

## ANALISIS SEBARAN RADIASI YANG KELUAR KE LINGKUNGAN DARI PENGOPERASIAN RSG-GAS, MENGGUNAKAN PAKET PROGRAM CAP88-PC

P.M. Udiyani, M. Budi Setiawan, Sri Kuntjoro, Subiharto, Unggul H

### ABSTRAK

**ANALISIS SEBARAN RADIASI YANG KELUAR KE LINGKUNGAN DARI PENGOPERASIAN RSG-GAS.** Reaktor RSG-GAS sebagai salah satu instalasi reaktor nuklir adalah suatu bagian yang sangat vital dan strategis. Oleh karena itu diperlukan sekali adanya sistem penghitungan radiasi dan dosis yang diterima penduduk jika terjadi suatu kecelakaan. Berdasarkan kecelakaan dengan asumsi 1 bahan bakar dan 5 bahan bakar meleleh, maka besaran-besaran tersebut dapat dihitung menggunakan paket program CAP88-PC. Paket program CAP88-PC menyediakan masukan program berupa lepasan radioaktif dengan asumsi 1 bahan bakar dan 5 bahan bakar meleleh (berdasarkan keluaran paket program Origen 2), data populasi penduduk dalam radius 1 – 5 km, jumlah dan jenis konsumsi penduduk (konsumsi sayuran, ubi, daging, susu, dll), penggunaan lahan, dan keadaan meteorologi. Hasil keluaran berupa dosis individu penduduk radius 1-5 km, paparan eksternal dan internal (berdasarkan jenis nuklida dan jalur pemaparan), dosis kolektif penduduk, resiko kanker yang diterima penduduk (berdasarkan jenis organ, jenis nuklida dan jalur pemaparan).

Kata kunci : Sebaran

### ABSTRACT

**ANALYSIS OF RADIOACTIVE DISCHARGE TO THE ENVIRONMENT FROM THE RSG-GAS OPERATION USING CAP88-PC PROGRAMME CODE.** BATAN's RSG-GAS reactor is one of the nuclear installations in Indonesia. Radiation and dose calculation which is exposed to the people reside in the surrounding areas is urgently needed. Based on the assumption of accident caused by melting of 1 fuel element and 5 fuel elements, the radionuclide discharges are calculated using PC-CAP88 code (US Dept. of Energy). PC-CAP88 code requires input parameters such as: Radionuclide release from accident (calculated using Origen2 code), population data within 1-5 km radius, amount and type if consumption (vegetables, root vegetable, meat, milk, etc.) of the people reside surrounding the facility, land use and meteorological data. The output are: individual dose within 1-5 km radius, external and internal exposures (based on the nuclide type and exposure pathways), collective dose, cancer risk accepted by the resident (based on the human organ, nuclide type and pathways).

Key Words: Exposure

### PENDAHULUAN

Reaktor RSG-GAS sebagai salah satu instalasi reaktor nuklir adalah suatu bagian yang sangat vital dan strategis. Oleh karena itu diperlukan sekali adanya sistem penghitungan radiasi dan dosis yang diterima penduduk jika terjadi suatu kecelakaan. Berdasarkan kecelakaan dengan asumsi 1 bahan bakar dan 5 bahan bakar meleleh, dihitung paparan radiasi yang keluar, jenis dan aktivitas nuklida yang ke lingkungan, dosis yang diterima penduduk (dosis individu dan kolektif) dalam radius 5 km dari RSG-GAS, resiko terkena penyakit akibat radiasi dalam

jangka waktu tertentu, dan kerugian-kerugian lain yang ditimbulkan dari kecelakaan tersebut.

Udara merupakan alur penting dalam penyebaran lepasan radioaktif yang dikeluarkan dari pengoperasian instalasi nuklir ke lingkungan dan manusia. Proses penyebaran dapat sederhana, tetapi dapat juga lebih rumit<sup>(1)</sup>. Faktor-faktor yang mempengaruhi besaran paparan yang diterima lingkungan maupun manusia antara lain adalah: besarnya lepasan radioaktif, keadaan meteorologis dan cuaca setempat (arah angin, kecepatan, temperatur udara, gradien temperatur, kelembaban, cuaca, dll), populasi dan kerapatan penduduk dalam radius yang telah ditentukan, jenis dan jumlah

konsumsi penduduk (sayuran, daging, susu, karbohidrat), dan penggunaan lahan pada area yang diperhitungkan akan terkena dampak<sup>[2]</sup>.

Metode yang dilakukan adalah menyiapkan masukan untuk paket program CAP88-PC<sup>[3,4]</sup>. Paket program CAP88-PC akan menghitung dosis yang diterima penduduk dan lingkungan dengan mekanisme dispersi lapisan radioaktivitas ke atmosfer dan alur pemasukan lewat udara ke berbagai alur yang memungkinkan radiasi masuk ke manusia (alur pernafasan, makanan dan minuman).

**TEORI**

Rumus-rumus dan definisi yang digunakan dalam perhitungan dosis kolektif dan individu, serta resiko yang diterima penduduk dan lingkungan dengan menggunakan paket program CAP88-PC adalah<sup>[5]</sup>:

**1. Timbulnya plume**

Digunakan persamaan Rupp's :

$$\Delta h = \frac{1.5vd}{\mu}$$

$$X = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z\mu} [-1/2(y/\sigma_y)^2] \{ \exp[-1/2((z-H)/\sigma_z)^2] + \exp[-1/2((z+H)/\sigma_z)^2] \}$$

Keterangan:

X = Konsentrasi di udara (chi) pada sumbu x searah angin, y.tegak lurus arah angin, z ketinggian di atas permukaan tanah, meter (Ci/m<sup>3</sup>)

Q = Lepasn radioaktif rata-rata yang ke luar dari cerobong (Ci/dt)

