

ESTIMASI NILAI BATAS LEPASAN (NBL) REAKTOR TRIGA 2000 BANDUNG

Juni Chussetijowati, Rini Heroe Oetami

Pusat Sains dan Teknologi Nuklir Terapan, Jl. Tamansari 71, Bandung, 40132

ABSTRAK

ESTIMASI NILAI BATAS LEPASAN (NBL) REAKTOR TRIGA 2000 BANDUNG. Kajian estimasi nilai batas lepasan (NBL) reaktor TRIGA 2000 Bandung telah dilakukan. Tujuan kajian adalah menentukan estimasi NBL radioaktivitas yang keluar dari cerobong reaktor TRIGA 2000 Bandung ke lingkungan, dimana lepasan radioaktivitas tersebut diharapkan masih berada pada batas aman bagi pekerja radiasi, anggota masyarakat serta lingkungan hidup. Dalam “Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 4 Tahun 2013 tentang Proteksi dan Keselamatan Radiasi dalam Pemanfaatan Tenaga Nuklir” dan “Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 7 Tahun 2013 tentang Nilai Batas Radioaktivitas Lingkungan” ditentukan bahwa Pemegang Izin Pemanfaatan Tenaga Nuklir harus menetapkan pembatas dosis untuk pekerja radiasi, anggota masyarakat dan pembatas dosis spesifik tapak serta menghitung NBL radioaktivitas ke lingkungan. NBL di sini dihitung berdasarkan metode dalam Safety Reports Series Nomor 19 dengan mengambil asumsi model “no dilution” dan tidak ada pengaruh efek bangunan serta kecepatan angin 2 meter/detik. Suku sumber utama yang keluar dari gedung reaktor ditetapkan yaitu radionuklida I-131 dan Cs-137. Aktivitas I-131 dan Cs-137 yang terlepas dari kelongsong bahan bakar reaktor TRIGA 2000 Bandung hingga ke gedung reaktor masing-masing sebesar $1,03 \cdot 10^{-2}$ dan $2,91 \cdot 10^5$ Bq. Jalur paparan radionuklida sampai ke masyarakat dipilih melalui jalur imersi, inhalasi dan terpapar dari tanah yang terkontaminasi. Bila ditetapkan pembatas dosis untuk masyarakat (dewasa) yang tinggal pada jarak 1 km dari cerobong reaktor TRIGA 2000 Bandung sebesar 0,1 mSv/tahun maka diperoleh NBL I-131 dan Cs-137 masing-masing sebesar $1,19 \cdot 10^{-5}$ Bq/detik dan 336 Bq/detik.

Katakunci: nilai batas lepasan, radionuklida, imersi, inhalasi

ABSTRACT

ESTIMATION OF DISCHARGE LIMITS FROM TRIGA 2000 BANDUNG REACTOR. Study of estimation the value of discharge limits from TRIGA 2000 reactor Bandung has been done. The purpose of the study is to determine the estimated value of discharge limits radioactivity from the TRIGA 2000 Bandung reactor stack into the environment, where the radioactivity discharge are expected still to be in the safe limits for the radiation workers, members of public and the environment. In the “BAPETEN Chairman’s Regulation Number 4 Year 2013 on Radiation Protection and Safety in Nuclear Energy Utilization” and “BAPETEN Chairman’s Regulation Number 7 Year 2013 on Limits of Radioactivity Value in the Environment” determined that the licensee should established the dose constraint for radiation workers, member of public and site specific as well as calculate the discharge limit value into the environment. The value of discharge limits is calculated based on the method in the Safety Reports Series Number 19 by taking the model assuming “no dilution” and no effect to the buildings and wind speed of 2 m/s. The main source term out of the hall reactor determined are radionuclides I-131 and Cs-137. The activity of I-131 and Cs-137 released from the fuel cladding TRIGA 2000 reactor Bandung to the hall reactor respectively are $1.03 \cdot 10^{-2}$ and $2.91 \cdot 10^5$ Bq. The exposure pathways of radionuclide to humans have been through immersion, inhalation and exposure of the contaminated soil. When the designated of dose limiting to the public (adults) who live at a distance of 1 km from stack TRIGA 2000 reactor Bandung of 0.1 mSv/year, then obtained value of the discharges limits I-131 and Cs-137 respectively are $1.19 \cdot 10^{-5}$ Bq/sec and 336 Bq/sec.

