

**PENENTUAN DAERAH SAFETY PERIMETER DENGAN SOFTWARE HOTSPOT
VERSI 3.0.3 PADA KECELAKAAN REAKTOR RSG-GAS
PADA DAYA 5 MW , 10 MW dan 15 MW**

**DETERMINATION OF SAFETY PERIMETER AREA WITH SOFTWARE HOTSPOT
VERSION 3.0.3 ON RSG-GAS REACTOR CRASH AT 5 MW, 10 MW AND 15 MW**

Suhartono¹, Subiharto²

^{1,2}PRSG-BATAN Kawasan Puspipstek Gd. 30 Serpong, 15310

E-mail: hartono_s@batan.go.id

Diterima: 28 Maret 2018, diperbaiki : 20 April 2018, disetujui : 23 April 2018

ABSTRAK

PENENTUAN DAERAH SAFETY PERIMETER DENGAN SOFTWARE HOTSPOT VERSI 3.0.3 PADA KECELAKAAN REAKTOR RSG-GAS PADA DAYA 5 MW , 10 MW DAN 15 MW. Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy (RSG-GAS) merupakan reaktor riset di Indonesia dengan daya maksimum yang dibangkitkan sebesar 30 MW. Reaktor dioperasikan untuk melayani pengguna yang akan memanfaatkan neutron yang dihasilkan dari reaksi fisi di teras reaktor. Dalam mengoperasikan reaktor dilakukan sesuai dengan ketentuan keselamatan yang berlaku dari IAEA maupun BAPETEN. Pada kondisi kecelakaan reaktor yang mengakibatkan terlepasnya zat radioaktif kelingkungan sudah dipersiapkan program kesiapsiagaan dan tanggap darurat nukir tingkat fasilitas RSG-GAS. Langkah antisipasi dari ancaman bahaya radiasi bagi personil, penduduk disekitar dan petugas penanggulangan kedaruratan nuklir RSG-GAS dilakukan dengan langkah secepat mungkin menentukan daerah safety perimeter pada saat terjadi kedaruratan. Untuk itu dilakukan penentuan daerah safety perimeter dengan menggunakan perangkat lunak HotSpot Versi 3.0.3 pada saat terjadi lepasan zat radioaktif ke lingkungan. Menurut peraturan IAEA bahwa daerah safety perimeter adalah laju dosis di sekitar fasilitas yang mengalami kecelakaan dengan nilai terukur 100 μ Sv/jam. Dengan menggunakan perangkat lunak HotSpot Versi 3.0.3 daerah safety perimeter secara cepat akan dapat diketahui sehingga petugas penanggulangan kedaruratan tidak perlu melakukan mengukur langsung. Dari hasil simulasi dengan menggunakan perangkat lunak Hotspot Versi 3.0.3 diperoleh bahwa daerah safety perimeter pada saat terjadi kecelakaan di RSG-GAS pada daya reaktor 5, 10 dan 15 MW adalah jarak radius antara 200-1000 m dari RSG-GAS.

Kata kunci : Hotspot, safety perimeter, kedaruratan nuklir, reaktor

ABSTRACT

DETERMINATION OF SAFETY PERIMETER AREA WITH SOFTWARE HOTSPOT VERSION 3.0.3 ON RSG-GAS REACTOR CRASH AT 5 MW, 10 MW AND 15 MW. Multipurpose Reactor G.A. Siwabessy (RSG-GAS) is a research reactor in Indonesia with a maximum power generated of 30 MW. The reactor is operated to serve users who will utilize the neutrons generated from the fission reactions in the reactor core. In operating the reactor is carried out in accordance with the applicable safety requirements of the IAEA and BAPETEN. In conditions of reactor accidents which resulted in the release of radioactive substances have been prepared environment preparedness program and emergency response nuclear level RSG-GAS facility. Anticipatory measures from radiation hazards to personnel, surrounding residents and RSG-GAS emergency countermeasures are conducted as soon as possible to determine the perimeter safety area in the event of an emergency. For that purpose, the determination of the perimeter safety area using HotSpot Version 3.0.3 software in the event of release of radioactive substances into the environment. According to the IAEA regulations that the

perimeter safety area is the dose rate in the vicinity of an accident facility with a measured value of 100 $\mu\text{Sv} / \text{h}$. By using Hot Spot Version 3.0.3 software the perimeter safety area will quickly be known so that emergency countermeasures do not need to perform direct measurements. From the simulation result using Hotspot Version 3.0.3 software, it is found that perimeter safety area at the time of accident at RSG-GAS at 5, 10 and 15 MW reactor power is radius distance between 200-1000 m from RSG-GAS.