**3. Plume Depletion**

$$\frac{Q^1}{Q} = \exp\{-(2/\pi)^{1/2} \frac{V_d}{\mu} \int_0^x \frac{\exp[-(H-V_g x/\mu)^2 / 2\sigma_z^2] dx\}}{\sigma_z}$$

Keterangan :

$\Delta h$  = Timbulnya plume

v = Kecepatan gas efluen dari cerobong (m/dt)

d = Diameter dalam cerobong (m)

$\mu$  = Kecepatan angin (m/dt)

atau digunakan persamaan Brigg's:

$$\Delta h = 2.9(F / \mu S)^{1/3}$$

Keterangan :

S =  $(g / T_a)(\partial T_a / \partial z) + \Gamma$

g = Percepatan gravitasi (m/dt<sup>2</sup>)

T = Temperatur udara (°K)

$\partial T_a / \partial z$  = Gradien temperatur vertikal (°K /m),

Nilai  $\partial T_a / \partial z$  untuk Kategori

Pasquill E : 7,280E-02 °K /m, Pasquill

F : 1,090E-01 °K /m, Pasquill G:

1,455E-01 °K /m

z = Jarak vertikal di atas cerobong (m)

$\Gamma$  = Konstanta adiabatik udara (0.0098 °K /m)

**2. Dispersi plume**

Digunakan Persamaan Gifford:

$\mu$  = Kecepatan angin rata-rata (m/dt)

$\sigma_y$  = Koefisien dispersi horizontal (m)

$\sigma_z$  = Koefisien dispersi vertikal (m)

H = Tinggi cerobong efektif

y = Jarak tegak lurus arah angin (m)

z = Ketinggian dari atas tanah (m)

Keterangan:

- $V_d$  = Kecepatan deposisi (m/dt)  
 $\mu$  = Kecepatan angin (m/dt)  
 $\sigma_z$  = Koefisien dispersi vertikal (m)  
 $V_g$  = Kecepatan gravitasi (m/dt)  
 $H$  = Tinggi cerobong efektif (m)  
 $x$  = Jarak searah angin (m)

- $DF_{\eta}$  = Faktor dosis rata-rata, mrem/nCi-tnh/  $cm^3$   
 $P(k)$  = Jumlah populasi yang terpaparkan  
 $K_J$  = 0,001 nCi/pCi x 1.000.000.  $cm^3/m^3$

#### 4. Perhitungan dosis dan resiko

##### a. Imersi udara

Dosis individu dari persamaan:

$$D = \frac{E_{\eta}(k)DF_{\eta}K_J}{P(k)}$$

Jika :

- $E_{\eta}(k)$  = Paparan rata-rata, orang-pCi/ $cm^3$   
 $DF_{\eta}$  = Faktor dosis rata-rata, mrem/nCi-tnh/  $cm^3$   
 $P(k)$  = Jumlah populasi yang terpaparkan  
 $K_J$  = 0,001 nCi/pCi x 1.000.000.  $cm^3/m^3$

##### b. Paparan permukaan

Dosis individu karena paparan permukaan :

$$D = \frac{E_{\eta}(k)DF_{\eta}K_J}{P(k)}$$

Jika :

- $E_{\eta}(k)$  = Paparan rata-rata, orang-pCi/ $cm^2$   
 $DF_{\eta}$  = Faktor dosis rata-rata, mrem/nCi-tnh/  $cm^2$   
 $P(k)$  = Jumlah populasi yang terpaparkan  
 $K_J$  = 0,001 nCi/pCi x 10.000  $cm^2/m^2$

#### 3. Dosis dari asupan makanan dan hirupan

Dosis individu :

$$D = \frac{E_{\eta}(k)DF_{\eta}K_J}{P(k)}$$

Jika :

- $E_{\eta}(k)$  = Paparan rata-rata, orang-pCi/ $cm^3$

#### TATA KERJA

##### Alat dan Bahan:

1. Data primer dan sekunder mengenai populasi dan konsumsi penduduk di area radius 5 km dari RSG-GAS
2. Data primer tentang keadaan cuaca dan angin
3. Data sekunder dan primer tentang penggunaan lahan dalam area radius 5 km.
4. Satu set paket program CAP88-PC, yang dibuat oleh U.S. Department of Energy.

#### CARA KERJA

1. Data masukan yang disiapkan adalah: keluaran radioaktif dengan asumsi 1 atau 5 bahan bakar meleleh menggunakan paket program Origen-2
2. Data masukan untuk populasi dan konsumsi penduduk di area (dalam radius 5 km) dari RSG-GAS, dikumpulkan dari Kecamatan yang masuk dalam area tersebut.
3. Data keadaan angin dan cuaca diambil dari data yang dikeluarkan oleh P2PLR.
4. Data tersebut diolah dengan paket program CAP88-PC, yang dibuat oleh U.S. Department of Energy.
5. Hasil keluaran diolah dan dianalisis.

#### HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil perhitungan untuk asumsi kecelakaan 1 bahan bakar dan asumsi 5 bahan bakar pada Tabel 1-12.