Keywords: value of discharge limits, radionuclide, immersion, inhalation

1. PENDAHULUAN

Kawasan Nuklir Bandung dimana terletak Pusat Sains dan Teknologi Nuklir Terapan (PSTNT) BATAN Bandung merupakan kawasan nuklir pertama di Indonesia. Di dalamnya dibangun reaktor nuklir untuk pemanfaatan tenaga nuklir dengan tujuan diantaranya untuk penelitian dan pendidikan, serta pernah dimanfaatkan juga untuk produksi radioisotop.

Saat ini, reaktor nuklir Bandung diberi nama reaktor TRIGA 2000 Bandung, dengan daya operasi hingga 2 Mega Watt (2 MW).

Kawasan Nuklir Bandung berlokasi di Jalan Tamansari 71, Kotamadya Bandung, Propinsi Jawa Barat. Kawasan Nuklir Bandung menempati area sekitar 3 hektar, berada di sebelah :

- a. Utara : Kebun Binatang Bandung
- b. Timur : Sungai Cikapundung
- c. Selatan : Sasana Budaya Ganesha ITB, dan
- d. Barat: Kampus ITB.

Pusat Sains dan Teknologi Nuklir Terapan mempunyai tugas melaksanakan perumusan dan pengendalian kebijakan teknis, pelaksanaan, dan pembinaan dan bimbingan di bidang penelitian dan pengembangan senyawa bertanda dan radiometri, pemanfaatan teknofisika, dan pengelolaan reaktor riset [1].

Pengoperasian dan pemanfaatan reaktor nuklir serta ilmu pengetahuan dan teknologi (IPTEK) nuklir telah dirasakan manfaatnya dalam berbagai bidang kehidupan, diantaranya dalam bidang penelitian, pendidikan, pertanian, peternakan, perairan, industri, energi dan kedokteran.

Disamping mempunyai manfaat, nuklir juga mempunyai potensi bahaya bagi pekerja radiasi, anggota masyarakat, dan lingkungan hidup apabila dalam pelaksanaan pemanfaatan tenaga nuklir tidak dilakukan sesuai dengan prosedur dan pengawasan yang benar.

Salah satu potensi bahaya pemanfaatan tenaga nuklir adalah terlepasnya radionuklida atau zat radioaktif atau radioaktivitas ke lingkungan, pada pengoperasian dan pemanfaatan reaktor nuklir, baik reaktor beroperasi pada kondisi normal ataupun kecelakaan.

Radionuklida dalam bentuk gas atau aerosol radioaktif yang bercampur dengan gas, yang terlepas dari gedung reaktor melalui cerobong (*stack*) reaktor nuklir akan terlepas ke udara atmosfer. Dengan adanya pengaruh meteorologi dan cuaca, radionuklida di udara atmosfer akan terdispersi dan terdeposisi ke permukaan tanah, tanaman, hewan, perairan dan akhirnya sampai ke manusia.

Radionuklida yang sampai ke manusia akan

memberikan paparan radiasi eksternal maupun dosis internal, dimana paparan dan dosis ini akan mempengaruhi kesehatan manusia apabila melebihi batas ambang yang telah ditentukan.

Oleh karena itu, Pemegang Izin sebagai penguasa instalasi nuklir harus mendapat pengawasan dari Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN) melalui peraturan, perizinan, dan inspeksi terhadap segala kegiatan pemanfaatan tenaga nuklir termasuk di dalamnya kegiatan pengoperasian dan pemanfaatan reaktor nuklir yang dilakukan.

Pemegang Izin adalah orang atau badan yang telah menerima izin Pemanfaatan Tenaga Nuklir dari BAPETEN [2].

Dalam pemanfaatan tenaga nuklir, Pemegang Izin wajib menerapkan persyaratan Proteksi Radiasi yang meliputi :

- a. Justifikasi. Kegiatan pemanfaatan tenaga nuklir harus mempunyai manfaat yang lebih besar dibanding dengan resiko yang ditimbulkan
- b. Limitasi dosis. Dosis radiasi yang diterima pekerja radiasi atau anggota masyarakat tidak boleh melebihi nilai batas dosis (NBD) yang ditetapkan oleh BAPETEN; dan
- c. Optimisasi Proteksi dan Keselamatan Radiasi. Hal ini dapat dilakukan dengan menentukan nilai pembatas dosis.