Keywords: Hotspot, safety perimeter, nuclear emergency, reactor

PENDAHULUAN

Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy (RSG-GAS) merupakan salah satu reaktor riset yang dimiliki Indonesia dengan daya nominal sebesar 30 MW. Sesuai dengan Perka Bapeten No.1 Tahun 2010 tentang kesiapsiagaan dan penanggulangan kedaruratan nuklir dinyatakan bahwa RSG-GAS masuk kategori bahaya radiologi II^[1]. Bila terjadi kedaruratan nuklir di RSG-GAS maka langkah penanggulangan kedaruratan nuklir sesuai dengan Perka Bapeten No.1 Tahun 2010 dilakukan untuk memberikan jaminan keselamatan kepada manusia dan lingkungan. Langkah utama untuk menjamin keselamatan manusia adalah menghindari paparan radiasi berlebih^[2]. Dalam melakukan pengendalian paparan radiasi pada saat terjadi kedaruratan nuklir di RSG-GAS diperlukan penentuan daerah *safety perimeter*. Sesuai dengan buku panduan IAEA maka yang dimaksud dengan daerah *safety perimeter* adalah daerah dengan laju dosis 100 $\mu\text{Sv}/\text{jam}$ ^[3]. Daerah tersebut merupakan batas bagi tim tanggap darurat nuklir untuk melakukan tindakan penanggulangan. Untuk mengetahui besar laju dosis 100 $\mu\text{Sv}/\text{jam}$ maka dilakukan pengukuran langsung oleh petugas penanggulangan kedaruratan nuklir. Tindakan ini membutuhkan waktu dan jumlah personil yang banyak. Permasalahan yang terjadi adalah pengukuran langsung akan memberikan dosis paparan radiasi yang lebih besar kepada petugas penanggulangan yang melakukan pengukuran walaupun pengun-

kuran secara langsung belum pernah dilakukan karena belum pernah terjadi keadaan darurat yang sesungguhnya. Untuk menghindari masalah tersebut dapat dilakukan dengan melakukan simulasi dengan menggunakan perangkat lunak HotSpot Versi 3.0.3.

Tujuan dari simulasi ini adalah untuk mengetahui berapa jarak daerah *safety perimeter* dari RSG-GAS. Sehingga dengan simulasi ini memberikan manfaat bagi petugas penanggulangan kedaruratan nuklir yang melakukan penanggulangan dapat terhindar dari paparan radiasi yang maksimal. Metode yang dilakukan pada makalah ini adalah menggunakan perangkat lunak dengan memasukkan data meteorologi di sekitar RSG-GAS, *source term* yang keluar dari cerobong, tinggi cerobong, diameter cerobong, laju alir udara dari dalam cerobong, temperatur udara di dalam cerobong dan temperatur udara di luar cerobong. *Source term* pada makalah ini dikhususkan untuk nuklida I-131 merupakan produk fisi yang keluar reaktor RSG-GAS bila terjadi kegagalan kelongsong bahan bakar. Iodine 131 merupakan nuklida yang menyebabkan penyakit kanker apabila terhirup melalui jalur pernafasan manusia. Simulasi dilakukan pada reaktor dengan operasi daya 5 MW, 10 MW dan 15 MW. Penetapan 3 variasi daya karena reaktor sering dioperasikan pada variasi 3 daya tersebut. Langkah penentuan daerah *safety perimeter* dapat juga dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak PC COSYMA. Perhitungan dengan akurasi tinggi tetapi dengan masukan

yang cukup rumit. Sedangkan perhitungan dengan menggunakan perangkat lunak HotSpot Versi 3.0.3 masukan lebih *simple* dan mudah sangat cocok digunakan apabila dalam kondisi kedaruratan yang membutuhkan kecepatan informasi. Waktu yang digunakan untuk melakukan perhitungan untuk menentukan daerah *safety perimeter* lebih cepat bila dibandingkan dengan mengukur langsung di sekitar reaktor bila terjadi kedaruratan nuklir.