Tabel 1. Dosis equivalen yang diterima oleh organ tubuh dengan asumsi 1 dan 5 bahan bakar meleleh.

| No. | Organ   | Selected Individual<br>(mrem/tahun) |             | Collective Population<br>(orang-rem/tahun) |             |
|-----|---------|-------------------------------------|-------------|--|-------------|
|     |         | 1 bhn bakar                         | 5 bhn bakar | 1 bhn bakar                                | 5 bhn bakar |
| 1.  | GONADS  | 1.73E+06                            | 8.93E+06    | 1.90E+07                                   | 9.84E+07    |
| 2.  | BREAST  | 1.66E+06                            | 8.60E+06    | 1.84E+07                                   | 9.52E+07    |
| 3.  | R MAR   | 1.32E+06                            | 6.80E+06    | 1.46E+07                                   | 7.52E+07    |
| 4.  | LUNGS   | 1.32E+06                            | 6.80E+06    | 1.46E+07                                   | 7.53E+07    |
| 5.  | THYROID | 2.82E+07                            | 1.46E+08    | 8.71E+08                                   | 4.50E+09    |
| 6.  | ENDOST  | 1.58E+06                            | 8.17E+06    | 1.74E+07                                   | 9.01E+07    |
| 7.  | RMNDR   | 1.28E+06                            | 6.62E+06    | 1.44E+07                                   | 7.45E+07    |
|     | EFFEC   | 2.27E+06                            | 1.18E+07    | 4.20E+07                                   | 2.17E+08    |

Dari Tabel 1 diperoleh organ tubuh yang paling besar menerima dosis radiasi berdasarkan asumsi kecelakaan dengan 1 atau 5 bahan bakar reaktor

meleleh, adalah kelenjar tyroid. Dari Tabel 2 dosis yang diterima penduduk paling besar dari alur yang berasal permukaan tanah.

Tabel 2. Dosis equivalen efektif yang diterima berdasarkan alur pemaparan terhadap tubuh dengan asumsi 1 dan 5 bahan bakar meleleh.

| No. | Alur            | Selected Individual<br>(mrem/tahun) |             | Collective Population<br>(orang-rem/tahun) |             |
|-----|-----------------|-------------------------------------|-------------|--|-------------|
|     |                 | 1 bhn bakar                         | 5 bhn bakar | 1 bhn bakar                                | 5 bhn bakar |
| 1.  | ASUPAN          | 2.85E+05                            | 1.48E+06    | 2.00E+07                                   | 1.03E+08    |
| 2.  | HIRUPAN         | 5.23E+05                            | 2.70E+06    | 5.91E+06                                   | 3.05E+07    |
| 3.  | IMERSI UDARA    | 3.73E+03                            | 1.93E+04    | 4.21E+04                                   | 2.18E+05    |
| 4.  | PERMUKAAN TANAH | 4.60E+06                            | 7.56E+06    | 1.160E+07                                  | 8.29E+07    |
| 5.  | INTERNAL        | 8.08E+05                            | 4.18E+06    | 2.59E+07                                   | 1.34E+08    |
| 6.  | EKSTERNAL       | 1.47E+06                            | 7.58E+06    | 1.61E+07                                   | 8.31E+07    |
|     | TOTAL           | 2.27E+06                            | 1.18E+07    | 4.20E+07                                   | 2.17E+08    |

Hasil dari Tabel 1 dan Tabel 3 bersesuaian, yaitu nuklida yang paling berperan dalam penentuan dosis yang diterima adalah I-131. Unsur I-131 akan mempengaruhi dan menyerang kelenjar gondok atau tyroid.

Tabel 3. Dosis equivalen efektif yang diterima berdasarkan jenis nuklida terhadap pemaparan tubuh dengan asumsi 1 dan 5 bahan bakar meleleh.

| No. | Nuklida | Selected Individual<br>(mrem/tahun) |             | Collective Population<br>(orang-rem/tahun) |             |
|-----|---------|-------------------------------------|-------------|--|-------------|
|     |         | 1 bhn bakar                         | 5 bhn bakar | 1 bhn bakar                                | 5 bhn bakar |
| 1.  | KR-83M  | 6.96E-07                            | 3.54E-06    | 9.12E-06                                   | 4.64E-05    |
| 2.  | XE-131M | 3.04E-05                            | 1.59E-04    | 4.16E-04                                   | 2.18E-03    |
| 3.  | XE-133M | 1.41E-03                            | 5.99E-03    | 1.92E-02                                   | 8.17E-02    |
| 4.  | XE-135M | 3.25E-08                            | 1.60E-07    | 3.43E-07                                   | 1.69E-06    |
| 5.  | XE-138  | 2.13E-02                            | 1.05E-01    | 2.20E-01                                   | 1.08E+00    |
| 6.  | AR-41   | 1.18E-01                            | 1.30E+00    | 1.55E+00                                   | 1.71E+01    |
| 7.  | I-131   | 2.27E+06                            | 1.18E+07    | 4.20E+07                                   | 2.17E+08    |
| 8.  | I-132   | 2.19E-04                            | 9.91E-04    | 2.34E-03                                   | 1.06E-02    |
| 9.  | I-133   | 3.47E-05                            | 1.77E-04    | 3.92E-04                                   | 2.00E-03    |
| 10. | I-134   | 4.67E-08                            | 5.02E-07    | 4.81E-07                                   | 5.16E-06    |
| 11. | I-135   | 2.32E-05                            | 1.41E-04    | 2.53E-04                                   | 1.54E-03    |
| 12. | BR-82   | 5.07E-09                            | 2.65E-08    | 5.29E-08                                   | 2.77E-07    |
| 13. | NB-95   | 8.49E-09                            | 5.46E-08    | 9.28E-08                                   | 5.98E-07    |
| 14. | SR-89   | 3.63E-10                            | 2.19E-09    | 6.80E-09                                   | 4.10E-08    |
| 15. | SR-90   | 8.85E-11                            | 8.85E-10    | 2.24E-09                                   | 2.24E-08    |
| 16. | ZR-95   | 7.62E-09                            | 3.88E-08    | 7.72E-08                                   | 3.92E-07    |
| 17. | BA-140  | 2.72E-08                            | 1.25E-07    | 3.31E-07                                   | 1.52E-06    |
| 18. | CS-137  | 4.74E-08                            | 3.37E-07    | 1.86E-06                                   | 1.32E-05    |
| 19. | LA-140  | 1.80E-08                            | 2.00E-07    | 2.00E-07                                   | 2.23E-06    |
| 20. | SB-125  | 3.58E-10                            | 3.58E-09    | 3.47E-09                                   | 3.47E-08    |
| 21. | TE-132  | 4.05E-09                            | 4.05E-08    | 5.14E-08                                   | 5.14E-07    |
| 22. | CE-141  | 1.19E-09                            | 5.87E-08    | 1.44E-08                                   | 7.13E-07    |
| 23. | CE-144  | 2.38E-08                            | 2.38E-07    | 3.23E-07                                   | 3.23E-06    |
| 24. | C-14    | 4.78E-06                            | 4.78E-05    | 3.58E-04                                   | 3.58E-03    |
| 25. | H-3     | 6.02E-04                            | 3.01E-03    | 1.07E-02                                   | 5.33E-02    |
|     | TOTAL   | 2.27E+06                            | 1.18E+07    | 4.20E+07                                   | 2.17E+08    |

