

ISSN 0216-3128

# **PROSIDING**

## **PERTEMUAN DAN PRESENTASI ILMIAH PENELITIAN DASAR ILMU PENGETAHUAN DAN TEKNOLOGI NUKLIR**

Yogyakarta, 9 - 10 Juni 2015



### **BUKU II**

#### **KIMIA, TEKNOLOGI PROSES PENGOLAHAN LIMBAH DAN LINGKUNGAN**

Diterbitkan oleh

**Pusat Sains dan Teknologi Akselerator  
BADAN TENAGA NUKLIR NASIONAL**  
Jl. Babarsari Kotak Pos 6101 ykbb, Telp. (0274) 488435, 484436  
Faks. (0274) 487824, e-mail:ptapb@batan.go.id  
Website : [www.batan.go.id/ptapb](http://www.batan.go.id/ptapb)  
YOGYAKARTA-INDONESIA

## Editor/Penilai

FMIPA-UGM

Prof. Dr. Kusminarto

BBKKP-DEPERINDAG

Ir. Dwi Wahini Nurhayati, M.Eng

PSTA-BATAN

Ir. Prayitno, MT

Prof. Ir. Syarip

Prof. Drs. Samin

Prof. Darsono, M.Sc.

Prof. Dr. Ir. Agus Taftazani

Prof. Drs. Sudjatmoko, SU.

Prof. Dr. Tri Mardji Atmono

Prof. Ir. Dwi Biyantoro, MS.

Ir. Gede Sutresna W., M.Eng.

Drs. BA. Tjipto Sujitno, MT

Ir. Slamet Santosa, M.Sc.

Ir. Herry Poernomo, MT

Bambang Siswanto, S.Si.

Ir. Eko Edy Karmanto

Endro Kismolo, ST.

Budi Setiawan, ST.

Prajitno, S.Kom.

Jumari, S.ST.

## Prosiding

Badi Wiyana, Dwi Purnomo, Kurnia Wibowo

## KATA PENGANTAR

**P**uji syukur kami panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa, atas petunjuk dan karunia-Nya maka telah dapat diterbitkan Prosiding Pertemuan Ilmiah Penelitian Dasar Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir dengan mengambil tema "*LITBANG SAINS DAN TEKNOLOGI NUKLIR MENUJU KEUNGGULAN DI BIDANG INDUSTRI, KESEHATAN DAN LINGKUNGAN*".

Penerbitan buku prosiding ini dibagi dalam dua buku yaitu buku I untuk kelompok Fisika dan Reaktor, dan Buku II untuk kelompok Kimia, Teknologi Proses, Pengolahan Limbah dan Lingkungan. Prosiding ini merupakan dokumentasi karya ilmiah para peneliti dari berbagai disiplin ilmu yang berkaitan dengan sains dan teknologi nuklir dalam mendukung era industrialisasi, dan telah dipresentasikan pada tanggal 9 – 10 Juni 2015 di Pusat Sains dan Teknologi Akselerator, Jl. Babarsari Yogyakarta.

Pertemuan dan presentasi ilmiah ini diselenggarakan yang ke XXIX, dan merupakan kegiatan rutin tahunan di PSTA-BATAN dengan tujuan untuk mengetahui perkembangan aktivitas penelitian yang telah dicapai oleh para peneliti di lingkungan BATAN. Pembukaan Pertemuan dan Presentasi Ilmiah dilakukan oleh Bapak Kepala BATAN dan dilanjutkan Ceramah Umum I oleh Bumsoo Han, Ph.D. (CEO and President of EB-Tech., Korea) dengan judul ELECTRON BEAM AND HUMAN LIFE, Ceramah Umum II Oleh Prof. Ir. Gatot Ibnu Santosa, (Politeknik STMI Kemenperin) dengan judul PROSPEK INDUSTRI PENGOLAHAN PASIR ZIRCON LOKAL MENJADI PRODUK ZIRKONIUM DAN OKSIDA LOGAM TANAH JARANG (LTJ).

Di dalam prosiding ini berisi karya tulis ilmiah yang telah dipresentasikan dalam Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir 2015 sebanyak 2 makalah pembicara utama dari KOREA (1) dan KEMENPERIN (1) serta 24 topik makalah yang disampaikan dalam sidang paralel. Karya tulis ilmiah tersebut berasal dari berbagai institusi selain dari BATAN (20) yaitu dari STTN (1), Universitas Padjadjaran (1) dan UIN Sarif Hidayatullah (1). Pembagian kelompok makalah adalah 17 termasuk kelompok makalah Fisika dan Reaktor, 23 makalah termasuk kelompok Kimia, Proses, Pengolahan Limbah dan Lingkungan. Prosiding ini telah melalui proses penilaian dan editing oleh dewan editor/penilai karya tulis ilmiah serta dilengkapi dengan diskusi dan tanya jawab pada saat seminar berlangsung.

Semoga penerbitan prosiding ini dapat bermanfaat sebagai bahan acuan untuk lebih memacu dan mengembangkan penelitian yang akan datang. Kepada semua pihak yang telah ikut membantu penerbitan prosiding ini kami ucapkan terima kasih.

Yogyakarta, 10 September 2015

Editor

**SAMBUTAN**  
**KEPALA PUSAT SAINS DAN TEKNOLOGI**  
**AKSELERATOR - BATAN**

Dengan mengucapkan syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa, kami sampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Tim Editor dan semua pihak yang terlibat dalam penyelesaian dan penerbitan prosiding ini. Prosiding ini merupakan dokumentasi karya ilmiah para peneliti yang telah dipresentasikan pada tanggal 9 - 10 Juni 2015 dengan tema "*LITBANG SAINS DAN TEKNOLOGI NUKLIR MENUJU KEUNGGULAN DI BIDANG INDUSTRI, KESEHATAN DAN LINGKUNGAN*". Prosiding ini melibatkan berbagai disiplin ilmu, yang berkaitan dengan penelitian dasar ilmu pengetahuan dan teknologi nuklir. Di dalam prosiding ini dapat diketahui beberapa permasalahan yang mencakup kemajuan dan perkembangan litbang ilmu pengetahuan dan teknologi nuklir, yang telah diupayakan oleh para peneliti di dalam lingkungan BATAN sendiri yaitu di Pusat Sains dan Teknologi Akselerator, maupun dari luar BATAN.

Laporan hasil penelitian dalam prosiding ini diharapkan dapat menjadi salah satu basis terwujudnya sinergi antara sesama peneliti maupun dengan kalangan industri. Sinergi tersebut merupakan syarat untuk mewujudkan produk dengan kandungan lokal maksimal serta produk yang mempunyai daya saing berbasis penelitian/penemuan dalam negeri.

Akhirnya kami berharap, semoga prosiding ini menjadi acuan yang bermanfaat bagi berbagai pihak yang berkepentingan dan yang memerlukan, dengan demikian dapat lebih mendalami dan mengembangkannya, demi berhasilnya pembangunan nasional di bidang iptek nuklir untuk kesejahteraan bangsa dan negara.