Dalam kaitan dengan persyaratan “Optimisasi”, Pemegang Izin harus menetapkan pembatas dosis untuk pekerja radiasi, anggota masyarakat dan pembatas dosis spesifik tapak [2] serta nilai batas lepasan (NBL) radioaktivitas ke lingkungan untuk tujuan desain proteksi radiasi fasilitas [3].

Nilai batas lepasan radioaktivitas ke lingkungan (*discharge limit*) adalah nilai batas lepasan zat radioaktif (udara dan air) ke lingkungan secara terencana dan terkendali yang ditetapkan atau diotorisasi oleh Badan Pengawas Tenaga Nuklir [3].

Dalam makalah ini dilaporkan hasil kajian estimasi nilai batas lepas (NBL) reaktor TRIGA 2000 Bandung, menggunakan metode dalam *Safety Reports Series No. 19* (SRS No. 19) [4].

Tujuan kajian adalah menentukan estimasi NBL radioaktivitas yang keluar dari cerobong reaktor TRIGA 2000 Bandung ke lingkungan, dimana lepasan radioaktivitas tersebut diharapkan masih berada pada batas aman bagi pekerja radiasi, anggota masyarakat serta lingkungan hidup. NBL ini diharapkan dapat digunakan untuk pengendalian NBL radioaktivitas yang keluar dari cerobong reaktor ke lingkungan. Selain itu, juga sebagai salah satu upaya memenuhi ketentuan dalam “Peraturan Kepala BAPETEN No. 4 Tahun 2013 tentang Proteksi dan Keselamatan Radiasi

dalam Pemanfaatan Tenaga Nuklir” dan “Peraturan Kepala BAPETEN No. 7 Tahun 2013 tentang Nilai Batas Radioaktivitas Lingkungan”.

Kajian dibatasi untuk radionuklida yang lepas ke udara melalui cerobong (*stack*) reaktor TRIGA 2000 Bandung.

2. TEORI

2.1. Reaktor TRIGA 2000 Bandung

Reaktor TRIGA 2000 Bandung bertipe tangki. Bahan bakar reaktor berbentuk padat, merupakan campuran homogen dari paduan Uranium dan Zirkonium-Hidrida (U-ZrH). Tingkat daya dari reaktor dikendalikan oleh 5 (lima) batang kendali. Semua batang kendali ini berisi bahan penyerap Boron-Karbida (B4C) yang bagian bawahnya diikuti oleh batang bahan bakar. Untuk mengetahui temperatur elemen bakar digunakan elemen bakar yang terinstrumentasi (*Instrumented Fuel Element* / IFE). IFE ini mempunyai 3 (tiga) buah termokopel yang terbenam dalam bahan bakar. Reaktor didinginkan dengan cara alamiah (*konveksi* alamiah).

Reaktor nuklir adalah alat atau instalasi yang dijalankan dengan bahan bakar nuklir yang dapat menghasilkan reaksi inti berantai yang terkendali dan digunakan untuk pembangkitan daya, atau penelitian, dan/atau produksi isotop [5].

Atau, reaktor nuklir adalah tempat terjadinya reaksi pembelahan inti (nuklir) atau dikenal dengan reaksi fisi berantai yang terkendali.

Reaksi fisi berantai terjadi jika inti dari suatu unsur dapat membelah (misal U-235) bereaksi dengan neutron termal, menghasilkan unsur lain dengan cepat serta menimbulkan energi kalor dan neutron baru.

Pada pengoperasian reaktor nuklir dihasilkan unsur atau radionuklida hasil belah akibat proses fisi dan unsur lain yang tidak diharapkan. Unsur atau radionuklida lain yang tidak diharapkan tersebut dapat terjadi akibat reaksi neutron dengan bahan struktur reaktor, bahan kelongsong bahan bakar, dan pengotor dalam pendingin reaktor. Beberapa radionuklida yang tidak diharapkan tersebut dapat terlepas dari dalam air pendingin reaktor ke udara dalam gedung reaktor. Radionuklida yang bisa lepas ke udara diantaranya gas mulia hasil belah (Krypton, Xenon), Argon, Carbon-14, Tritium, dan Yodium.

2.2. Dispersi Radionuklida ke Lingkungan

Reaktor TRIGA 2000 Bandung berada di dalam gedung reaktor (*Hall Reactor*). Udara dalam gedung reaktor bertekanan “negatif” artinya udara

bergerak dari tekanan yang tinggi ke tekanan rendah.

