangan Limbah Radioaktif

Limbah yang terdiri dari uranium hasil daur ulang atau tanpa daur ulang dan plutonium tanpa *recovery* disebut sebagai limbah transuranium. Umumnya di berbagai negara mengurangi resiko potential limbah radioaktif untuk generasi mendatang ditempatkan di gudang bawah tanah [4, 5, 6]. Hal ini secara kuantitas risikonya dapat diperkirakan di bawah resiko radiasi cacah latar alam, juga radiasinya dapat diperkirakan tidak diterima para pekerja sampai ribuan bahkan jutaan tahun. Dosis efektif kolektif ekuivalen yang memungkinkan berasal dari pembuangan limbah radioaktif adalah seminimum mungkin.

Pajanan Total Dan Dosis Ekuivalen dari Operasi Tenaga Nuklir

Dosis ekuivalen efektif kolektif secara normal dari siklus operasi tenaga nuklir untuk pekerja dan penduduk ditampilkan pada Tabel 3. Dosis tersebut diperoleh dari pengalaman operasi tenaga nuklir beberapa negara. Kontribusi terbesar adalah operasi reaktor dan daur bahan bakar nuklir. Banyak dari kontribusi lokal dan regional menyampaikan dosis ekuivalen efektif kolektif dalam beberapa tahun, sebaliknya kontribusi global sebagian karena radionuklidanya berumur sangat panjang sampai 10^4 tahun. Biasanya perhitungan dosis setelah 10^4 tahun amat spekulatif, seperti kemungkinan memprediksi jumlah populasi dunia dan kebiasaannya atau makanan dietnya. Karena perhitungan dosis terpotong sampai 10^4 tahun, maka tidak ada kontribusi dari operasi pembuangan limbah tingkat tinggi yang dianggap bahwa kegiatan ini terpisah dari biosfer [8].

Pentingnya dosis ekuivalen efektif kolektif yang merupakan hasil dari operasi tenaga nuklir dapat diperkirakan dalam beberapa cara yaitu :

- a. Berdasarkan hipotesa bahwa kematian akibat kanker yang timbul satu tahun akibat operasi tenaga nuklir 87,3 GW(e) / tahun pada tahun 1981 diperkirakan total kira-kira 30 sampai 300 lebih, pada 10 ribu tahun yang akan datang terjadi laju penurunan. Sebagai perbandingan, kematian kanker penduduk dunia secara alami sekitar 5 juta per tahun, menurut statistik WHO [9].

Tabel 3. Dosis ekivalen efektif kolektif secara normal dari siklus operasi tenaga nuklir [8]

Komponen siklus Bahan Bakar	Pekerja (man.Sv per GW(e)./ tahun)	Penduduk lokal dan regional (man.Sv per GW(e).tahun)	Global (seluruh dunia)			
			Man.Sv per GW(e)./ tahun dilepaskan sampai waktu ke			
				10 tahun	100 tahun	10.000 tahun
Penambangan-Penggilangan	1	0,54		0,25	2,5	250
Fabrikasi bh.bk	1	0,002		diabaikan		
Operasi reaktor (dekomisioning)	10	4,2	Tritium	0,015	0,02	0,02
			⁸⁵ Kr	0,9	1,9	1,9
			¹⁴ C	3	10	70
Daur bh.bkr. (dekomisioning)	10	1,0	¹²⁹ I	-	0,02	0,2
			subtotal	3,9	12	72
Transport	0,001	0,003		diabaikan		
Pembuangan limbah	kecil	diabaikan		diabaikan		
Penelitian nuklir	5					
Total	~ 30	5,7		4,2	15	320
Kematian akibat kanker	0,3	0,057		0,04	0,15	3,2

- b. Dosis ekivalen efektif kolektif total dari tenaga nuklir dapat juga dibandingkan terhadap nilai yang diperoleh untuk sumber lain dari pajanan radiasi. Hal ini ditunjukkan pada Tabel 4 bahwa dosis ekivalen efektif kolektif dinyatakan sebagai lamanya pajanan radiasi alam yang menyebabkan kerusakan yang sama. Satu tahun dari operasi tenaga nuklir pada tahun 1981 diperkirakan pajanan kolektif dihubungkan dengan satu hari radiasi alam, disampaikan pada perubahan laju 10 ribu tahun yang akan datang. Sebagai perbandingan, hasil pajanan dari ledakan nuklir di atmosfer dan dari penggunaan diagnosis medis harus diperhatikan lebih utama.