Yogyakarta, 10 September 2015

  
DR. SUSILO WIDODO

---



---

## DAFTAR ISI

<b>EDITOR</b>	i
<b>PENGANTAR EDITOR</b>	ii
<b>SAMBUTAN KEPALA PSTA-BATAN</b>	iii
<b>DAFTAR ISI</b>	iv - vi
<b>CERAMAH UMUM</b>	
ELECTRON BEAM AND HUMAN LIFE	vii - xlii
<b>BUMSOO HAN</b>	
<i>EB TECH Co., Yongsan-dong 550 Yuseong-gu, Daejeon 305-500, Korea</i>	
PROSPEK INDUSTRI PENGOLAHAN PASIR ZIRCON LOKAL MENJADI PRODUK ZIRKONIUM DAN OKSIDA LOGAM TANAH JARANG (LTJ)	xliii - lxxvii
<b>Dr. Ir. Gatot Ibnusantosa, DEA</b>	
<i>Politeknik STMI Kemenperin</i>	
PEMBUATAN DAN SERTIFIKASI CRM-INHOUSE ZIRKONIL KLOORIDA HASIL PROSES MINERAL ZIRKON	1 - 8
<b>Samin, Sajimo, Supriyanto, Isman Mulyadi T.</b>	
<i>Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan – BATAN</i>	
OPTIMASI DAN KINETIKA DEKOMPOSISI MONASIT MEMAKAI NaOH	9 - 17
<b>MV Purwani, Suyanti dan Dedy Husnurrofiq</b>	
<i>PSTA – BATAN</i>	
ANALISIS PERANCANGAN DAN UJI KINERJA TUNGKU REDUKSI KERNEL U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	18 - 26
<b>Moch. Setyadi, Triyono, Dedy Husnurrofiq</b>	
<i>PSTA – BATAN</i>	
SINTESIS DAN KARAKTERISASI PRASEODYMIUM-142 HIDROKSIAPATIT ( <sup>142</sup> Pr-HA)	27 - 32
<b>Duyeh Setiawan, Daud Nurhasan</b>	
<i>Pusat Sains Dan Teknologi Nuklir Terapan - Badan Tenaga Nuklir Nasional</i>	
IMOBILISASI LIMBAH RADIOAKTIF DARI PRODUKSI RADIOISOTOP MOLIBDENUM-99 ( <sup>99</sup> Mo) MENGGUNAKAN BAHAN MATRIKS SYNROC	33 - 45
<b>Gunandjar, Titik Sundari, dan Yuli Purwanto</b>	
<i>Pusat Teknologi Limbah Radioaktif –Badan Tenaga Nuklir Nasional</i>	
APLIKASI TEKNIK ISOTOP ALAM <sup>18</sup> O DAN <sup>2</sup> H UNTUK STUDI AIR TANAH PADA CEKUNGAN AIRTANAH SEMARANG, JAWA TENGAH	46 - 51
<b>Rasi Prasetio, Satrio</b>	
<i>Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi – BATAN</i>	

---

FENOMENA BIOSORPSI KROMIUM, TEMBAGA, BESI, DAN ZINK PADA <i>EXTRACELLULAR POLYMERIC SUBSTANCE</i> TERDISPERSI DALAM LARUTAN	52 - 58
<b>Zainus Salimin, Endang Nuraeni, dan Mirawaty</b> <i>Pusat Teknologi Limbah Radioaktif – BATAN</i>	
PENGARUH IRRADIASI SINAR GAMMA TERHADAP PERTUMBUHAN AWAL TANAMAN KEDELAI <i>Glycine max</i> (L.) Merrill) VARIETAS DENNA 1	59 - 63
<b>Lilik Harsanti dan Yulidar</b> <i>Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi – Badan Tenaga Nuklir Nasional</i>	
PERKIRAAN DOSIS IMERSI TERHADAP PENAMBANG TIMAH DI LAUT PESISIR PULAU BANGKA DARI PENGOPERASIAN PLTN	64 - 72
<b>Nurokhim, Erwansyah Lubis</b> <i>Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi – BATAN</i>	
KARAKTERISASI RADIONUKLIDA UDARA LINGKUNGAN SEKITAR FASILITAS NUKLIR	73 - 78
<b>Gede Sutresna Wijaya Anung Muharini</b> <i>PSTA-BATAN</i>	
STUDI AIR TANAH AKUIFER DALAM DI CEKUNGAN SEMARANG-DEMAK MENGUNAKAN ISOTOP ALAM <sup>14</sup> C	79- 82
<b>Satrio, dan Agus Taufiq Nz.</b> <i>Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi– BATAN</i>	
FITOREMEDIASI LAHAN TERCEMAR LOGAM Pb DAN Cd DENGAN MENGUNAKAN JERAMI HASIL FERMENTASI <i>Trichoderma viride</i> YANG DIPAPAR RADIASI SINAR GAMMA DOSIS 250 GRAY	83 - 87
<b>Yullita S.L Andini, Tri Retno Diah Larasati, Hendrawati dan Nana Mulyana</b> <i>UIN Syarif Hidayatullah Jakarta</i>	
PERBAIKAN PEMULIAAN MUTASI PADA TANAMAN KAPAS ( <i>Gossypium hirsutum</i> .L) MUSIM KEMARAU DI NTB	88 - 93
<b>Lilik Harsanti</b> <i>Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi, Badan Tenaga Nuklir Nasional</i>	
EKSPRESI PROTEIN P13K DAN P53 DALAM PREDIKSI RESPON TERHADAP TINDAKAN RADIOTERAPI PADA KANKER SERVIK	94 - 100
<b>Teja Kisnanto, Sudiono S, Budiningsih Siregar, Mellova Amir, Setiawan Soetopo, Irwan Ramli, Tjahya Kurjana, Andrijono, Bethy S Hernowo, Maringan DL Tobing, Devita Tetrian, dan Iin Kurnia</b> <i>Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi – BATAN</i>	
ISOLASI DAN APLIKASI MIKROBA INDIGEN PENDEGRADASI HIDROKARBON DARI TANAH TERCEMAR MINYAK BUMI	101 - 109
<b>Dadang Sudrajat, Nana Mulyana, dan Tri Retno DL.</b> <i>Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi, Badan Tenaga Nuklir Nasional</i>	