Udara di dalam gedung reaktor yang keluar ke lingkungan melalui cerobong (*stack*) reaktor, harus melalui sistem ventilasi dan terlebih dahulu mengalami proses penyaringan udara. Bila di dalam gedung reaktor terdapat radionuklida dalam bentuk gas atau aerosol tercampur di udara, dan terlepas dari proses penyaringan maka setelah radionuklida atau aerosol meninggalkan cerobong maka akan bercampur dengan udara di atmosfer. Selanjutnya radionuklida yang terlepas ke atmosfer akan terdispersi di atmosfer, sesuai dengan arah dan kecepatan angin hingga mencapai permukaan tanah, tanaman, hewan, perairan dan akhirnya sampai ke manusia.

Radionuklida di udara dapat sampai ke manusia melalui beberapa jalur (*pathway*), yaitu jalur :

1. Pernafasan (*inhalasi*)
2. Pencernaan (*ingestion*), lewat konsumsi makanan atau minuman yang terkontaminasi radionuklida
3. Kulit, atau Luka yang terbuka
4. Imersi

3. TATAKERJA (BAHAN DAN METODE)

Dalam perhitungan estimasi NBL diperlukan tahap-tahap perhitungan sebagai berikut : [3]

- a. Menetapkan nilai pembatas dosis spesifik tapak
- b. Menetapkan suku sumber dan asumsi jalur lepasan dari instalasi ke masyarakat; dan
- c. Menghitung nilai batas lepasan

Untuk lepasan lebih dari 1 (satu) radionuklida, maka nilai pembatas dosis spesifik tapak ditentukan berdasarkan penjumlahan rasio lepasan tahunan radionuklida terhadap nilai batas lepasan radioaktivitas ke lingkungan, yang dapat dituliskan dalam rumus berikut :

$$\sum_{i=1}^n \frac{A_i}{NBLR_i} \leq 1 \quad (1)$$

Dengan :

A_i : lepasan radionuklida i ke lingkungan (Bq/tahun)

$NBLR_i$: nilai batas lepasan radionuklida i

i : banyaknya radionuklida ($i = 1, \dots, n$)

Jalur paparan radionuklida sampai ke anggota masyarakat di sini dipilih melalui jalur imersi, inhalasi dan terpapar dari tanah yang terkontaminasi. Dengan menggunakan metode dalam SRS Nomor 19 dan mengambil asumsi

model “no dilution” artinya tidak ada pengenceran radionuklida di atmosfer serta tidak ada pengaruh efek bangunan, maka konsentrasi radionuklida di udara dan permukaan tanah (C_A dan C_{gr}) serta dosis yang diterima anggota masyarakat dapat dihitung menggunakan persamaan berikut :

$$C_A = \frac{P_p F Q_i}{u_a} \quad (2)$$

$$d = C_A (V_d + V_w) = C_A V_T \quad (3)$$

$$C_{gr} = \frac{d [1 - \exp(-\lambda_{E^s} t_B)]}{\lambda_{E^s}} \quad (4)$$

$$\lambda_{E^s} = \lambda_i + \lambda_s \quad (5)$$

$$E_{im} = C_A DF_{im} O_f \quad (6)$$

$$E_{inh} = C_A R_{inh} DF_{inh} \quad (7)$$

$$E_{gr} = C_A DF_{gr} O_f \quad (8)$$

Dengan :

- C_A : konsentrasi radionuklida di udara di sektor p (Bq/m^3)
- P_p : fraksi angin bertiup ke arah reseptor di sektor p
- u_a : kecepatan angin rata-rata selama satu tahun (m/detik)
- F : faktor difusi *Gaussian* yang sesuai untuk ketinggian rilis H dan jarak x (m^{-2})
- Q_i : laju debit (lepasan) rata-rata tahunan untuk radionuklida i ($Bq/detik$).
- d_i : total laju deposisi rata-rata harian pada permukaan tanah untuk radionuklida i dari proses *dry* dan *wet*, termasuk deposisi ke tanaman atau tanah ($Bq \cdot m^{-2} \cdot hari^{-1}$)
- V_d : koefisien “*dry deposition*” untuk radionuklida (m/hari)
- V_w : koefisien “*wet deposition*” untuk radionuklida (m/hari)
- V_T : total koefisien deposisi ($= V_d + V_w$), \rightarrow *default* sama dengan 1000 m/hari untuk deposisi aerosol dan gas reaktif. Nilai V_T konsisten untuk I-131 dan Cs-137
- λ_i : konstanta peluruhan radionuklida ($hari^{-1}$)
- λ_s : konstanta reduksi konsentrasi material radionuklida yang mengendap ($hari^{-1}$)
- t_b : durasi lepasan radionuklida (hari)
- $t_b = 1,1 \times 10^4$ hari, untuk periode paparan selama 30 tahun (diasumsikan fasilitas beroperasi “*lifetime*”)
- C_{gr} : konsentrasi radionuklida di permukaan tanah pada jarak x dan sektor p, berlawanan dengan arah angin (Bq/m^3)
- DF_{im} : koefisien dosis efektif untuk imersi (Sv/tahun per Bq/m)
- O_f : fraksi anggota masyarakat kritis yang terpapar
- Df_{inh} : koefisien dosis untuk inhalasi (Sv/Bq)