Tabel 4. Dosis ekivalen efektif kolektif global dari berbagai sumber radiasi [8]

Sumber pajanan	Dosis ekivalen efektif global (Jumlah hari terhadap radiasi alam)
1 tahun pajanan terhadap sumber alam	365
1 tahun perjalanan udara komersial	0,1
1 tahun penggunaan pupuk fosfat	0,3
1 tahun produksi global energi listrik dari batubara (1000 GW(e))	0,07
1 tahun produksi tenaga nuklir (90 GW(e).a)	1
1 tahun ledakan nuklir rata-rata selama 30 tahun	50
1 tahun penggunaan radiasi di dalam diagnosis medis	70

- c. Cara lain yang menyatakan pajanan radiasi dari tenaga nuklir dengan sumber radiasi lain adalah untuk menunjukkan dosis ekivalen efektif per kepala tahunan hasil dari beberapa sumber. Kontribusi dari tenaga nuklir lebih rendah daripada kontribusi dari sumber lain. Dengan cara serupa, kecenderungan masa depan berdasarkan waktu per kepala tahunan, dosis dapat diperkirakan dari pertumbuhan tenaga nuklir dan dari laju pelepasan radionuklida yang penting. Tabel 5 memperlihatkan peningkatan penggunaan dosis ekivalen efektif per kepala tahunan dari tenaga nuklir secara stabil dan berkelanjutan masih sedikit. Perkiraan ini berdasarkan pengalaman yang ada dan bukan berdasarkan kemungkinan pengembangan pelatihan manajemen limbah.

Tabel 5. Dosis per kepala tahunan dari tenaga listrik nuklir sampai tahun 2500 [8]

	Tahun			
	1980	2000	2100	2500
Proyek tenaga nuklir tahunan	80	1.000	10.000	10.000
Dosis efektif kolektif tahunan (man.Sv)	500	10.000	200.000	250.000
World population	4×10^9	10^{10}	10^{10}	10^{10}
Dosis per kepala tahunan	0,1	1,0	20	25
Persentase pajanan rata-rata terhadap sumber radiasi alam	0,005	0,05	1	1

Aspek Non Radiologi

Semua kegiatan dalam operasi suatu instalasi dapat mengganggu lingkungan, begitu juga dengan instalasi tenaga nuklir. Beberapa hasil gangguan tidak dari bahan bakar alami yang digunakan, tetapi dari konstruksi dan operasi fasilitas tenaga nuklir. Efek utama yang perlu dipertimbangkan adalah [10] :

1. sistem pendingin
2. penggunaan lahan
3. faktor lain, seperti estetika, perubahan tempat tinggal dan lain-lain

Sumber limbah panas

Kebanyakan limbah panas di dalam siklus bahan bakar nuklir (sekitar 93 %) dibuang ke lingkungan selama operasi reaktor. Sisa pembuangan panas terjadi terutama pada bagian pengayaan uranium, sedangkan bagian lain dari siklus bahan bakar nuklir agak kecil. Turbin uap modern beroperasi dengan ketel uap berbahan bakar fosil konvensional mampu mencapai efisiensi panas 37 – 38 % (40 – 43 %), tetapi kondisi uap dari reaktor nuklir mempunyai efisiensi turbin lebih rendah sekitar 30 % [10]. Di dalam tenaga listrik berbahan bakar fosil kira-kira 10 % dari total panas ketel uap dilepas ke atmosfer melalui cerobong, sedangkan di dalam tenaga nuklir panas yang dihasilkan dari teras reaktor digunakan untuk membangkitkan uap. Meskipun efisiensi turbin rendah, tidak ada perbedaan yang berarti dalam pembuangan panas total ke lingkungan antara nuklir dan bahan bakar fosil dengan tenaga listrik yang dihasilkan sama besar. Seandainya digunakan metode pendinginan satu jalur digunakan panas yang tidak digunakan lebih besar dibuang ke air dari tenaga nuklir daripada dari tenaga listrik berbahan bakar fosil. Reaktor nuklir (menggunakan pendingin gas atau logam cair) di masa yang akan datang diharapkan mempunyai efisiensi panas yang sama atau lebih tinggi dibandingkan tenaga listrik berbahan bakar fosil.