PENANDAAN METAIODOBENZYLGUANIDIN (MIBG) DENGAN RADIONUKLIDA TEKNESIUM-99m	110 - 115
<b>Maula Eka Sriyani, Dini Natanegara, Aang Hanafiah Ws.</b>	
<i>PSTNT, BATAN</i>	
OPTIMASI KOMPLEKS SKANDIUM-3,3 BENZILIDENA BIS [4-HIDROKSIKUMARIN] DENGAN RADIOPERUNUT <sup>46</sup> SC	116 - 122
<b>Khanza Aktari Dewi, Muhamad Basit Febrin, Duyeh Setiawan</b>	
<i>Departemen Kimia, Universitas Padjajaran</i>	
UJI KOMPOSISI UNSUR-UNSUR DALAM ZIRKONIA DARI HASIL OLAH MINERAL ZIRKON	123 - 129
<b>Sukirno, Sri Murniasih, Samin</b>	
<i>Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan – BATAN</i>	
REVIEW KARAKTERISTIK HASIL ANTARA DAN HASIL PROSES PEMBUATAN PARTIKEL TERLAPIS	130 - 140
<b>Sukarsono dan Kristanti Nurwidyaningrum</b>	
<i>Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir Batan</i>	
ANALISIS KUALITAS PEMISAHAN SKANDIUM-46 DAN TITANIUM MENGGU- NAKAN KOLOM SILIKA GEL	141 - 147
<b>Muhamad Basit Febrin, Yanuar Setiadi, Duyeh Setiawan, Titin Sri Mulyati, Nana Suherman</b>	
<i>Pusat Sains dan Teknologi Nuklir Terapan – BATAN</i>	
RESPON <i>TUMOUR NECROSIS FACTOR</i> ALFA (TNF- $\alpha$ ) DALAM DARAH DAN LIMPA MENCIT YANG DIVAKSINASI DENGAN <i>P.berghei</i> RADIASI	148 - 153
<b>Darlina, Tur R., dan Teja K.</b>	
<i>Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi, BATAN</i>	
PENGARUH PERLAKUAN FILLER PIROFILIT TERHADAP DAYA SERAP AIR SAPC DAN PENGUJIAN APLIKASINYA	154 - 160
<b>Jadigia Ginting</b>	
<i>PSTBM BATAN</i>	
PENENTUAN KOEFISIEN DISTRIBUSI RENIUM DAN WOLFRAM DENGAN METODE EKSTRAKSI MENGGUNAKAN PELARUT METIL ETIL KETON	161 - 166
<b>Riftanio Natapratama Hidayat, Maria Christina Prihatiningsih, Duyeh Setiawan</b>	
<i>Sekolah Tinggi Teknologi Nuklir</i>	
HUBUNGAN PSA, FREE-PSA DAN TESTOSTERON PADA PASIEN BENIGN <i>PROSTATE</i> <i>HIPERPLATIA</i> (BPH) DAN KANKER PROSTAT	167 - 170
<b>Wiwin Mailana<sup>1</sup>, Kristina Dwi P<sup>1</sup>, Sri Insani WW<sup>1</sup>, Puji Widayati<sup>2</sup></b>	
<i>1Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi – BATAN</i>	
DAFTAR PESERTA PEMAHALAH	171

## PERKIRAAN DOSIS IMERSI TERHADAP PENAMBANG TIMAH DI LAUT PESISIR PULAU BANGKA DARI PENGOPERASIAN PLTN

Nurokchim, Erwansyah Lubis

Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi – BATAN, Jl. Lebak Bulus Raya, No 49, Pasar Jumat, Jakarta Selatan

nurokchim@batan.go.id

### ABSTRAK

*PERKIRAAN DOSIS IMERSI TERHADAP PENAMBANG TIMAH DI LAUT PESISIR PULAU BANGKA DARI PENGOPERASIAN PLTN. Perkiraan dosis imersi terhadap penambang timah di laut pesisir pulau Bangka dengan menggunakan metode faktor pemekatan telah dilakukan. Dalam perkiraan, source-term pembuangan efluen cair ke lautan Pasifik dari pengoperasian PLTN Diablo Canyon (PWR 2 × 1100 MWe) dan San Onofre (PWR 2 × 1100 MWe) di Amerikat Serikat digunakan dalam kajian ini. Hasil yang diperoleh menunjukkan penambang timah yang berendam dalam air laut selama 2, 4 atau 6 jam per hari, akan menerima dosis efektif maksimum sebesar  $4,45 \times 10^{-3}$  %;  $8,90 \times 10^{-3}$  % dan  $1,34 \times 10^{-2}$  % dari dosis pembatas 0,3 mSv per tahun. Probabilitas terjadinya kanker untuk perorangan adalah  $2,67 \times 10^{-8}$ ;  $5,34 \times 10^{-8}$  dan  $8,01 \times 10^{-8}$  masing-masing bila bekerja 2, 4 dan 6 jam per hari selama 40 tahun (umur reaktor). Data ini memberikan informasi bila terdapat 50 juta orang penambang timah maka potensi penambang yang akan menerima kanker fatal dari dosis imersi adalah sekitar 4 orang. Dengan memperhatikan populasi penambang timah yang jumlahnya reatif sedikit, maka probabilitas ini tidaklah signifikan.*

*Kata Kunci : Dosis imersi, penambang timah, PLTN, pulau Bangka*

### ABSTRACT

*ESTIMATION OF IMMERSION DOSE TO THE STANIUM MINNING IN THE SEASHORE OF BANGKA ISLAND FROM NPP OPERATION. The estimation of immersion dose to the Stannium (Sn) minning in the seashore of Bangka island using concentrations factor methods was carried out. In the estimation, the source-term of effluent released to Pacific ocean from Diablo Canyon and San Onofre Nuclear Power Plant (NPP) operations was used. The results indicated that the Sn minning with immersion in the sea water of 2, 4 and 6 hours per day will receives maximum effective dose of  $4.45 \times 10^{-3}$  %;  $8.90 \times 10^{-3}$  % and  $1.34 \times 10^{-2}$  % from dose constraint of 0.3 mSv per years. The probability of cancer happen for individual are  $2.67 \times 10^{-8}$ ;  $5.34 \times 10^{-8}$  and  $8.01 \times 10^{-8}$  respectively if the working hours are 2, 4 dan 6 hours per days as long as 40 years (reactor lifetime). These data give the information if there are 50 millions of Sn minning, the potential of minner will receive a fatal cancer is around 4 persons. According to the population of Sn minning is very small, so the probabilitas of fatal cancer is insignificant.*

*Keywords : Imersion dose, Sn minner, NPP, Bangka island*

### PENDAHULUAN

Berdasarkan kajian, 5% kebutuhan energi listrik nasional dimasa yang akan datang akan dipenuhi dari Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN). Pembangunan dan pengoperasian PLTN di negara-negara industri nuklir umumnya dekat dengan sumber air (sungai, danau ataupun laut). Sumber air selain digunakan untuk sistem pendingin reaktor juga menjadi media untuk pembuangan efluen cair yang berasal dari sisa proses pengolahan limbah cair radioaktif. Indonesia merencanakan untuk membangun dan mengoperasikan PLTN di daerah Bangka Barat dan Bangka Selatan [1].

Dalam pengoperasian PLTN akan ditimbulkan limbah aktivitas tinggi (LAT), limbah aktivitas menengah (LAM) dan limbah aktivitas rendah

(LAR). Limbah aktivitas tinggi umumnya berupa bahan bakar nuklir (BBN) bekas, sesuai Undang-Undang Ketenaganukliran No. 10 Tahun 1997 limbah ini disimpan di kawasan nuklir selama umur pengoperasian PLTN [2]. Sementara LAM dan LAR padatan dan cair akan diolah di instalasi pengolahan limbah radioaktif (IPLR) yang dibangun dekat dengan kawasan PLTN. Dalam proses pengolahan limbah radioaktif cair akan dihasilkan limbah sisa proses yang dikenal sebagai efluen cair yang berpotensi mengandung sejumlah kecil zat radioaktif. Efluen cair yang dibuang ke badan air ini harus memenuhi Baku Emisi ke Lingkungan (BEL) yang ditetapkan berdasarkan dosis pembatas (*Dose Constraint*) yang secara internasional ditetapkan sebesar 0,3 mSv (300  $\mu$ Sv) per tahun [3].



Pembuangan efluen cair ini akan berlangsung selama operasi PLTN ( $\pm 40$  tahun), sehingga berpotensi mengkontaminasi ekosistem laut yang pada gilirannya dapat meningkatkan penerimaan dosis radiasi melalui berbagai jalur-perantara pada penduduk yang bermukim di sekitar kawasan PLTN.