DF_{gr} : koefisien dosis untuk paparan permukaan tanah (Sv/tahun per Bq/m²)

R_{inh} : laju pernafasan (m³/tahun)

E_{im} : dosis dari imersi (Sv/tahun)

E_{inh} : dosis dari inhalasi (Sv/tahun)

E_{gr} : dosis dari pengaruh permukaan tanah terkontaminasi (Sv/tahun)

Persamaan dan nilai parameter-parameter pada persamaan di atas yang berbentuk *default* dan yang diperlukan dalam perhitungan estimasi NBL diberikan dalam SRS No. 19 [4]. Parameter-parameter lain yang diperlukan dalam perhitungan estimasi NBL adalah

1. Volume gedung reaktor 6750 m³
2. Laju alir cerobong 2,03 m/detik
3. Tinggi cerobong 22,5 m
4. Efisiensi filter diasumsikan 60 %
5. Kecepatan angin diambil 2 m/detik

Diasumsikan anggota masyarakat yang dihitung dosisnya berada pada jarak 1 km dari reaktor TRIGA 2000 Bandung dan berada sepanjang tahun di luar rumah.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Radionuklida lepas dari suatu kawasan nuklir dapat melalui udara, tanah maupun badan air (seperti : air sungai, air laut, atau air tanah).

Untuk kawasan nuklir Bandung, hanya dibahas estimasi NBL radionuklida yang lepas melalui udara yaitu radionuklida yang keluar ke lingkungan melalui cerobong reaktor TRIGA 2000 Bandung dan selanjutnya terdispersi ke lingkungan. Kajian estimasi untuk lepasan radionuklida melalui badan air tidak dilakukan karena kawasan nuklir Bandung tidak melepas limbah radioaktif (*effluen*) cair ke badan air di lingkungan.

4.1 Nilai pembatas dosis

Pembatas dosis untuk pekerja radiasi ditetapkan berdasarkan hasil evaluasi penerimaan dosis pekerja radiasi tiap tahunnya. Di kawasan nuklir Bandung atau PSTNT, ditetapkan pembatas dosis untuk pekerja radiasi sebesar 15 mSv/tahun karena dosis paling tinggi yang diterima pekerja radiasi di PSTNT mendekati nilai 13 mSv/tahun, dimana nilai tersebut diterima pekerja radiasi pada waktu bekerja melakukan kegiatan peningkatan daya reaktor TRIGA 2000 Bandung dari 1 MW ke 2 MW.

Nilai batas dosis (NBD) untuk anggota masyarakat ditetapkan oleh BAPETEN yaitu sebesar 0,3 mSv/tahun [2].

Pembatas dosis untuk anggota masyarakat ditetapkan oleh Pemegang Izin dan tidak boleh melebihi NBD. Dalam kajian ini, pembatas dosis untuk anggota masyarakat di sekitar kawasan nuklir Bandung ditetapkan sebesar 0,1 mSv/tahun, untuk semua jenis radionuklida yang diterima anggota masyarakat.

4.2 Penetapan suku sumber dan asumsi jalur lepasan dari cerobong (*stack*) reaktor TRIGA 2000 Bandung ke masyarakat

Reaktor TRIGA 2000 Bandung telah dioperasikan dengan daya maksimum hingga 2 MW. Selama reaktor beroperasi, telah terbentuk radionuklida produk fisi diantaranya produk fisi yang tersimpan di dalam kelongsong bahan bakar. Beberapa produk fisi tersebut memiliki sifat gas, mudah menguap (*volatile*) dan sifat padat.

Sebagian radionuklida produk fisi yang bersifat gas dan mudah menguap akan terlepas ke air pendingin dan pada akhirnya akan mencapai gedung reaktor. Tabel 1 menunjukkan fraksi radionuklida produk fisi yang mencapai gedung reaktor.