Efek Lingkungan [4, 5, 6]

a. Efek panas pada kehidupan air

Tidak ada keraguan bahwa pembuangan limbah panas ke dalam air dapat mengubah lingkungan air. Kemungkinan ini telah diakui selama bertahun-tahun dan telah ditandai pengaruhnya pada penempatan pembangkit tenaga listrik dan pemilihan metode pendinginan. Pengetahuan tentang kehidupan air yang ada di dalam penampungan air sangat perlu untuk merancang seminimum mungkin dampak yang

muncul dari pelepasan limbah panas, sehingga pembangunan tenaga listrik memenuhi standar kualitas air. Suhu yang tidak tepat dapat mempengaruhi reproduksi, pertumbuhan, kelangsungan hidup mikro organisme, anak-anak, dewasa dan semua proses kehidupan dalam memelihara kesehatan. Berikut beberapa masalah yang terkait dengan efek panas dari operasi tenaga nuklir.

Efek pada ikan

Perhatian utama ditujukan pada suhu yang mematikan terhadap spesies air dan terhadap efek yang tidak kelihatan dari suhu yang kurang mematikan pada hubungan perilaku, reproduksi, rantai makanan, pertumbuhan dan faktor lain yang memberikan dampak penting pada kesehatan populasi dan komunitas air. Namun begitu untuk alasan praktis, tugas awal dalam pembuatan fasilitas tenaga nuklir adalah merancang sedemikian rupa sehingga risiko dari suhu yang mematikan secara langsung dapat diperkirakan. Data suhu dapat memberikan pemikiran awal terhadap kemungkinan risiko panas yang mematikan pada ikan. Mengetahui perilaku ikan juga dapat digunakan memperkirakan risiko panas yang mematikan pada ikan. Respon organisme laut terhadap interaksi suhu, salinitas dan oksigen yang terlarut berbeda terhadap perubahan faktor lingkungan dipengaruhi kuat oleh faktor yang lain. Suhu mematikan untuk spesies tertentu bervariasi tergantung adaptasi, musim, jenis kelamin, umur, fisiologi, sifat kimia fisika air dan faktor lain. Ketidak beradaan ikan yang mati dalam pembuangan limbah panas dari instalasi pembangkit tenaga nuklir merupakan hasil yang luar biasa pada kemampuan mencegah suhu mematikan pada ikan yang diinginkan. Suhu mematikan pada ikan dan organisme laut perlu dilakukan penelitian di laboratorium dan perlu hati-hati untuk diterapkan di lapangan. Efek panas pada daerah sedang cenderung kurang bahaya dibandingkan di daerah tropis. Banyak ikan cenderung memberikan respon terhadap suhu mematikan yaitu berperilaku saling berkumpul pada suhu yang lebih disukai. Pada musim dingin kumpulan ikan pada air hangat di sekitar saluran pembuangan umumnya dapat diamati pada pembangkit tenaga listrik atau uap. Kumpulan ikan tersebut menguntungkan pemancing ikan, karena tersedia ikan dalam jumlah banyak.

Efek pada plankton

Ahli biologi menyebutkan pada prinsipnya efek panas pada plankton sama dengan ikan, walaupun plankton berada pada level tropik yang rendah. Perhatian utama ditujukan pada bagaimana pelepasan panas mempengaruhi metabolisme, fisiologi,

pertumbuhan, reproduksi, dinamika populasi, dan proses kehidupan lain dari spesies plankton.

Relatif sedikit pengetahuan tentang dinamika populasi dari satu spesies plankton, bahkan banyak spesies plankton pada kumpulan air. Identifikasi dan pencuplikan plankton lebih sulit daripada ikan. Plankton merupakan bagian penting dari ekosistem, karena berfungsi sebagai makanan ikan atau organisme lain. Populasi Plankton yang mati akibat limbah panas dari fasilitas pembangkit tenaga listrik sulit untuk diperkirakan secara keseluruhan. Banyak jentik (larva) ikan tahan terhadap panas lebih besar daripada 99,99 % yang mati secara alami.

Efek pada benthos

Suhu effluen dari instalasi tenaga nuklir tidak terlalu panas rata-rata sekitar 10 °C di atas suhu ambien, oleh karena itu tempat penampungan limbah panas secara alami yang letaknya di tepi pantai tidak akan sunyi dari kehidupan organisme air. Meskipun begitu, keragaman flora dan fauna dari benthos yang dekat pembuangan panas diharapkan berubah.