Dalam makalah ini dilaporkan hasil perkiraan penerimaan dosis radiasi imersi terhadap penduduk yang melakukan penambangan timah di laut pesisir pulau Bangka. Perkiraan dosis imersi dilakukan dengan metode faktor pemekatan (*Concentration Factor Method*). Perhitungan dosis radiasi dilakukan dengan menggunakan metodologi yang dipublikasi dalam *Safety Reports Series* No. 19 dan *United State Environmental Protection Agency* [4,5]. *Data source-term* yang akan digunakan adalah data generik, berupa laporan hasil pemantauan pembuangan efluen cair radioaktif dari pengoperasian PLTN di Amerika Serikat untuk jenis reaktor *Prssurized Water Reactor* (PWR) atau jenis reaktor lainnya dengan daya sekitar 1000 MWe yang tersedia di *Nuclear Regulatory Commission* (NRC) Amerika Serikat[6].

## TATA KERJA

Model matematik penyebaran radionuklida dalam air adalah berdasarkan persamaan adveksi-difusi dalam kondisi kesetimbangan. Skala penyebaran akan semakin luas sejalan dengan penyebaran aliran yang bertambah jauh dari titik pembuangan, dan koefisien difusi lateral akan berubah sebagai fungsi jarak searah aliran air. Beberapa parameter diperlukan untuk memperkirakan konsentrasi radionuklida dalam air laut pesisir, yaitu kedalaman  $D$  (m), jarak antara titik pembuangan efluen dengan pantai  $y_0$  (m), jarak longitudinal (searah aliran air) dari titik pembuangan ke lokasi penambang  $X$  (m), dan tetapan peluruhan radionuklida  $\lambda$  ( $\text{detik}^{-1}$ ). Konsentrasi radionuklida

dalam air laut pesisir diestimasi berdasarkan kondisi yang diilustrasikan dalam Gambar 1[4].

Konsentrasi radionuklida ( $C_{w,tot}$ ) dalam air laut di daerah penangkapan ikan diestimasi dengan persamaan berikut,

$$C_{w,tot} = \frac{962 U^{0,17} Q_i}{D \cdot X^{1,17}} \exp\left[-\frac{\lambda_i \cdot X}{U}\right] \quad (1)$$

$Q_i$  = rata-rata pembuangan Radionuklida-i, Bq/det.

$U$  = kecepatan arus air laut, 0,1m/detik.

$D$  = kedalaman laut pesisir, 20 m.

$\lambda_i$  = peluruhan radionuklida (i), Bq/ detik.

$X$  = jarak daerah penangkapan ikan.

Apabila daerah penangkapan ikan tidak dapat ditentukan, nilai  $X$  dapat diasumsikan 50 kali kedalaman laut setempat, rata-rata kedalaman laut Bangka adalah 30 m.

Konsentrasi radionuklida (i) dalam air laut sepanjang garis pantai dapat dihitung dengan persamaan,

$$C_{w,tot} = \frac{962 U^{0,17} Q_i}{D \cdot X^{1,17}} \exp\left[\frac{(-7,28 \times 10^5) \cdot U^{2,34} Y_0^2}{X^{2,34}}\right] \exp\left[-\frac{\lambda_i \cdot X}{U}\right] \quad (2)$$

## Perkiraan Dosis Imersi

Dosis setara (ekivalen) tahunan dari paparan eksternal karena berendam di dalam air laut (imersi) dihitung dengan persamaan [5],

$$D_{im} = C_{w,s} \cdot K D_{im} \cdot t \quad (3)$$

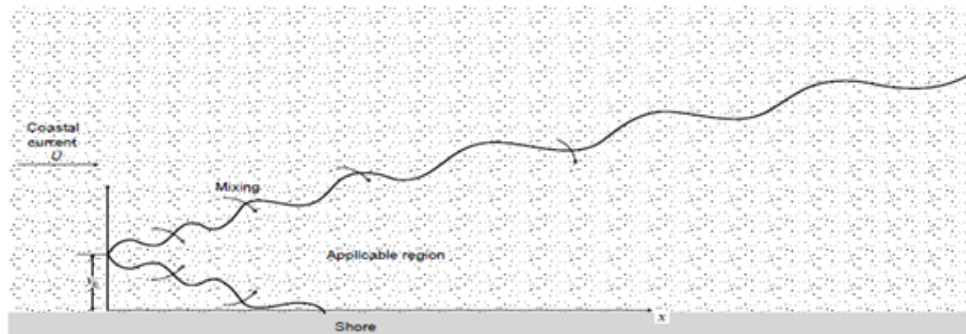
$D_{im}$  = Dosis ekivalen tahunan dari paparan imersi, Sv/ tahun.

$C_{w,s}$  = Konsentrasi radionuklida dalam air laut, Bq/  $\text{m}^3$

$K D_{im}$  = Koefisien dosis ekivalen untuk paparan dari radionuklida yang terdapat dalam air terhadap organ (T), Sv per Bq.  $\text{detik} \cdot \text{m}^{-3}$ .

$t$  = Lama berendam dalam air laut selama setahun, detik.

$$7D < X, \quad \frac{(Y - Y_0)}{X} \ll 3,7$$



Gambar 1. Ilustrasi kondisi pembuangan efluen cair ke laut pesisir.

### Menghitung Dosis Efektif

Dosis efektif dihitung dengan menggunakan persamaan [5],

$$D_E = \sum W_T \cdot D_{im} \quad (4)$$

$D_E$  = Dosis efektif setara, Sv per tahun.

$W_T$  = Faktor bobot organ/ jaringan

$D_{im}$  = Dosis ekivalen pada organ T, Sv per tahun.

### Source-term

Sebagai *source-term* dalam pengkajian ini digunakan konsentrasi radionuklida yang terdapat dalam pembuangan efluen cair ke laut pasifik dari pengoperasian PLTN jenis PWR Diablo Canyon di dekat pantai Avila dan PLTN San Onofre di barat daya San Diego, California. Dua unit PLTN Diablo berkapasitas sekitar  $2 \times 1100$  MWe beroperasi sejak 1984/1985 dan diharapkan dapat terus digunakan

sampai tahun 2024 (40 tahun). Sedangkan 2 unit PLTN San Onofre (unit 2 dan 3) dengan kapasitas yang hampir sama  $2 \times 1100$  MWe beroperasi sejak 1983/1984, namun karena ada permasalahan di sistem pembangkit uapnya, kedua reaktor telah *shutdown permanent* di tahun 2013.

Data *source-term* dari kedua lokasi PLTN diperoleh dari dokumen laporan yang tersedia di NRC. Data yang diperoleh berupa data pembuangan efluen cair tiap kuartal dari laporan selama 4 tahun, periode 2010-2013 untuk PLTN Diablo Canyon [7-10] dan 2009-2012 untuk PLTN San Onofre [11-14]. Kandungan radionuklida dalam efluen cair diambil dari data buangan tertinggi dalam suatu kuartal, untuk mendapatkan kandungan buangan maksimum dalam empat tahun terakhir. Laju buangan kandungan radionuklida dalam efluen kemudian dihitung per kuartal dan disajikan seperti dalam Tabel 1 dan Tabel 2.