Tabel 4. Resiko kanker yang diterima berdasarkan alur pemaparan terhadap tubuh dengan asumsi 1 dan 5 bahan bakar meleleh.

| No. | Alur            | Selected Individual<br>Total lifetime fatal cancer risk |             | Total Collective Population<br>fatal cancer risk<br>(kematian/thn) |             |
|-----|-----------------|---|-------------|--|-------------|
|     |                 | 1 bhn bakar   | 5 bhn bakar | 1 bhn bakar  | 5 bhn bakar |
| 1.  | ASUPAN          | 1.50E+00  | 7.73E+00    | 1.48E+03   | 7.66E+03    |
| 2.  | HIRUPAN         | 2.94E+00  | 1.52E+01    | 4.70E+02   | 2.43E+03    |
| 3.  | IMERSI UDARA    | 9.32E-02  | 4.82E-01    | 1.49E+01   | 7.69E+01    |
| 4.  | PERMUKAAN TANAH | 3.65E+01  | 1.89E+02    | 5.66E+03   | 2.93E+04    |
| 5.  | INTERNAL        | 4.44E+00  | 2.29E+01    | 1.95E+03   | 1.01E+04    |
| 6.  | EKSTERNAL       | 3.66E+01  | 1.89E+02    | 5.68E+03   | 2.93E+04    |
|     | TOTAL           | 4.10E+01  | 2.12E+02    | 7.63E+03   | 3.94E+04    |

Resiko terbesar terkena kanker adalah dari pemaparan lewat alur permukaan tanah. Data terdapat pada Tabel 4. Hal yang sama terjadi pada resiko penyakit genetik akibat kecelakaan dengan

asumsi 1 atau 5 bahan bakar reaktor meleleh, pada Tabel 5. Resiko terbesar berasal dari alur pemaparan lewat permukaan tanah.

Tabel 5. Resiko penyakit genetik yang diterima berdasarkan alur pemaparan terhadap tubuh dengan asumsi 1 dan 5 bahan bakar meleleh.

| No. | Alur            | Resiko penyakit genetik<br>Orang rem/thn |             |
|-----|-----------------|--|-------------|
|     |                 | 1 bhn bakar                              | 5 bhn bakar |
| 1.  | ASUPAN          | 7.24E+04                                 | 3.74E+05    |
| 2.  | HIRUPAN         | 1.76E+04                                 | 9.11E+04    |
| 3.  | IMERSI UDARA    | 4.06E+04                                 | 2.10E+05    |
| 4.  | PERMUKAAN TANAH | 1.55E+07                                 | 8.01E+07    |
| 5.  | INTERNAL        | 9.00E+04                                 | 4.65E+05    |
| 6.  | EKSTERNAL       | 1.55E+07                                 | 8.03E+07    |
|     | TOTAL           | 1.56E+07                                 | 8.08E+07    |

Berdasarkan resiko pada semua jenis nuklida yang timbul dari kecelakaan, semua alur pemaparan ke manusia, keadaan angin dan cuaca, serta jumlah dan jenis konsumsi penduduk pada area dalam

radius 5 km dari RSG-GAS, diperoleh dosis efektif individu dan kolektif dengan variasi jarak radius dan arah angin (Tabel 6-12).

Tabel 6. Dosis efektif equivalen individu (mrem/thn) berdasarkan semua nuklida dan alur pemaparan terhadap tubuh dengan asumsi 1 bahan bakar meleleh.

| Arah | Jarak (meter) |         |         |         |         |
|------|---------------|---------|---------|---------|---------|
|      | 500           | 1500    | 2500    | 3500    | 4500    |
| N    | 2.3E+06       | 1.2E+06 | 8.8E+05 | 6.8E+05 | 5.5E+05 |
| NNW  | 8.8E+05       | 5.0E+05 | 4.0E+05 | 3.4E+05 | 3.1E+05 |
| NW   | 4.8E+05       | 3.4E+05 | 3.0E+05 | 2.7E+05 | 2.5E+05 |
| WNW  | 3.7E+05       | 3.1E+05 | 2.8E+05 | 2.6E+05 | 2.5E+05 |
| W    | 4.6E+05       | 3.7E+05 | 3.2E+05 | 2.9E+05 | 2.6E+05 |
| WSW  | 6.7E+05       | 4.4E+05 | 3.6E+05 | 3.1E+05 | 2.8E+05 |

Bersambung

Tabel 6. Lanjutan.