METODE

Pada kondisi terjadi kedaruratan nuklir di RSG-GAS langkah pertama yang harus dilakukan adalah menyelamatkan pekerja yang berada di instalasi dan lingkungan reaktor. Langkah kedua adalah menentukan daerah *safety perimeter* yang berada di sekitar RSG-GAS. Daerah *safety perimeter* merupakan daerah di sekitar reaktor bila diukur dengan survey meter menunjukkan nilai paparan 100 $\mu\text{Sv}/\text{jam}$. Sesuai dengan program kesiapsiagaan nuklir yang berlaku di RSG-GAS maka pada daerah tersebut adalah daerah yang di kendalikan oleh petugas proteksi radiasi dan menggunakan Alat Pelindung Diri (APD) yang sesuai. Cara menentukan daerah *safety perimeter* yaitu petugas penanggulangan kedaruratan melakukan pengukuran langsung paparan radasi disekitar reaktor pada saat terjadi kedaruratan hingga alat ukur radiasi menunjukkan nilai paparan 100 $\mu\text{Sv}/\text{jam}$. Dengan wilayah yang cukup luas di sekitar RSG-GAS pengukuran langsung membutuhkan waktu lama dan petugas kedaruratan yang melakukan pengukuran akan mendapatkan dosis yang lebih besar. Solusi untuk menghindari terkena dosis berlebih maka diperlukan penentuan daerah *safety perimeter* tanpa melakukan pengukuran secara langsung. Langkah yang dilakukan adalah dengan melakukan simulasi

menggunakan perangkat lunak HotSpot Versi 3.0.3. Perhitungan dosis pada daerah *safety perimeter* dalam kondisi reaktor beroperasi 30 MW dengan *source term* seluruh hasil fisis dengan simulasi terjadi kecelakaan *Beyond Design Basic Accident* (BDBA) telah dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak yang sama pada kondisi kedaruratan tingkat KNS^[4].

Data yang diperlukan sebagai input perangkat lunak HotSpot Versi 3.0.3 adalah sebagai berikut :

- Data Meteorologi terbaru di sekitar RSG-GAS menggunakan data rona lingkungan yang dikeluarkan oleh BMKG (Kecepatan dan arah angin, stabilitas udara)^[5] dari pengelola Kawasan Nuklir Serpong (KNS)
- Data spesifikasi dimensi cerobong (tinggi cerobong, diameter cerobong) Aktivitas I-131 pada operasi daya reaktor 5 MW, 10 MW dan 15 MW (simulasi dengan perangkat lunak Origen 2). Perangkat lunak Origen 2 digunakan untuk mengetahui besarnya aktivitas nuklida yang berada di teras reaktor pada saat terjadi kedaruratan. Data aktivitas nuklida diambil pada kondisi reaktor beroperasi selama 4 hari disimulasikan dengan perangkat lunak Origen 2.
- Data laju alir udara dalam cerobong, temperatur udara luar dan temperatur udara di dalam cerobong^[6].

Bila terjadi lepasan zat radioaktif dari cerobong reaktor maka penyebaran gas atau partikel radionuklida yang terlepas ke atmosfer dipengaruhi oleh arah dan kecepatan angin. Atmosfer umumnya mengalami turbulensi, dan material yang terlepas mengalami difusi selama penyebaran. Konsentrasi radionuklida di atmosfer dihitung dengan persamaan *Gaussian model*^[7] persamaan tersebut digunakan dalam perangkat lunak HotSpot Versi 3.0.3 seperti ditunjukkan pada persamaan 1.