**Tabel 1. Laju maksimum pembuangan radionuklida (*source-term*) dalam efluen cair ke laut Pasifik dari PLTN Diablo Canyon jenis PWR dengan daya  $2 \times 1100$  MWe, tahun 2010-2013 [7-10].**

No.	Radionuklida	Laju pembuangan (Bq/dt)
1	Sb-124	0,2961
2	Sb-125	3,5104
3	Cs-134	0,6993
4	Cs-137	2,4920
5	Cr-51	10,1370
6	Co-57	0,2454
7	Co-58	14,3607
8	Co-60	19,6639
9	Fe-59	0,8870
10	Mn-54	0,3243
11	Mo-99	0,0067
12	Nb-95	0,4975
13	Na-24	0,0027
14	Sr-89	0,6993

No.	Radionuklida	Laju pembuangan (Bq/dt)
15	Sr-90	0,2581
16	Te-132	0,7462
17	Sn-113	0,2924
18	Sn-117m	0,1103
19	Zn-65	0,2267
20	Zr-95	0,1248
21	I-131	0,2281
22	I-132	0,6289
23	I-133	0,0005
24	I-135	30,5987
25	Xe-133	76,0274
26	Xe-133m	0,3097
27	Xe-135	0,1492

**Tabel 2. Laju maksimum pembuangan radionuklida (*source-term*) dalam efluen cair ke laut Pasifik dari PLTN San Onofre, jenis PWR dengan daya  $2 \times 1100$  MWe, tahun 2009-2012 [11-14].**

No	Radionuklida	Laju pembuangan (Bq/dt)
1	Sb-124	0,920
2	Sb-125	5,022
3	Ce-141	0,168
4	Cs-134	0,544
5	Cs-136	0,049
6	Cs-137	3,365
7	Cr-51	32,335
8	Co-57	1,178
9	Co-58	91,984
10	Co-60	18,256
11	I-131	0,981
12	Fe-59	27,220
13	Mn-54	3,524

No	Radionuklida	Laju pembuangan (Bq/dt)
14	Nb-95	13,610
15	Nb-97	0,056
16	Ag-110m	1,427
17	Na-24	7,274
18	Sn-113	4,111
19	Sn-117m	0,175
20	Zn-65	0,873
21	Zr-95	7,087
22	Kr-85	4242,516
23	Xe-131m	300,824
24	Xe-133	9151,446
25	Xe-133m	8,447
26	Xe-135	0,268

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Perhitungan konsentrasi radionuklida dalam air laut permukaan sepanjang pantai dapat dilakukan menggunakan persamaan (2) untuk penambang timah tradisional yang melakukan kegiatan penambangan di dekat pantai. Atau menggunakan persamaan (1) untuk penambang (penyelam) yang lokasinya sejajar dengan arah arus dan posisi pembuangan efluen ( $y = y_0$ ). Persamaan (1) akan memberikan nilai terbesar dibandingkan dengan persamaan (2), oleh karena itu untuk prinsip kehati-hatian dalam memperkirakan dosis, dalam makalah ini perhitungan konsentrasi radionuklida dalam air menggunakan persamaan (1).

Hasil perhitungan konsentrasi radionuklida dalam air laut dengan menggunakan persamaan (1) ditunjukkan dalam Tabel 3 dan Tabel 4 masing-masing untuk *source-term* PLTN Diablo Canyon dan San Onofre.

Tampak dari Tabel 3 dan Tabel 4 bahwa gas terlarut Xe-133 merupakan radionuklida dengan konsentrasi terbanyak dalam air laut, kemudian diikuti; I-135, Co-60, Co-58 dan Cr-51 untuk *source-term* Diablo Canyon; dan Kr-85, Co-58, Cr-51 dan Co-60 untuk *source-term* San Onofre. Hal ini sebanding dengan besarnya konsentrasi masing-masing radionuklida pada laju pembuangan Tabel 1 dan Tabel 2.

Dosis ekivalen tiap organ (dihitung dengan persamaan (3)), yang diterima oleh pekerja penambang timah dengan asumsi bekerja 2 jam per hari sepanjang tahun ditunjukkan dalam Tabel 5 dan Tabel 7, Sedangkan dosis efektif yang diterima oleh pekerja yang dihitung dengan persamaan (4) ditunjukkan dalam Tabel 6 dan Tabel 8.

**Tabel 3. Konsentrasi radionuklida dalam air laut di lokasi penambang pada jarak 1500 m dari titik pembuangan efluen, kedalaman laut diasumsikan 20 m (*Source-term* PLTN Diablo Canyon).**

No.	Radionuklida	Laju pembuangan (Ba/df)	Waktu paro (*)	Konstanta peluruhan $\lambda$ (detik <sup>-1</sup> )	Konsentrasi radionuklida dalam air (Ba/m <sup>3</sup> )
1	Sb-124	0,29613	60,20 d	1,33265E-07	0,00669
2	Sb-125	3,51040	2,7582 y	7,96880E-09	0,07938
3	Cs-134	0,69926	2,0648 y	1,06449E-08	0,01581
4	Cs-137	2,49201	30,07 y	7,30946E-10	0,05635
5	Cr-51	10,13699	27,7025 d	2,89596E-07	0,22889
6	Co-57	0,24545	271,79 d	2,95174E-08	0,00555
7	Co-58	14,36073	70,86 d	1,13217E-07	0,32455
8	Co-60	19,66388	5,2714 y	4,16959E-09	0,44464
9	Fe-59	0,88699	44,503 d	1,80270E-07	0,02004
10	Mn-54	0,32429	312,3 d	2,56886E-08	0,00733
11	Mo-99	0,00666	65,94 h	2,91994E-06	0,00015
12	Nb-95	0,49746	34,975 d	2,29379E-07	0,01124
13	Na-24	0,00268	14,959 h	1,28712E-05	0,00006
14	Sr-89	0,69926	50,53 d	1,58768E-07	0,01580
15	Sr-90	0,25812	28,79 y	7,63444E-10	0,00584
16	Te-132	0,74619	3,204 d	2,50391E-06	0,01666
17	Sn-113	0,29238	115,09 d	6,97066E-08	0,00661
18	Sn-117m	0,11029	13,6 d	5,89892E-07	0,00249
19	Zn-65	0,22667	244,26 d	3,28443E-08	0,00512
20	Zr-95	0,12484	64,02 d	1,25313E-07	0,00282
21	I-131	0,22808	8,0207 d	1,00023E-06	0,00513
22	I-132	0,62887	2,295 h	8,38958E-05	0,00935
23	I-133	0,00054	20,8 h	9,25677E-06	0,00001
24	I-135	30,59868	6,57 h	2,93061E-05	0,59761
25	Xe-133	76,02740	5,243 d	1,53014E-06	1,70607
26	Xe-133m	0,30974	2,19 d	3,66326E-06	0,00688
27	Xe-135	0,14924	9,14 h	2,10657E-05	0,00304

(\*) y = tahun, d = hari, h = jam

**Tabel 4. Konsentrasi radionuklida dalam air laut di lokasi penambang pada jarak 1500 m dari titik pembuangan efluen, kedalaman laut diasumsikan 20 m (*Source-term* PLTN San Onofre).**