| Arah | Jarak (meter) |         |         |         |         |
|------|---------------|---------|---------|---------|---------|
|      | 500           | 1500    | 2500    | 3500    | 4500    |
| SW   | 8.2E+05       | 4.8E+05 | 3.8E+05 | 3.2E+05 | 2.9E+05 |
| SSW  | 6.2E+05       | 3.9E+05 | 3.2E+05 | 2.8E+05 | 2.6E+05 |
| S    | 9.7E+05       | 5.4E+05 | 4.1E+05 | 3.4E+05 | 3.0E+05 |
| SSE  | 8.2E+05       | 4.7E+05 | 3.7E+05 | 3.1E+05 | 2.8E+05 |
| SE   | 8.5E+05       | 4.8E+05 | 3.7E+05 | 3.2E+05 | 2.8E+05 |
| ESE  | 1.1E+06       | 5.7E+05 | 4.3E+05 | 3.5E+05 | 3.1E+05 |
| E    | 1.5E+06       | 7.2E+05 | 5.3E+05 | 4.2E+05 | 3.6E+05 |
| ENE  | 1.1E+06       | 5.7E+05 | 4.4E+05 | 3.7E+05 | 3.2E+05 |
| NE   | 1.0E+06       | 5.6E+05 | 4.4E+05 | 3.6E+05 | 3.2E+05 |
| NNE  | 1.2E+06       | 6.6E+05 | 5.1E+05 | 4.2E+05 | 3.6E+05 |

Tabel 7. Dosis efektif equivalen individu (mrem/thn) berdasarkan nuklida dan alur pemaparan terhadap tubuh dengan asumsi 5 bahan bakarmeoleh.

| Arah | Jarak (meter) |         |         |         |         |
|------|---------------|---------|---------|---------|---------|
|      | 500           | 1500    | 2500    | 3500    | 4500    |
| N    | 1.2E+07       | 6.2E+06 | 4.6E+06 | 3.5E+06 | 2.8E+06 |
| NNW  | 4.5E+06       | 2.6E+06 | 2.1E+06 | 1.8E+06 | 1.6E+06 |
| NW   | 2.5E+06       | 1.8E+06 | 1.5E+06 | 1.4E+06 | 1.3E+06 |
| WNW  | 1.9E+06       | 1.6E+06 | 1.5E+06 | 1.4E+06 | 1.3E+06 |
| W    | 2.4E+06       | 1.9E+06 | 1.7E+06 | 1.5E+06 | 1.4E+06 |
| WSW  | 3.4E+06       | 2.3E+06 | 1.9E+06 | 1.6E+06 | 1.4E+06 |
| SW   | 4.2E+06       | 2.5E+06 | 2.0E+06 | 1.7E+06 | 1.5E+06 |
| SSW  | 3.2E+06       | 2.0E+06 | 1.7E+06 | 1.5E+06 | 1.4E+06 |
| S    | 5.0E+06       | 2.8E+06 | 2.1E+06 | 1.8E+06 | 1.5E+06 |
| SSE  | 4.2E+06       | 2.4E+06 | 1.9E+06 | 1.6E+06 | 1.5E+06 |
| SE   | 4.4E+06       | 2.5E+06 | 1.9E+06 | 1.6E+06 | 1.5E+06 |
| ESE  | 5.8E+06       | 2.9E+06 | 2.2E+06 | 1.8E+06 | 1.6E+06 |
| E    | 7.8E+06       | 3.7E+06 | 2.8E+06 | 2.2E+06 | 1.9E+06 |
| ENE  | 5.4E+06       | 2.9E+06 | 2.3E+06 | 1.9E+06 | 1.7E+06 |
| NE   | 5.2E+06       | 2.9E+06 | 2.3E+06 | 1.9E+06 | 1.6E+06 |
| NNE  | 6.4E+06       | 3.4E+06 | 2.6E+06 | 2.1E+06 | 1.8E+06 |

Dengan asumsi kecelakaan 1 bahan bakar meoleh diperoleh hasil perhitungan bahwa dosis individu terbesar akan diterima penduduk yang berdomisili dalam radius 500 m dari RSG-GAS ke arah Utara (N: North) sebesar  $2.3E+06$  mrem/thn. Dosis individu terendah diterima penduduk yang berdomisili dalam radius 4500 m ke arah Barat Daya (NW: North West) dan ke arah Barat dari Barat daya (WNW: West North West) sebesar  $2.5E+05$  mrem/thn (Tabel 6).

Dengan asumsi kecelakaan 5 bahan bakar meoleh diperoleh dosis individu terbesar akan diterima penduduk yang berdomisili dalam radius 500 m dari RSG-GAS ke arah Utara (N: North) sebesar  $1.2E+07$  mrem/thn. Dosis individu terendah diterima penduduk yang berdomisili dalam radius 4500 m ke arah Barat Daya (NW: North West) dan ke arah Barat dari Barat daya (WNW: West North West) sebesar  $1.3E+06$  mrem/thn (Tabel 7)

Tabel 8. Dosis efektif equivalen kolektif (orang rem/thn) berdasarkan semua nuklida dan alur pemaparan terhadap tubuh dengan asumsi 1 bahan bakarmeoleh.

| Arah | Jarak (meter) |         |         |         |         |
|------|---------------|---------|---------|---------|---------|
|      | 500           | 1500    | 2500    | 3500    | 4500    |
| N    | 2.3E+05       | 5.4E+06 | 8.8E+04 | 6.8E+04 | 5.5E+04 |
| NNW  | 8.8E+04       | 5.0E+04 | 4.0E+04 | 3.4E+04 | 3.1E+04 |
| NW   | 4.8E+04       | 3.4E+04 | 3.0E+04 | 2.7E+04 | 1.8E+06 |
| WNW  | 3.7E+04       | 3.1E+04 | 2.8E+04 | 2.6E+04 | 2.5E+04 |
| W    | 4.6E+04       | 3.7E+04 | 3.2E+04 | 2.9E+04 | 2.6E+04 |
| WSW  | 6.7E+04       | 4.4E+04 | 3.3E+06 | 3.1E+04 | 2.8E+04 |
| SW   | 8.2E+04       | 4.8E+04 | 3.8E+04 | 3.2E+04 | 2.9E+04 |
| SSW  | 6.2E+04       | 3.9E+04 | 3.2E+04 | 2.8E+04 | 2.6E+04 |
| S    | 9.7E+04       | 5.4E+04 | 4.1E+04 | 3.4E+04 | 3.0E+04 |
| SSE  | 8.2E+04       | 4.7E+04 | 2.7E+06 | 1.6E+06 | 2.8E+04 |
| SE   | 8.5E+04       | 4.8E+04 | 3.7E+04 | 3.2E+04 | 2.8E+04 |
| ESE  | 1.1E+05       | 5.7E+04 | 4.3E+04 | 3.5E+04 | 3.1E+04 |
| E    | 1.5E+05       | 5.0E+06 | 5.3E+04 | 4.2E+04 | 3.2E+04 |
| ENE  | 1.1E+05       | 5.7E+04 | 4.4E+04 | 2.3E+06 | 3.2E+04 |
| NE   | 1.0E+05       | 5.6E+06 | 4.4E+04 | 3.6E+04 | 4.4E+06 |
| NNE  | 1.2E+05       | 6.6E+04 | 6.3E+06 | 4.2E+04 | 3.6E+04 |