Organisme yang hidup di dasar air merupakan indikator yang baik dalam mengetahui pengaruh efek panas. Organisme tersebut diantaranya adalah tanaman berakar, binatang tidak bertulang belakang dan ganggang merupakan organisme yang tidak bergerak. Oleh karena itu pemantauan ekologi terhadap fasilitas nuklir penting, termasuk pencuplikan pada dasar air baik sebelum atau sesudah beroperasi. Pembuangan panas merusak organisme dasar air yang merupakan makanan ikan. Populasi ikan akan tahan pada kehangatan, karena ikan tergantung pada makanan level tropika rendah untuk keberhasilan pertumbuhan dan reproduksi.

Sistem pipa-pipa yang besar digunakan di instalasi pembangkit tenaga listrik untuk sirkulasi air panas dan organisme air yang terdapat di dalamnya. Hal ini bisa berakibat bahaya biologi khususnya dihubungkan dengan kejutan panas dan racun biologi yang dapat menurunkan organisme air dekat jalur masuk pipa.

b. Menara pendingin [11]

Pendingin siklus tertutup dengan berbagai rancangan pada prinsipnya lebih ringan secara teknik untuk efek ekologi daripada pendingin satu jalur. Disamping itu mengurangi panas yang dikeluarkan, sistem pendingin evaporasi (penguapan) mengurangi konsumsi sumber daya air yang tersedia. Dampak sistem pendingin

terhadap lingkungan perlu diperhatikan. Embun dari menara pendingin dapat bereaksi secara kimiawi dengan SO_2 dari emisi cerobong di pembangkit tenaga berbahan bakar fosil dan menghasilkan asam sulfat yang berbahaya.

Banyak menara pendingin menggunakan metode satu jalur untuk mengurangi suhu keluaran dari sistem pendingin rangkaian terbuka. Sistem pendingin ini mengurangi efek panas dari pembuangan panas ke lingkungan. Kuman penyakit dapat juga berkembang biak di dalam rangkaian pendingin dan dapat menyebar ke lingkungan melalui arah angin. Menara pendingin juga dapat menimbulkan suara berisik di pembangkit tenaga nuklir. Hujan lebat yang jatuh ke dalam kolam pengumpul air di dasar menara pendingin dapat terdengar sampai 1,5 km.

Keuntungan penggunaan limbah panas [4, 5, 6]

Analisis ekonomi dari pertumbuhan tanaman di rumah kaca *greenhouse* yang dipasok dari pembuangan panas dan sebidang tanah dihangatkan dengan pipa yang terpendam di tanah menunjukkan bahwa tanaman yang tumbuh pada tempat pembuangan panas mempunyai dampak positif pada ekonomi lokal. Hal ini disarankan untuk pembangkit tenaga nuklir dan pengayaan bahan bakar yang pelepasan panasnya berdampak terhadap tanaman karena ukurannya besar. Sebagai contoh di Cadarache, Perancis, pelepasan panas melalui pipa yang diselimuti dilewatkan tanah yang ditanami menghasilkan panen dua kali lebih banyak dalam waktu satu sampai tiga bulan. Tanaman tersebut adalah 40 ton kentang per hektar dibandingkan 20 ton sebelumnya dan 50 ton strawberry per hektar yang sebelumnya cuma 20 ton.

Pembuangan limbah panas tidak hanya dipertimbangkan efek negatifnya terhadap lingkungan, tetapi juga menimbulkan keuntungan pada ekonomi lokal, peningkatan tanaman, reproduksi binatang dan ikan, menciptakan daerah hijau permanen terhadap peningkatan tataruang dalam mempercepat pertumbuhan hutan.

Pembuangan kimia [10]

Biosid khususnya klorine digunakan untuk mengontrol organisme pengotor yang dapat menurunkan efisiensi listrik. Dari sudut operasional, klorine yang dipakai secukupnya, sedangkan dari sudut lingkungan, dampak terhadap ekosistem berbahaya dari operasi pembangkit tenaga listrik, sebaiknya pemakaian klorine diminimalkan. Organisme pengotor ini dibedakan dua kelompok yaitu kelompok mikro (seperti jamur, bakteri, ganggang) dan makro (kerang, keong berkelopak dua, bunga karang, hewan tidak

bertulang belakang, dan hidroid). Binatang berkelopak dua sering mengganggu fungsi kondensor.

Fluorin terdapat dalam siklus bahan bakar selama produksi UF_6 dan terdapat sebagai effluen udara dalam siklus bahan bakar. Fluorin ini bukan merupakan sumber effluen yang besar di fasilitas nuklir dibandingkan industri besar lainnya, tetapi dalam skala lokal dapat menimbulkan efek yang merugikan lingkungan.