No	Radionuklida	Laju pembuangan (Bq/dt)	Waktu paro (*)	Konstanta Peluruhan $\lambda$ (detik <sup>-1</sup> )	Konsentrasi radionuklida dalam air (Bq/m <sup>3</sup> )
1	Sb-124	0,920	60,20d	1,333E-07	0,00574
2	Sb-125	5,022	2,7582y	7,969E-09	0,03140
3	Ce-141	0,168	35,501d	2,260E-07	0,00105
4	Cs-134	0,544	2,0648y	1,064E-08	0,00340
5	Cs-136	0,049	13,16d	6,096E-07	0,00031
6	Cs-137	3,365	30,07y	7,309E-10	0,02104
7	Cr-51	32,335	27,7025d	2,896E-07	0,20133
8	Co-57	1,178	271,79d	2,952E-08	0,00736
9	Co-58	91,984	70,86d	1,132E-07	0,57424
10	Co-60	18,256	5,2714y	4,170E-09	0,11416
11	I-131	0,981	8,0207d	1,000E-06	0,00604
12	Fe-59	27,220	44,503d	1,803E-07	0,02198
13	Mn-54	3,524	312,3d	2,569E-08	0,04371
14	Nb-95	13,610	34,975d	2,294E-07	0,08482
15	Nb-97	0,056	72,1m	1,602E-04	0,00003
16	Ag-110m	1,427	249,79d	3,212E-08	0,04547
17	Na-24	7,274	14,959h	1,287E-05	0,02119
18	Sn-113	4,111	115,09d	6,971E-08	0,00109
19	Sn-117m	0,175	13,6d	5,899E-07	0,00913
20	Zn-65	0,873	244,26d	3,284E-08	0,00546
21	Zr-95	7,087	64,02d	1,253E-07	0,04423
22	Kr-85	4242,516	10,756y	2,043E-09	26,52947
23	Xe-131m	300,824	11,84d	6,776E-07	1,86216
24	Xe-133	9151,446	5,243d	1,530E-06	55,92938
25	Xe-133m	8,447	2,19d	3,663E-06	0,05000
26	Xe-135	0,268	9,14h	2,107E-05	0,00122

(\*): y = tahun, d = hari, h = jam, m = menit,

Pada Tabel 6 dan 8 dapat dilihat bahwa dosis total (efektif) imersi yang diterima oleh penambang timah dengan asumsi *source-term* Diablo Canyon dan San Onofre cukup berbeda. Kandungan radionuklida buangan efluen cair *Source-term* San Onofre secara kuantitatif lebih banyak sehingga memberikan dosis imersi yang lebih besar. Hal ini kemungkinan besar karena data *source-term* yang diambil sebagai acuan merupakan data terbesar buangan dalam periode 4 tahun operasi, dimana masa tersebut merupakan periode akhir operasi PLTN San Onofre. PLTN Diablo merupakan PLTN yang mempunyai performa sangat baik dengan faktor operasi rata-rata diatas 85% selama 30 tahun operasi [15,16]. Sementara itu PLTN San Onofre dengan lama operasi yang hampir sama (sejak 1983/1984) mengalami permasalahan dengan sitem pembangkit uapnya sehingga kedua unit reaktor San Onofre *shutdown permanent* sejak 7 juni 2013 [17].

Total dosis imersi yang dihitung berdasarkan *source-term* PLTN Diablo Canyon seperti terlihat pada Tabel 6 adalah 0,095 nSv per tahun, Dosis imersi ini bila dibandingkan terhadap pembatas dosis sebesar 0,3 mSv ( $3 \times 10^5$  nSv) hanya sebesar  $3,2 \times 10^{-5}$  %, Berdasarkan koefisien risiko kanker 5 % per Sievert [3], penerimaan dosis imersi ini akan memberikan probabilitas terjadinya kanker sebesar  $4,8 \times 10^{-12}$  untuk pekerja yang menambang 2 jam per hari selama satu tahun, atau akan mempunyai resiko kanker sebesar  $1,9 \times 10^{-10}$  untuk pekerja yang menambang selama 40 tahun (umur reaktor). Dosis imersi yang dihitung berdasarkan *source-term* San Onofre (Tabel 8) sebesar 0,817 nSv, delapan kali lebih besar dari *source-term* Diablo Canyon, jika dibandingkan dengan pembatas dosis angka ini juga tidak cukup besar, hanya  $2,72 \times 10^{-3}$  % dengan probabilitas terjadinya kanker sebesar  $4,90 \times 10^{-9}$  untuk penambang yang bekerja 2 jam per hari selama 40 tahun.

**Tabel 5. Dosis ekivalen tiap organ dari imersi air laut selama 2 jam per hari dalam nSv per tahun, (Berdasarkan *source-term* PLTN Diablo Canyon).**

No,	Radionuklida	Dosis ekuivalen tiap Organ (nSv/th)						
		<i>Gonad</i>	<i>Breast</i>	<i>Lung</i>	<i>Red Marrow</i>	<i>Bond Surface</i>	<i>Thyroid</i>	<i>Remainder</i>
1	Sb-124	9,37E-04	1,06E-03	9,42E-04	9,33E-04	1,41E-03	9,62E-04	9,13E-04
2	Sb-125	2,49E-03	2,86E-03	2,44E-03	2,35E-03	4,47E-03	2,53E-03	2,33E-03
3	Cs-134	1,85E-03	2,10E-03	1,84E-03	1,79E-03	3,01E-03	1,88E-03	1,76E-03
4	Cs-137	6,31E-07	7,70E-07	5,24E-07	4,46E-07	1,81E-06	5,98E-07	5,00E-07
5	Cr-51	5,36E-04	6,12E-04	5,22E-04	4,96E-04	1,11E-03	5,41E-04	4,98E-04
6	Co-57	4,92E-05	5,73E-05	4,68E-05	4,07E-05	1,47E-04	4,88E-05	4,35E-05
7	Co-58	2,38E-02	2,71E-02	2,38E-02	2,31E-02	3,82E-02	2,43E-02	2,27E-02
8	Co-60	1,52E-04	1,75E-04	1,46E-04	1,39E-04	2,86E-04	1,53E-04	1,40E-04
9	Fe-59	1,83E-03	2,08E-03	1,85E-03	1,82E-03	2,69E-03	1,89E-03	1,77E-03
10	Mn-54	4,64E-04	5,27E-04	4,61E-04	4,52E-04	7,25E-04	4,75E-04	4,42E-04
11	Mo-99	1,62E-06	1,86E-06	1,60E-06	1,55E-06	2,84E-06	1,66E-06	1,53E-06
12	Nb-95	6,48E-04	7,37E-04	6,44E-04	6,29E-04	1,03E-03	6,62E-04	6,17E-04
13	Na-24	1,67E-05	1,86E-05	1,70E-05	1,70E-05	2,26E-05	1,73E-05	1,65E-05
14	Sr-89	1,72E-06	2,02E-06	1,56E-06	1,41E-06	4,31E-06	1,69E-06	1,48E-06
15	Sr-90	6,41E-08	7,85E-08	5,22E-08	4,41E-08	1,87E-07	6,02E-08	4,96E-08
16	Te-132	2,67E-04	3,09E-04	2,50E-04	2,31E-04	6,34E-04	2,66E-04	2,37E-04
17	Sn-113	4,80E-06	6,48E-06	2,85E-06	2,75E-06	9,36E-06	4,17E-06	2,98E-06
18	Sn-117m	2,69E-05	3,13E-05	2,50E-05	2,25E-05	7,17E-05	2,66E-05	2,35E-05
19	Zn-65	2,29E-04	2,60E-04	2,29E-04	2,26E-04	3,39E-04	2,35E-04	2,20E-04
20	Zr-95	1,57E-04	1,79E-04	1,56E-04	1,52E-04	2,52E-04	1,60E-04	1,49E-04
21	I-131	1,44E-04	1,65E-04	1,41E-04	1,35E-04	2,80E-04	1,46E-04	1,34E-04
22	I-132	6,99E-04	7,93E-04	6,96E-04	6,78E-04	1,11E-03	7,13E-04	6,66E-04
23	I-133	4,78E-07	5,46E-07	4,74E-07	4,60E-07	8,11E-07	4,87E-07	4,54E-07
24	I-135	5,44E-02	6,19E-02	5,51E-02	5,44E-02	7,97E-02	5,64E-02	5,31E-02
25	Xe-133	4,51E-03	5,49E-03	3,63E-03	2,94E-03	1,42E-02	4,19E-03	3,42E-03
26	Xe-133m	1,53E-05	1,84E-05	1,27E-05	1,16E-05	3,48E-05	1,46E-05	1,22E-05
27	Xe-135	4,58E-05	5,24E-05	4,43E-05	4,17E-05	1,02E-04	4,60E-05	4,20E-05
TOTAL		<b>9,33E-02</b>	<b>1,07E-01</b>	<b>9,30E-02</b>	<b>9,07E-02</b>	<b>1,50E-01</b>	<b>9,56E-02</b>	<b>8,93E-02</b>