Tabel 8 dan 9 memuat hasil perhitungan untuk dosis equivalen efektif kolektif. Dosis kolektif yang diterima penduduk selain tergantung pada dosis yang diterima, juga tergantung tingkat kerapatan penduduk per luas area. Berdasarkan asumsi kecelakaan 1 bahan bakar meleleh maka dosis kolektif terbesar diterima area dalam radius 2500 m ke arah Utara Timur Laut (NNE: North North East) sebesar 6.3E+06 orang rem/thn. Dosis kolektif terkecil pada area ke arah Barat daya (WNW: West North West) dalam radius

4500 m dari RSG-GAS sebesar 2.5E+04 orang rem/thn (Tabel 8). Sedangkan pada Tabel 9 menerangkan dosis kolektif dengan asumsi 5 bahan bakar meleleh adalah pada area dalam radius 2500 m ke arah Utara Timur Laut (NNE: North North East) sebesar 3.2E+07 orang rem/thn. Dosis kolektif terkecil pada area ke arah Barat dari Barat daya (WNW: West North West) dalam radius 4500 m dari RSG-GAS sebesar 1.3E+05 orang rem/thn

Tabel 9. Dosis efektif equivalen kolektif (orang rem/thn) berdasarkan nuklida dan alur pemaparan terhadap tubuh dengan asumsi 5 bahan bakar meleleh.

| Arah | Jarak (meter) |         |         |         |         |
|------|---------------|---------|---------|---------|---------|
|      | 500           | 1500    | 2500    | 3500    | 4500    |
| N    | 1.2E+06       | 2.8E+07 | 4.6E+05 | 3.5E+05 | 2.8E+05 |
| NNW  | 4.5E+05       | 2.6E+05 | 2.1E+05 | 1.8E+05 | 1.6E+05 |
| NW   | 2.5E+05       | 1.8E+05 | 1.5E+05 | 1.4E+05 | 9.2E+06 |
| WNW  | 1.9E+05       | 1.6E+05 | 1.5E+05 | 1.4E+05 | 1.3E+05 |
| W    | 2.4E+05       | 1.9E+05 | 1.7E+05 | 1.5E+05 | 1.4E+05 |
| WSW  | 3.4E+05       | 2.3E+05 | 1.7E+07 | 1.6E+05 | 1.4E+05 |
| SW   | 4.2E+05       | 2.5E+05 | 2.0E+05 | 1.7E+05 | 1.5E+05 |
| SSW  | 3.2E+05       | 2.0E+05 | 1.7E+05 | 1.5E+05 | 1.4E+05 |
| S    | 5.0E+05       | 2.8E+05 | 2.1E+05 | 1.8E+05 | 1.5E+05 |
| SSE  | 4.2E+05       | 2.4E+05 | 1.4E+07 | 8.1E+06 | 1.5E+05 |
| SE   | 4.4E+05       | 2.5E+05 | 1.9E+05 | 1.6E+05 | 1.5E+05 |

Bersambung

Tabel 9. lanjutan

| Arah | Jarak (meter) |         |         |         |         |
|------|---------------|---------|---------|---------|---------|
|      | 500           | 1500    | 2500    | 3500    | 4500    |
| ESE  | 5.8E+05       | 2.9E+05 | 2.2E+05 | 1.8E+05 | 1.6E+05 |
| E    | 7.8E+05       | 2.6E+07 | 2.8E+05 | 2.2E+05 | 1.7E+05 |
| ENE  | 5.4E+05       | 2.9E+05 | 2.3E+05 | 1.2E+07 | 1.7E+05 |
| NE   | 5.2E+05       | 2.9E+07 | 2.3E+05 | 1.9E+05 | 2.3E+07 |
| NNE  | 6.4E+05       | 3.4E+05 | 3.2E+07 | 2.1E+05 | 1.8E+05 |

Pada Tabel 10 menerangkan tentang hasil perhitungan untuk dosis kolektif secara genetik untuk asumsi kecelakaan 1 bahan bakar meleleh. Dosis terbesar pada area dalam radius 1500 m ke

arah Utara sebesar  $9.2E+07$  orang rem. Dosis terendah pada area dalam radius 4500 m ke arah Barat dari Barat Daya (WNW: West North West) sebesar  $6.8E+04$  orang rem.