Tabel 1. Fraksi radionuklida hasil fisi yang terlepas dari kelongsong bahan bakar reaktor hingga ke gedung reaktor TRIGA 2000 Bandung

Radionuklida	Fraksi yang terlepas (%)	
	Dari kelongsong bahan bakar ke kolam air pendingin	Dari kolam air pendingin ke gedung reaktor
Krypton dan Xenon	100	100
Yodium	30	0,01
Cesium	30	0,0001
Rubidium	30	0,0001
Tellurium dan Ruthenium	1	0,0001
Lainnya	Diabaikan	—

Sumber : Ansto, Safety and Reliability Calculation Sheet, Reference Accident/005

Beberapa radionuklida telah dihitung sebagai suku sumber (*source term*) untuk reaktor TRIGA 2000 Bandung, seperti tercantum dalam Tabel 2. [6] dan menjadi referensi untuk perhitungan estimasi nilai batas lepas (NBL) dari reaktor TRIGA 2000 Bandung.

Radionuklida sebagai suku sumber (*source term*) untuk reaktor TRIGA 2000 Bandung dihasilkan dari perhitungan menggunakan software *Origen*, dengan asumsi produk fisi dari 250 gram U dalam UZrHx, Burn Up rerata 20 %, maksimum

40 % ter-irradiasi selama 508 hari, dengan daya 2 MW termal.

Tabel 2. Radionuklida sebagai suku sumber (*source term*) untuk reaktor TRIGA 2000 Bandung

Hasil fisi	Aktivitas dalam kelongsong (Bq)	Terlepas ke air kolam pendingin (Bq)	Terlepas ke gedung reaktor (Bq)
Kr-83m	6,43 E+01	6,43 E+01	6,43 E+01
Kr-85m	1,54 E+02	1,54 E+02	1,54 E+02
Kr-87	3,12 E+02	3,12 E+02	3,12 E+02
Kr-88	4,38 E+02	4,38 E+02	4,38 E+02
Xe-133	8,21 E+02	8,21 E+02	8,21 E+02
Xe-133m	2,39 E+01	2,39 E+01	2,39 E+01
Xe-135	4,14 E+02	4,14 E+02	4,14 E+02
Xe-135m	1,37 E+02	1,37 E+02	1,37 E+02
Xe-138	7,25 E+02	7,25 E+02	7,25 E+02
I-131	3,43 E+02	1,03 E+02	1,03 E-02
I-132	5,15 E+02	1,55 E+02	1,55 E-02
I-133	8,21 E+02	2,46 E+02	2,46 E-02
I-134	9,24 E+02	2,77 E+02	2,77 E-02
I-135	7,67 E+02	2,30 E+02	2,30 E-02
Rb-88	1,64 E+13	4,93 E+12	4,93 E+06
Rb-89	2,15 E+13	6,44 E+12	6,44 E+06
Te-127	5,92 E+11	5,92 E+09	5,92 E+03
Te-129	2,83 E+12	2,83 E+10	2,83 E+04
Te-129m	4,26 E+11	4,26 E+09	4,26 E+03
Te-131	1,14 E+13	1,14 E+11	1,14 E+05
Te-131m	1,63 E+12	1,63 E+10	1,63 E+04
Te-132	1,90 E+13	1,90 E+11	1,90 E+05
Te-133	1,68 E+13	1,68 E+11	1,68 E+05
Te-133m	1,35 E+13	1,35 E+11	1,35 E+05
Te-134	2,99 E+13	2,99 E+11	2,99 E+05
Cs-137	9,69 E+11	2,91 E+11	2,91 E+05
Cs-138	3,03 E+13	9,10 E+12	9,10 E+06
Ru-105	1,26 E+02	1,26 E+00	1,26 E-06
Ru-106	3,28 E+01	3,28 E-01	3,28 E-07

Dari Tabel 2 terlihat ada beberapa radionuklida (*source term*) yang bisa lepas dari kelongsong bahan bakar hingga ke gedung reaktor. Selanjutnya dari gedung reaktor diasumsikan ada radionuklida yang terlepas dari cerobong reaktor TRIGA 2000 Bandung ke lingkungan. Di sini dipilih hanya 2 suku sumber utama yang akan dihitung estimasi NBL nya, yaitu radionuklida I-131 dan Cs-137.