**Tabel 6. Dosis efektif dari imersi air laut selama 2 jam perhari sepanjang tahun, dalam nSv/th (Berdasarkan *source-term* PLTN Diablo Canyon).**

Organ	$W_T$	$D_{im}$ (nSv/th)	$W_T \times D_{im}$ (nSv/th)
<i>Gonad</i>	0,25	9,330E-02	2,333E-02
<i>Breast</i>	0,15	1,065E-01	1,598E-02
<i>Lung</i>	0,12	9,297E-02	1,116E-02
<i>Red Marrow</i>	0,12	9,065E-02	1,088E-02
<i>Bond Surface</i>	0,03	1,498E-01	4,493E-03
<i>Thyroid</i>	0,03	9,561E-02	2,868E-03
<i>Remainder</i>	0,30	8,927E-02	2,678E-02
Dosis efektif $D_E = \sum W_T \times D_{im}$			9,548E-02

**Tabel 7. Dosis ekivalen tiap organ dari imersi dalam air laut selama 2 jam per hari, nSv per tahun, (Berdasarkan *Source-term* PLTN San Onofre).**

No	Radionuklida	Dosis ekivalen tiap organ (nSv/th)						
		Gonad	Breast	Lung	Red Marrow	Bond Surface	Thyroid	Remainder
1	Sb-124	2,912E-03	3,304E-03	2,927E-03	2,897E-03	4,390E-03	2,987E-03	2,836E-03
2	Sb-125	3,565E-03	4,084E-03	3,490E-03	3,358E-03	6,395E-03	3,614E-03	3,334E-03
3	Ce-141	2,075E-05	2,420E-05	1,934E-05	1,719E-05	5,795E-05	2,056E-05	1,818E-05
4	Cs-134	1,440E-03	1,637E-03	1,431E-03	1,395E-03	2,344E-03	1,467E-03	1,369E-03
5	Cs-136	1,822E-04	2,062E-04	1,806E-04	1,765E-04	2,905E-04	1,862E-04	1,733E-04
6	Cs-137	8,516E-07	1,040E-06	7,078E-07	6,028E-07	2,450E-06	8,074E-07	6,746E-07
7	Cr-51	1,709E-03	1,952E-03	1,667E-03	1,582E-03	3,540E-03	1,725E-03	1,587E-03
8	Co-57	2,361E-04	2,748E-04	2,245E-04	1,954E-04	7,043E-04	2,341E-04	2,090E-04
9	Co-58	1,524E-01	1,735E-01	1,524E-01	1,480E-01	2,445E-01	1,554E-01	1,453E-01
10	Co-60	1,410E-04	1,623E-04	1,356E-04	1,287E-04	2,652E-04	1,419E-04	1,299E-04
11	I-131	6,193E-04	7,082E-04	6,082E-04	5,796E-04	1,204E-03	6,272E-04	5,780E-04
12	Fe-59	7,278E-03	8,260E-03	7,336E-03	7,221E-03	1,069E-02	7,509E-03	7,047E-03
13	Mn-54	1,001E-02	1,136E-02	9,948E-03	9,741E-03	1,562E-02	1,025E-02	9,534E-03
14	Nb-95	1,772E-02	2,015E-02	1,761E-02	1,721E-02	2,808E-02	1,812E-02	1,687E-02
15	Nb-97	5,609E-06	6,397E-06	5,576E-06	5,418E-06	9,293E-06	5,725E-06	5,335E-06
16	Ag-110m	3,441E-02	3,907E-02	3,429E-02	3,370E-02	5,329E-02	3,525E-02	3,298E-02
17	Na-24	2,557E-02	2,852E-02	2,601E-02	2,607E-02	3,470E-02	2,657E-02	2,529E-02
18	Sn-113	2,874E-06	3,880E-06	1,707E-06	1,647E-06	5,604E-06	2,494E-06	1,782E-06
19	Sn-117m	3,601E-04	4,177E-04	3,337E-04	3,001E-04	9,578E-04	3,553E-04	3,145E-04
20	Zn-65	8,818E-04	9,994E-04	8,818E-04	8,703E-04	1,305E-03	9,062E-04	8,488E-04
21	Zr-95	8,904E-03	1,014E-02	8,846E-03	8,625E-03	1,430E-02	9,102E-03	8,474E-03
22	Kr-85	1,750E-02	2,015E-02	1,708E-02	1,631E-02	3,291E-02	1,771E-02	1,624E-02
23	Xe-131m	5,187E-03	6,851E-03	2,966E-03	2,506E-03	1,189E-02	4,399E-03	3,019E-03
24	Xe-133	5,424E-01	6,614E-01	4,365E-01	3,542E-01	1,705E+00	5,041E-01	4,116E-01
25	Xe-133m	4,165E-04	5,020E-04	3,456E-04	3,167E-04	9,500E-04	3,968E-04	3,338E-04
26	Xe-135	8,205E-05	9,391E-05	7,949E-05	7,468E-05	1,821E-04	8,237E-05	7,532E-05
	TOTAL	8,339E-01	9,938E-01	7,254E-01	6,355E-01	2,174E+00	8,012E-01	6,882E-01

**Tabel 8. Dosis efektif dari imersi air laut selama 2 jam perhari sepanjang tahun, dalam nSv/th (Berdasarkan *source-term* PLTN San Onofre).**

Organ	$W_T$	$D_{im}$ (nSv/th)	$W_T \times D_{im}$ (nSv/th)
Gonad	0,25	0,834	0,208
Breast	0,15	0,994	0,149
Lung	0,12	0,725	0,087
Red Marrow	0,12	0,636	0,076
Bond Surface	0,03	2,174	0,065
Thyroid	0,03	0,801	0,024
Remainder	0,30	0,688	0,206
Dosis efektif $D_E = \sum W_T \times D_{im}$			0,817