Tabel 10. Dosis equivalent kolektif secara genetik (orang rem) berdasarkan nuklida dan alur pemaparan terhadap tubuh dengan asumsi 1 bahan bakar meleleh.

| Arah | Jarak (meter) |         |         |         |         |
|------|---------------|---------|---------|---------|---------|
|      | 500           | 1500    | 2500    | 3500    | 4500    |
| N    | 4.3E+06       | 9.2E+07 | 1.4E+06 | 9.7E+05 | 6.8E+05 |
| NNW  | 1.4E+06       | 5.8E+05 | 3.9E+05 | 2.7E+05 | 1.9E+05 |
| NW   | 5.6E+05       | 2.6E+05 | 1.7E+05 | 1.2E+05 | 5.8E+06 |
| WNW  | 3.2E+05       | 2.1E+05 | 1.4E+05 | 9.8E+04 | 6.8E+04 |
| W    | 5.2E+05       | 3.3E+05 | 2.2E+05 | 1.5E+05 | 1.0E+05 |
| WSW  | 9.3E+05       | 4.6E+05 | 2.7E+07 | 2.0E+05 | 1.4E+05 |
| SW   | 1.2E+06       | 5.4E+05 | 3.5E+05 | 2.2E+05 | 1.5E+05 |
| SSW  | 8.2E+05       | 3.6E+05 | 2.2E+05 | 1.4E+05 | 1.0E+05 |
| S    | 1.6E+06       | 6.7E+05 | 4.1E+05 | 2.6E+05 | 1.7E+05 |
| SSE  | 1.2E+06       | 5.3E+05 | 2.3E+07 | 1.0E+07 | 1.4E+05 |
| SE   | 1.3E+06       | 5.4E+05 | 3.3E+05 | 2.1E+05 | 1.4E+05 |
| ESE  | 1.9E+06       | 7.2E+05 | 4.5E+05 | 2.9E+05 | 2.0E+05 |
| E    | 2.7E+06       | 7.2E+07 | 6.6E+05 | 4.3E+05 | 2.6E+05 |
| ENE  | 1.7E+06       | 7.3E+05 | 4.7E+05 | 2.0E+07 | 2.2E+05 |
| NE   | 1.6E+06       | 7.2E+07 | 4.7E+05 | 3.1E+05 | 3.0E+07 |
| NNE  | 2.1E+06       | 9.2E+05 | 7.4E+07 | 4.1E+05 | 2.9E+05 |

Tabel 11. Dosis equivalen kolektif secara genetik (orang rem) berdasarkan nuklida dan alur pemaparan terhadap tubuh dengan asumsi 5 bahan bakar meleleh.

| Arah | Jarak (meter) |         |         |         |         |
|------|---------------|---------|---------|---------|---------|
|      | 500           | 1500    | 2500    | 3500    | 4500    |
| N    | 2.2E+07       | 4.8E+08 | 7.1E+06 | 5.0E+06 | 3.5E+06 |
| NNW  | 7.1E+06       | 3.0E+06 | 2.0E+06 | 1.4E+06 | 9.8E+05 |
| NW   | 2.9E+06       | 1.3E+06 | 8.8E+05 | 6.1E+05 | 3.0E+07 |
| WNW  | 1.7E+06       | 1.1E+06 | 7.3E+05 | 5.1E+05 | 3.5E+05 |
| W    | 2.7E+06       | 1.7E+06 | 1.2E+06 | 7.8E+05 | 5.4E+05 |
| WSW  | 4.8E+06       | 2.4E+06 | 1.4E+08 | 1.0E+06 | 7.0E+05 |
| SW   | 6.5E+06       | 2.8E+06 | 1.8E+06 | 1.2E+06 | 8.0E+05 |

Bersambung



Tabel 11. Lanjutan

| Arah | Jarak (meter) |         |         |         |         |
|------|---------------|---------|---------|---------|---------|
|      | 500           | 1500    | 2500    | 3500    | 4500    |
| SSW  | 4.3E+06       | 1.8E+06 | 1.2E+06 | 7.5E+05 | 5.2E+05 |
| S    | 8.0E+06       | 3.5E+06 | 2.1E+06 | 1.3E+06 | 9.0E+05 |
| SSE  | 6.4E+06       | 2.7E+06 | 1.2E+08 | 5.2E+07 | 7.1E+05 |
| SE   | 6.7E+06       | 2.8E+06 | 1.7E+06 | 1.1E+06 | 7.3E+05 |
| ESE  | 9.6E+06       | 3.7E+06 | 2.3E+06 | 1.5E+06 | 1.0E+06 |
| E    | 1.4E+07       | 3.7E+08 | 3.4E+06 | 2.2E+06 | 1.4E+06 |
| ENE  | 8.9E+06       | 3.8E+06 | 2.4E+06 | 1.0E+08 | 1.1E+06 |
| NE   | 8.5E+06       | 3.7E+08 | 2.4E+06 | 1.6E+06 | 1.5E+08 |
| NNE  | 1.1E+07       | 4.7E+06 | 3.8E+08 | 2.1E+06 | 1.5E+06 |

Tabel 12. Kemungkinan terkena kanker kolektif rata-rata (kematian/thn) berdasarkan semua nuklida dan alur paparan terhadap tubuh dengan asumsi 1 bahan bakar meleleh.

| Arah | Jarak (meter) |         |         |         |         |
|------|---------------|---------|---------|---------|---------|
|      | 500           | 1500    | 2500    | 3500    | 4500    |
| N    | 5.8E+01       | 1.3E+03 | 2.0E+01 | 1.4E+01 | 1.1E+01 |
| NNW  | 2.0E+01       | 9.3E+00 | 6.7E+00 | 5.1E+00 | 4.1E+00 |
| NW   | 8.9E+00       | 5.0E+00 | 3.8E+00 | 3.1E+00 | 1.9E+02 |
| WNW  | 5.8E+00       | 4.3E+00 | 3.4E+00 | 2.9E+00 | 2.5E+00 |
| W    | 8.4E+00       | 5.9E+00 | 4.5E+00 | 3.6E+00 | 2.9E+00 |
| WSW  | 1.4E+01       | 7.7E+00 | 5.1E+02 | 4.2E+00 | 3.4E+00 |
| SW   | 1.8E+01       | 8.8E+00 | 6.2E+00 | 4.5E+00 | 3.6E+00 |
| SSW  | 1.3E+01       | 6.3E+00 | 4.5E+00 | 3.5E+00 | 2.9E+00 |
| S    | 2.2E+01       | 1.1E+01 | 7.0E+00 | 5.0E+00 | 3.9E+00 |
| SSE  | 1.8E+01       | 8.6E+00 | 4.2E+02 | 2.1E+02 | 3.4E+00 |
| SE   | 1.9E+01       | 8.8E+00 | 5.9E+00 | 4.3E+00 | 3.4E+00 |
| ESE  | 2.6E+01       | 1.1E+01 | 7.5E+00 | 5.4E+00 | 4.2E+00 |
| E    | 3.7E+01       | 1.1E+03 | 1.0E+01 | 7.2E+00 | 4.9E+00 |
| ENE  | 2.4E+01       | 1.1E+01 | 7.8E+00 | 3.6E+02 | 4.4E+00 |
| NE   | 2.3E+01       | 1.1E+03 | 7.7E+00 | 5.7E+00 | 6.1E+02 |
| NNE  | 2.9E+01       | 1.4E+01 | 1.2E+03 | 7.0E+00 | 5.4E+00 |