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \exp\left[-\frac{\lambda x}{u}\right] \dots\dots\dots(1)$$

x = jarak *downwind* (m)
 y = jarak *crosswind* (m)
 z = ketinggian sumbu vertikal (m)
 u = kecepatan angin rata-rata pada ketinggian lepasan (m/detik)
 L = ketinggian lapisan inversi (m)

Langkah simulasi dengan menggunakan HotSpot Versi 3.0.3 sebagai berikut :

Menyiapkan parameter masukan perangkat lunak HotSpot Versi 3.0.3. Parameter yang di butuhkan seperti pada Tabel 1.

dimana:

C = konsentrasi radionuklida di atmosfer pada koordinat (x,y,z), Ci/m³

Q = *Source term* (Ci)= Aktivitas (hasil *running* Origen 2)

λ = tetapan peluruhan (s)

H = tinggi pelepasan efektif (m)

Tabel 1. Parameter input data perangkat lunak HotSpot Versi 3.0.3

No	Parameter	Input data
1.	Aktivitas radio nuklida I-131 di teras pada daya rendah 5 MW, 10 MW dan 15 MW reaktor operasi 4 hari (simulasi dengan perangkat lunak Origen 2)	1,696E ⁺⁰⁵ Curie 3,401E ⁺⁰⁵ Curie 5,063E ⁺⁰⁵ Curie
2.	Tinggi cerobong	56 m
3.	Diameter cerobong	1,5 m
4.	Laju alir udara	3,4 m/detik
5.	Temperatur udara luar	29 ^o C
6.	Temperatur udara dari cerobong	29 ^o C
7.	Jarak pengukuran yang diinginkan (Kilometer)	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9. 1, 2, 3, 4, 5
7.	Kecepatan angin	1-5 m/detik
8.	Arah angin dominan	Timur
9.	Stabilitas udara	D (<i>Neutral</i>)

Parameter kecepatan , arah dan stabilitas udara di dapatkan dari data PPIKSN-BATAN berupa Pemutahiran Data Rona Lingkungan di KNS. Parameter aktivitas radio nuklida Iodine 131 pada daya 5 MW, 10 MW dan 15

MW didapatkan dengan melakukan simulasi dengan perangkat lunak Origen 2. Hasil simulasi Origen 2^[8] untuk variasi 3 daya reaktor terlihat pada Gambar 1.