Estimasi NBL dilakukan untuk radionuklida I-131 dan Cs-137 karena radionuklida I-131 merupakan indikator untuk *thyroid seeker* dan Cs-

137 merupakan radionuklida yang waktu paronya sangat panjang yaitu 30,17 tahun sehingga keberadaannya di lingkungan harus diperhitungkan terhadap kontribusi dosis di masyarakat sekitar PSTNT.

Radionuklida lain dalam suku sumber belum dikaji di sini karena waktu paronya yang pendek namun dalam penetapan NBL spesifik tapak kawasan nuklir Bandung, radionuklida–radionuklida tersebut secara keseluruhan tetap diperhitungkan dan prinsip perhitungan NBL dilakukan dengan cara yang sama dengan 2 radionuklida yang dipilih.

Radionuklida setelah lepas dari cerobong reaktor TRIGA 2000 Bandung, selama berada di atmosfer hingga sampai ke anggota masyarakat diasumsikan tidak mengalami proses pengenceran atau “no dilution”, dan tidak ada pengaruh dari bangunan atau pohon. Kecepatan angin diambil sebesar 2 meter/detik dengan arah sesuai dengan arah reseptor (*default*).

Jalur paparan radionuklida dari cerobong reaktor TRIGA 2000 Bandung sampai ke anggota masyarakat dipilih melalui jalur imersi, inhalasi dan terpapar dari tanah yang terkontaminasi (*ground*), sedang jalur makanan (*ingestion*) tidak dipilih karena di sekitar kawasan nuklir Bandung tidak terdapat daerah pertanian, peternakan atau perikanan yang menjadi jalur sampainya radionuklida ke anggota masyarakat. Masyarakat kota Bandung umumnya mengkonsumsi makanan yang bahan makanannya berasal dari luar kota Bandung, sehingga potensi bahaya paparan radionuklida melalui jalur makanan (*ingestion*) dianggap tidak ada.

4.3 Perhitungan nilai batas lepasan (NBL) radioaktivitas dari cerobong (*stack*) reaktor TRIGA 2000 Bandung

Setiap radionuklida yang lepas dari cerobong reaktor dan sampai ke anggota masyarakat akan memberikan kontribusi pada dosis individu dalam masyarakat tersebut.

Untuk masing–masing jalur radionuklida dihitung dosis yang diterima oleh anggota masyarakat (orang) pada jarak 1 km dari cerobong reaktor TRIGA 2000 Bandung.

Berdasarkan pada fraksi lepasnya radionuklida produk fisi ke air pendingin dan gedung reaktor (Tabel 1) dan suku sumber reaktor TRIGA 2000 Bandung (Tabel 2) dan dengan metode perhitungan sebagaimana disebutkan di atas serta menggunakan parameter–parameter yang telah dijelaskan sebelumnya maka diperoleh hasil perhitungan laju lepasan (awal) untuk 2

radionuklida keluar dari cerobong reaktor TRIGA 2000 Bandung, masing–masing sebagai berikut :

$$I - 131 = 1,24 \times 10^{-6} \text{ Bq/detik}$$

$$Cs - 137 = 3,5 \times 10^{-1} \text{ Bq/detik}$$

Dari laju lepasan awal 2 radionuklida di atas, diperoleh dosis yang diterima anggota masyarakat melalui 3 jalur yang telah ditentukan seperti terlihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil perhitungan terimaan dosis anggota masyarakat pada jarak 1 km dari cerobong reaktor TRIGA 2000 Bandung

Jalur / Pathway	Dosis yang diterima anggota masyarakat pada jarak 1 km cerobong reaktor TRIGA 2000 Bandung (Sv/tahun)	
	Anak	Dewasa
Radionuklida I – 131		
Imersi	$2,69 \times 10^{-18}$	$2,69 \times 10^{-18}$
Inhalasi	$4,68 \times 10^{-16}$	$2,89 \times 10^{-16}$
Permukaan tanah / <i>ground</i>	$6,36 \times 10^{-16}$	$6,36 \times 10^{-16}$
Total	$1,108 \times 10^{-15}$	$9,28 \times 10^{-16}$
Radionuklida Cs – 137		
Imersi	$1,14 \times 10^{-10}$	$1,14 \times 10^{-10}$
Inhalasi	$9,92 \times 10^{-10}$	$5,07 \times 10^{-9}$
Permukaan tanah / <i>ground</i>	$1,04 \times 10^{-5}$	$1,04 \times 10^{-5}$
Total	$1,038 \times 10^{-5}$	$1,039 \times 10^{-5}$
Total dosis dari 2 radionuklida	$1,038 \times 10^{-5}$	$1,039 \times 10^{-5}$