Tabel 13. Kemungkinan terkena kanker kolektif (kematian/thn) berdasarkan semua nuklida dan alur paparan terhadap tubuh dengan asumsi 5 bahan bakarmeleleh.

| Arah | Jarak (meter) |         |         |         |         |
|------|---------------|---------|---------|---------|---------|
|      | 500           | 1500    | 2500    | 3500    | 4500    |
| N    | 3.0E+02       | 6.7E+03 | 1.0E+02 | 7.4E+01 | 5.5E+01 |
| NNW  | 1.0E+02       | 4.8E+01 | 3.5E+01 | 2.6E+01 | 2.1E+01 |
| NW   | 4.6E+01       | 2.6E+01 | 2.0E+01 | 1.6E+01 | 9.7E+02 |
| WNW  | 3.0E+01       | 2.2E+01 | 1.8E+01 | 1.5E+01 | 1.3E+01 |
| W    | 4.4E+01       | 3.1E+01 | 2.3E+01 | 1.8E+01 | 1.5E+01 |
| WSW  | 7.2E+01       | 4.0E+01 | 2.6E+03 | 2.2E+01 | 1.7E+01 |

Bersambung

Tabel 13. Lanjutan

| Arah | Jarak (meter) |         |         |         |         |
|------|---------------|---------|---------|---------|---------|
|      | 500           | 1500    | 2500    | 3500    | 4500    |
| SW   | 9.4E+01       | 4.5E+01 | 3.2E+01 | 2.3E+01 | 1.9E+01 |
| SSW  | 6.5E+01       | 3.3E+01 | 2.4E+01 | 1.8E+01 | 1.5E+01 |
| S    | 1.1E+02       | 5.4E+01 | 3.6E+01 | 2.6E+01 | 2.0E+01 |
| SSE  | 9.3E+01       | 4.5E+01 | 2.2E+03 | 1.1E+03 | 1.7E+01 |
| SE   | 9.8E+01       | 4.5E+01 | 3.0E+01 | 2.2E+01 | 1.8E+01 |
| ESE  | 1.4E+02       | 5.8E+01 | 3.9E+01 | 2.8E+01 | 2.2E+01 |
| E    | 1.9E+02       | 5.5E+03 | 5.3E+01 | 3.7E+01 | 2.5E+01 |
| ENE  | 1.3E+02       | 5.8E+01 | 4.0E+01 | 1.9E+03 | 2.3E+01 |
| NE   | 1.2E+02       | 5.7E+03 | 4.0E+01 | 2.9E+01 | 3.2E+03 |
| NNE  | 1.5E+02       | 7.1E+01 | 6.1E+03 | 3.6E+01 | 2.8E+01 |

Dengan asumsi 5 bahan bakar meleleh maka dosis kolektif secara genetik diperoleh dosis terbesar pada area dalam radius 1500 m ke arah Utara sebesar  $4.8E+08$  orang rem. Dosis terendah pada area dalam radius 4500 m ke arah Barat dari Barat Daya (WNW: West North West) sebesar  $3.5E+05$  orang rem (Tabel 11).

Tabel 12 dan 13 menerangkan tentang hasil perhitungan kemungkinan terkena kanker kolektif rata-rata (kematian/thn) berdasarkan semua nuklida dan alur pemaparan terhadap tubuh dengan asumsi 1 dan 5 bahan bakar meleleh.

#### KESIMPULAN DAN SARAN

Analisis sebaran radiasi yang keluar ke lingkungan dari pengoperasian RSG-GAS, dengan asumsi kecelakaan yang mengakibatkan 1 buah bahan bakar dan 5 buah bahan bakar meleleh sampai radius 5 km dari RSG-GAS dapat menggunakan paket program CAP88-PC. Hasil perhitungan menggunakan paket program ini dapat digunakan untuk bahan pembuatan SAR-RSG GAS, dokumen kedaruratan, dan penanggulangan kedaruratan nuklir. Supaya mendapatkan hasil yang representatif perlu dilakukan perhitungan uji silang menggunakan paket program sejenis seperti paket program PC-COSYMA dan PC-CREAM.

#### DAFTAR ACUAN

- 1). WIRYOSIMIN, S. 1995. Mengenal Asas Proteksi Radiasi. Penerbit ITB Bandung
- 2). ANONIM, 1975. Atmospheric Dispersion. World Meteorological Organization, Technical Regulation, WMO, Geneva.
- 3). PARKS, B. 1997. Input-Output Samples. CAP88-PC Version 2.0. US. Department of Energy ER-8/GTN 19901 Germantown, Maryland
- 4). PARKS, B. 1997. Sources Codes (Fortran). CAP88-PC Version 2.0. US. Department of Energy ER-8/GTN 19901 Germantown, Maryland
- 5). PARKS, B. 1997.. Mathematical Models. CAP88-PC Version 2.0. US. Department of Energy ER-8/GTN 19901 Germantown, Maryland