**Tabel 9. Perkiraan penerimaan dosis imersi untuk penambang timah di laut pesisir, 1500 m dari lokasi pembuangan efluen, nSv per tahun.**

Berdasarkan: <i>Source-term</i> PLTN	Waktu Menambang di laut		
	2 jam per hari	4 jam per hari	6 jam per hari
Diablo Canyon	0,095	0,191	0,286
San Onofre	0,817	1,633	2,450

**Tabel 10. Perkiraan penerimaan dosis imersi untuk penambang timah di laut pesisir, 140 m dari lokasi pembuangan efluen, nSv per tahun.**

Berdasarkan: <i>Source-term</i> PLTN	Waktu Menambang di laut		
	2 jam per hari	4 jam per hari	6 jam per hari
Diablo Canyon	1,998	3,996	5,995
San Onofre	13,357	26,715	40,702

Perkiraan dosis imersi untuk penambang timah di laut yang bekerja di 1500 m dari lokasi pembuangan dengan asumsi bekerja 2, 4 dan 6 jam per hari sepanjang tahun ditunjukkan dalam Tabel 9. Sedangkan pada kondisi ekstrim, dengan asumsi penambang bekerja 140 m dari lokasi pembuangan ditunjukkan dalam Tabel 10. Dengan asumsi bahwa PLTN yang dibangun di Bangka adalah PLTN jenis PWR berkapasitas  $2 \times 1100$  MWe maka diperkirakan, penambang timah yang berendam di dalam air laut pesisir selama 2, 4 dan 6 jam per hari akan menerima dosis efektif maksimum (ekstrim) masing-masing sebesar 13,357, 26,715 dan 40,702 nSv per tahun yang dihitung berdasarkan *source-term* PLTN San Onofre. Penerimaan dosis ini masih sangat rendah dibandingkan terhadap dosis pembatas, hanya sebesar  $4,45 \times 10^{-3} \%$ ;  $8,90 \times 10^{-3} \%$  dan  $1,34 \times 10^{-2} \%$ . Probabilitas terjadinya kanker untuk perorangan adalah  $2,67 \times 10^{-8}$ ;  $5,34 \times 10^{-8}$  dan  $8,01 \times 10^{-8}$  untuk penambang yang bekerja selama 40 tahun. Data ini memberikan informasi bila terdapat 50 juta orang penambang timah maka potensi penambang yang akan menerima kanker fatal sekitar 4 orang, Dengan memperhatikan populasi penambang timah yang jumlahnya relatif sedikit, tidak mencapai 10000 orang, maka probabilitas ini tidaklah signifikan.

## KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil perkiraan yang dilakukan dengan menggunakan *source-term* PLTN San Onofre  $2 \times 1100$  MWe dapat disimpulkan bahwa penambang timah yang melakukan kegiatan penambangan di

daerah pesisir pulau Bangka dengan berendam dalam air laut selama 2, 4 atau 6 jam efektif per hari, dalam setahun perorangan akan menerima dosis imersi maksimum sebesar  $4,45 \times 10^{-3} \%$ ;  $8,90 \times 10^{-3} \%$  dan  $1,34 \times 10^{-2}$  dari dosis pembatas yang ditetapkan secara internasional, Probabilitas terjadinya kanker perorangan yang bekerja selama 40 tahun adalah  $2,67 \times 10^{-8}$ ;  $5,34 \times 10^{-8}$  dan  $8,01 \times 10^{-8}$ . Data ini memberikan informasi bahwa bila terdapat 50 juta orang penambang timah maka potensi penambang yang akan menerima kanker fatal sekitar 4 orang, Dengan memperhatikan populasi penambang timah yang jumlahnya relatif sedikit tidak mencapai 10000 orang, maka probabilitas ini tidaklah signifikan, penerimaan dosis imersi ini relatif sangat rendah, sehingga jalur imersi tidak merupakan jalur kritis,

## DAFTAR PUSTAKA

1. *Blue-print Pengelolaan Energi Nasional 2005 – 2025*, Jakarta, 2005,
2. Undang-Undang No, 10 Tahun 1997 Tentang Ketenaganukliran (lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 1997 Nomor 68, Tambahan Lembaran Negara Nomor 3699).
3. IAEA, *International Basic Safety Standard for Protection Against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources*, Safety Series No,115, Vienna, 1996.
4. IAEA, *Safety Reports Series No 19*, Generic Model for Use in Assessing the Impact of

- Discharge of Radioactive Substances to the Environment, 2001.
5. Keith F.E, and Jeffrey C.R, *External Exposure to Radionuclides in Air, Water and Soil*, US, Environmental Protection Agency, Washington, DC 20460, 1993.
  6. NRC, *Radioactive Effluent and Environmental Reports from Operating of Nuclear Power Reactors*, United State of America, <http://www.nrc.gov/reactors/operating/ops-experience.html>, diakses April 2015.
  7. PG&E, *Diablo Canyon Power Plant 2010 Annual Radioactive Effluent Release Report*, April 28, 2011.
  8. PG&E, *Diablo Canyon Power Plant 2011 Annual Radioactive Effluent Release Report*, April 30, 2012.
  9. PG&E, *Diablo Canyon Power Plant 2012 Annual Radioactive Effluent Release Report*, April 30, 2013.
  10. PG&E, *Diablo Canyon Power Plant 2013, Annual Radioactive Effluent Release Report*, April 30, 2014.
  11. SCE, *San Onofre Nuclear Generation Station: Annual Radioactive Effluent Release Report 2009 January-December*, April 28, 2010.
  12. SCE, *San Onofre Nuclear Generation Station: Annual Radioactive Effluent Release Report 2010 January-December*, April 26, 2011.
  13. SCE, *San Onofre Nuclear Generation Station: Annual Radioactive Effluent Release Report 2011 January-December*, April 28, 2012.
  14. SCE, *San Onofre Nuclear Generation Station: Annual Radioactive Effluent Release Report 2012 January-December*, April 30, 2013.
  15. IAEA, *Technical Reports Series No.428, The Power Reactor Information System (PRIS) and Its Extension to non-Electrical Applications, Decommissioning and Delayed Projects Information*, Vienna, 2005.
  16. IAEA, *PRIS: United States of America, Diablo Canyon-1, Operational* <http://www.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/ReactorDetails.aspx?current=628>, diakses April 2015.
  17. IAEA, *PRIS: United States of America, San Onofre-2, Permanent Shutdown*, <http://www.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/ReactorDetails.aspx?current=683>, diakses April 2015.

---

## TANYA JAWAB

### Duyeh Setiawan

- Atas dasar apa Bapak menggunakan asumsi daya PLTN 200 MWe dikaitkan dengan rencana pembangunan PLTN di Indonesia.

### Nurokhim

- Kemungkinan besar yang akan dibangun adalah PLTN berdaya sekitar 1000 MWe. PLTN dengan daya sekitar itu biasanya tidak dibangun tunggal tetapi 2 dengan back upnya. Dari data yang tersedia didapat PLTN 2 × 1100 MWe yang dapat digunakan untuk mewakili asumsi tersebut.