Cairan yang berasal dari proses pelarutan asam digunakan dalam pengolahan uranium mengandung asam sulphur dan bahan kimia lainnya. Cairan ini secara normal dinetralkan dengan kapur dan dikirim ke kolam *tailing* untuk di daur ulang. Effluen cairan dari konversi UF_6 , pengayaan uranium, fabrikasi bahan bakar dan pemrosesan ulang bahan bakar mengandung sulfat, fluorida, klorida, sodium, potassium, ammonium dan besi. Cairan tersebut diencerkan pada tingkat yang diperlukan untuk menjaga kualitas air.

Penggunaan lahan [3]

Reaktor daya dianggap mampu berumur 30 tahun. Selama waktu itu penggunaan lahan tidak melebihi 40 hektar untuk reaktor berdaya 1 GW(e). Sebagai perbandingan untuk pembangkit listrik 1 GW(e) dari bahan bakar batubara memerlukan 1600 hektar per tahun untuk pertambangan.

Persiapan Keadaan Darurat Nuklir [12]

Meskipun undang-undang keselamatan secara terperinci dilengkapi pada pembangkit tenaga nuklir, perencanaan kedaruratan nuklir perlu disiapkan untuk melindungi pekerja, masyarakat dan lingkungan sekitarnya dari kecelakaan yang tidak diinginkan. Perencana kedaruratan nuklir melibatkan beberapa instansi yang bertanggung jawab masing-masing terhadap keselamatan bersama. Perlengkapan dan pelayanan yang diperlukan diuji dan sumber yang ada disusun. Informasi sederhana berupa leaflet atau brosur perlu dibagikan ke penduduk yang tinggal dekat fasilitas yang menggambarkan aspek penting dari perencanaan respon kedaruratan nuklir dan memberikan instruksi sederhana pada kegiatan yang perlu dilakukan.

Operator instansi bertanggung jawab dalam pelaksanaan kedaruratan nuklir termasuk kegiatan *shut down* dan mengkonfigurasi kondisi aman suatu instansi. Operator juga bertanggung jawab dalam perkiraan awal kecelakaan dan melaporkan kepada penguasa publik (lokal, nasional, regional) dalam rangka memutuskan tindakan

untuk mengurangi bahaya potensial terhadap publik. Prosedur perlu untuk menyiapkan dan mengkomunikasikan ke penduduk sekitar instansi.

Pada hari pertama sampai beberapa minggu sesudah kecelakaan, pemantauan dan evaluasi kontaminasi radiasi dilanjutkan, perkiraan detil pada saat beroperasi dan tidak perlu dibuat, bila perlu bantuan internasional. Penyedia perbekalan dan bagian pembangunan pabrik perlu dilibatkan dalam memperkirakan operasi teknik dari *recovery*.

Perlindungan terhadap penduduk lebih diutamakan, bila pada saat kecelakaan bahaya besar berasal dari pajanan radiasi langsung berupa awan radioaktif, gas mulia xenon dan kripton, radioiodin dan partikel kecil hasil produk fisi. Di dalam rumah perlu diukur dalam jangka pendek, jika radioaktif yang terlepas ke lingkungan orde pendek. Menutup jendela mungkin mengurangi dosis radiasi yang terhirup lewat pernapasan dan dinding bangunan (tergantung konstruksinya) melindungi bahaya radiasi secara langsung. Obat iodine stabil tersedia untuk menahan radioiodine masuk ke thiroid. Risiko efek samping dari potassium iodida (KI) atau iodat dipertimbangkan rendah. Evakuasi mungkin diperlukan untuk menghindari bahan kimia, melindungi penduduk dari bahaya yang tidak diinginkan, antisipasi tindak kehati-hatian dari kondisi yang lebih buruk atau kondisi yang tidak diketahuinya di masa yang akan datang.