Berdasarkan dosis individu (total dosis dari 2 radionuklida) pada Tabel 3, data lepasan awal dan pembatas dosis yang telah ditetapkan untuk masyarakat, maka dengan cara menghitung “mundur” dapat dihitung estimasi NBL radionuklida I–131 dan Cs–137 dari cerobong reaktor TRIGA 2000 Bandung ke lingkungan, masing–masing sebesar $1,19 \times 10^{-5}$ Bq/detik dan $3,36 \times 10^2$ Bq/detik.

Untuk nilai hasil estimasi NBL radionuklida I–131 dan Cs–137 yang baru tersebut, masing–masing memberikan dosis pada anggota masyarakat yang berada pada jarak 1 km dari cerobong reaktor TRIGA 2000 Bandung sebesar

$9,967 \cdot 10^{-2}$ mSv/tahun (anak) dan $9,971 \cdot 10^{-2}$ mSv/tahun (dewasa), dimana dosis ini lebih kecil dari nilai pembatas dosis yang telah ditetapkan untuk anggota masyarakat yaitu 0,1 mSv/tahun.

Karena pembatas dosis untuk anggota masyarakat di sekitar kawasan nuklir Bandung, pada jarak 1 km dari cerobong reaktor TRIGA 2000 Bandung ditetapkan sebesar 0,1 mSv/tahun berlaku untuk semua jenis radionuklida yang diterima anggota masyarakat dan bila semua radionuklida dalam *source term* (Tabel 2) dihitung NBL nya, maka masing-masing nilai hasil estimasi NBL radionuklida I-131 dan Cs-137 akan lebih kecil dari $1,19 \cdot 10^{-5}$ Bq/detik dan $3,36 \cdot 10^2$ Bq/detik.

5. KESIMPULAN

Kajian estimasi nilai batas lepas (NBL) radionuklida dari cerobong reaktor TRIGA 2000 Bandung telah dilakukan. NBL dihitung berdasarkan metode dalam *Safety Reports Series Nomor 19* (SRS No. 19), dengan mengambil asumsi model “*no dilution*” dan tidak ada pengaruh efek bangunan serta kecepatan angin 2 m/detik dengan arah sesuai dengan arah reseptor (*default*). Suku sumber yang keluar dari cerobong reaktor TRIGA 2000 Bandung ditetapkan yaitu I-131 dan Cs-137. Jalur paparan radionuklida dari cerobong reaktor TRIGA 2000 Bandung sampai ke anggota masyarakat di sekitar kawasan nuklir Bandung dipilih melalui jalur imersi, inhalasi dan terpapar dari tanah yang terkontaminasi. Pembatas dosis untuk anggota masyarakat (dewasa) yang tinggal pada jarak 1 km dari dari cerobong reaktor

TRIGA 2000 Bandung ditetapkan sebesar 0,1 mSv/tahun maka diperoleh NBL I-131 dan Cs-137 dari cerobong reaktor TRIGA 2000 Bandung untuk I-131 sebesar $1,19 \cdot 10^{-5}$ Bq/detik dan untuk Cs-137 sebesar 336 Bq/detik.

6. DAFTAR PUSTAKA

1. BADAN TENAGA NUKLIR NASIONAL, Peraturan Kepala BATAN No. 14 Tahun 2013 tentang Organisasi Dan Tata Kerja Badan Tenaga Nuklir Nasional, Jakarta (2013).
2. BAPETEN, “Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 4 Tahun 2013 Tentang Proteksi dan Keselamatan Radiasi dalam Pemanfaatan Tenaga Nuklir”, BAPETEN, Jakarta (2013).
3. BAPETEN, “Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 7 Tahun 2013 Tentang Nilai Batas Radioaktivitas Lingkungan”, BAPETEN, Jakarta (2013).
4. IAEA, “Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharge of Radioactive Substances to the Environment” (Safety Reports Series No. 19), IAEA, Vienna (2001).
5. BAPETEN, “Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 43 Tahun 2006 tentang Perizinan Reaktor Nuklir”, BAPETEN, Jakarta (2006).
6. PTNBR-BATAN, Laporan Analisis Keselamatan Akhir Reaktor TRIGA 2000 Bandung, Bandung (2006).