Kondisi meteorologi berpengaruh atas transportasi dan dispersi bahan-bahan radioaktif udara. Oleh karena itu pengetahuan meteorologi dan dosis radiasi adalah dua kunci utama prediksi konsekuensi dan untuk menentukan keperluan pengukuran. Bangunan yang dapat digunakan sebagai pelindung adalah yang relatif konstruksinya kuat tidak rapuh dan kedap udara (rapat), jika ventilasinya dapat dikontrol sedemikian rupa sehingga penghuninya menerima dosis pajanan radiasi serendah mungkin. Diharapkan bahan radioaktif yang dilepas ke lingkungan dari fasilitas nuklir mempunyai waktu paruh pendek. Seandainya pada sisi lain bahan radioaktif yang dilepas berlarut-larut dalam waktu lama, maka evakuasi penduduk lebih tepat. Faktor-faktor higiene, sosial dan masalah makanan mungkin menjadi faktor batasan dalam perlindungan penduduk jangka panjang (lebih dari 12 jam), kecuali fasilitas yang dirancang untuk itu. Oleh karena itu penduduk disarankan tinggal di dalam rumah untuk menghindari awan radioaktif dalam jangka pendek.

Deposisi dari bahan radioaktif yang berupa udara dari cerobong dapat menimbulkan masalah kontaminasi jangka panjang. Keputusan yang harus diambil, bila

ada deposisi tersebut adalah menghindari makanan dan minuman yang dicerna bebas dari kontaminasi dan membatasi jalan masuk ke daerah kontaminasi.

KESIMPULAN

Bagian yang perlu diperhitungkan dalam pengoperasian tenaga nuklir adalah proses pelepasan sumber radiasi (jenis, kuantitas dan bentuk kimia dari radionuklida yang dilepaskan) melalui dispersi radionuklida ke lingkungan dan transfernya ke manusia. Bagian yang perlu diperhatikan dalam kondisi normal, walaupun pengaruhnya relatif kecil adalah pajanan total dan dosis ekuivalen dari operasi tenaga nuklir, pembuangan limbah radioaktif, aspek non radiologi pembuangan kimia, penggunaan lahan, penggunaan limbah panas, sistem pendingin, efek pada ikan, bentos, plankton, binatang dan tanaman. Dalam kondisi terjadi kecelakaan, bahan-bahan radioaktif yang dilepas ke lingkungan berpengaruh cukup besar terhadap makhluk hidup, oleh karena itu perlu perencanaan kedaruratan nuklir untuk melindungi pekerja, masyarakat dan lingkungan sekitarnya dari kecelakaan yang tidak diinginkan.

DAFTAR PUSTAKA

1. NRPB (National Radiological Protection Board), 1981, Living with Radiation, brochure, UK.
2. UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), 1977, Ionizing Radiation : Sources and Biological Effects, United Nations, New York.
3. RCEP (Royal Commission on Environmental Pollution), 1976, Nuclear Power and the Environment, sixth Report, HMSO, London.
4. ALEXANDROV, A.P., ENERGOIZDAT, 1981, Nuclear Energy, Man and the Environment, Moskow.
5. EL-HINNAWI, E.E., 1980, Nuclear Energy and the Environment, UNEP, Environmental Sciences and Applications, Vol. 11, Pergamon, London.
6. PENTREATH, R.J., 1980, Nuclear Power, Man and the Environment, Wykeham Science Series.

7. IAEA, 1982, Generic Models and Parameters for Assessing the Environmental Transfer of Radionuclides from Routine Release : Exposures of Critical Groups, Safety Series No. 57, Vienna.
8. UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), 1982, Ionizing Radiation : Sources and Biological Effects, Annexes – UN Sales Publication E.82.IX.8, Report to General Assembly, United Nations, New York.
9. WHO, 1978, Health Implications of Nuclear Power Production, WHO Regional Publication, European Series No. 3, Copenhagen.
10. UN Environment Programme, 1981, The Environmental Impacts of Production and Use of Energy, Tycooly Int. Press Ltd. Dublin.
11. IAEA, 1980, Environmental Effects of Cooling Systems, Technical Reports Series No. 202
12. IAEA, 1981, Planning for off-site Response to Radiation Accidents in Nuclear Facilities, IAEA Safety Series No. 55, Vienna.

DISKUSI:

PERTANYAAN : (Silakhuddin - P2SRM BATAN)

- Mengapa Np 237 dan Am-241 tidak dimasukkan sbg unsur -unsur yang disebut dlm makalah ini sbg yang diperhitungkan?.

JAWABAN : (Gatot S.)

- *Np-237 dan Am241 sebagian besar tidak/bukan udara atau bukan air tetapi dalam bentuk padat, oleh sebab itu kecendrungan menyebarkan ke lokasi terdekat dengan sumber Am 241 dan Np 237, berbeda bila sumbernya dalam bentuk cair atau gas yang mudah menyebar ke lingkungan.*