*RSG-GAS DIOPERASIKAN DENGAN DAYA 15 MW

POWER= 1.50000E+01 MW, BURNUP= 6.60000E+02 MWD, FLUX= 2.82E+13 N/CM**2-SEC

7 SUMMARY TABLE: RADIOACTIVITY, CURIES

OPERASI SELAMA 44 HARI

44.0D

	1.0HR	2.0HR	3.0HR	6.0HR	12.0HR	1.0D	1.5D	2.0D	3.0D	4.0D	5.0D	
GE	6.902E+04	1.664E+03	1.140E+03	8.090E+02	3.708E+02	1.789E+02	8.178E+01	3.904E+01	1.867E+01	4.282E+00	9.822E-01	2.254E-01
AS	2.195E+05	2.902E+03	2.502E+03	2.149E+03	1.390E+03	9.053E+02	7.151E+02	5.878E+02	4.786E+02	3.157E+02	2.063E+02	1.346E+02
SE	6.329E+05	7.597E+03	1.395E+03	3.772E+02	3.124E+01	2.501E+00	1.781E+00	1.466E+00	1.198E+00	7.912E-01	5.200E-01	3.420E-01
BR	1.592E+06	8.781E+04	4.859E+04	9.165E+04	1.222E+04	2.150E+03	8.005E+01	1.399E+01	9.049E+00	5.606E+00	3.500E+00	2.185E+00
KR	2.798E+06	7.252E+05	5.484E+05	4.213E+05	2.038E+05	5.528E+04	5.584E+03	9.343E+02	3.606E+02	2.661E+02	2.638E+02	2.637E+02
RB	3.787E+06	4.287E+05	3.048E+05	2.369E+05	1.140E+05	2.631E+04	1.415E+03	8.519E+01	1.401E+01	9.656E+00	9.293E+00	8.954E+00
SR	4.654E+06	2.508E+06	1.330E+06	1.188E+06	8.934E+05	6.057E+05	3.979E+05	3.221E+05	2.901E+05	2.686E+05	2.630E+05	2.579E+05
Y	5.920E+06	2.266E+06	2.062E+06	1.932E+06	1.566E+06	1.023E+06	5.536E+05	3.997E+05	3.381E+05	3.004E+05	2.904E+05	2.858E+05
ZR	3.785E+06	9.871E+05	9.596E+05	9.331E+05	8.599E+05	7.378E+05	5.672E+05	4.642E+05	3.975E+05	3.321E+05	3.057E+05	2.982E+05
NB	5.147E+06	1.463E+06	1.412E+06	1.373E+06	1.232E+06	9.916E+05	6.349E+05	4.949E+05	3.127E+05	1.949E+05	1.526E+05	1.389E+05
MO	2.614E+06	7.727E+05	7.192E+05	7.096E+05	6.874E+05	6.454E+05	5.690E+05	5.016E+05	4.422E+05	3.437E+05	2.671E+05	2.076E+05
TC	2.566E+06	3.119E+05	6.553E+05	6.392E+05	6.300E+05	6.056E+05	5.441E+05	4.822E+05	4.258E+05	3.311E+05	2.573E+05	2.000E+05
RU	3.788E+05	3.255E+05	3.095E+05	2.958E+05	2.652E+05	2.397E+05	2.152E+05	2.108E+05	2.086E+05	2.049E+05	2.014E+05	1.979E+05
RH	4.005E+05	3.461E+05	3.378E+05	3.322E+05	3.197E+05	3.012E+05	2.752E+05	2.558E+05	2.403E+05	2.175E+05	2.022E+05	1.915E+05
SN	4.427E+05	3.115E+04	1.849E+04	1.186E+04	5.013E+03	3.000E+03	2.441E+03	2.162E+03	1.947E+03	1.642E+03	1.441E+03	1.297E+03
SB	1.293E+06	1.684E+05	9.747E+04	7.380E+04	4.714E+04	2.691E+04	1.555E+04	1.283E+04	1.151E+04	9.591E+03	8.033E+03	6.785E+03
TE	3.300E+06	1.320E+06	9.930E+05	7.477E+05	6.025E+05	5.426E+05	4.735E+05	4.213E+05	3.766E+05	3.207E+05	2.749E+05	2.395E+05
I	4.756E+06	3.039E+06	2.668E+06	2.391E+06	1.960E+06	1.587E+06	1.184E+06	9.587E+05	8.115E+05	6.240E+05	5.063E+05	2.40E+05
XE	3.899E+06	1.198E+06	1.180E+06	1.193E+06	1.209E+06	1.165E+06	1.001E+06	8.669E+05	7.772E+05	6.645E+05	5.830E+05	1.28E+05
CS	3.444E+06	3.721E+05	1.089E+05	3.242E+04	3.531E+03	2.875E+03	2.846E+03	2.828E+03	2.811E+03	2.778E+03	2.747E+03	2.717E+03
BA	4.938E+06	1.329E+06	1.035E+06	8.977E+05	7.388E+05	6.880E+05	6.676E+05	6.499E+05	6.325E+05	5.992E+05	5.677E+05	5.379E+05
LA	4.408E+06	1.899E+06	1.579E+06	1.370E+06	1.027E+06	7.988E+05	7.079E+05	6.905E+05	6.799E+05	6.569E+05	6.309E+05	6.038E+05
CE	2.662E+06	1.249E+06	1.211E+06	1.193E+06	1.153E+06	1.076E+06	9.461E+05	8.493E+05	7.692E+05	6.492E+05	5.769E+05	5.282E+05
FR	2.274E+06	1.287E+06	1.108E+06	1.044E+06	9.395E+05	8.189E+05	7.257E+05	6.972E+05	6.895E+05	6.618E+05	6.378E+05	6.132E+05
ND	5.039E+05	3.551E+05	3.221E+05	3.013E+05	2.710E+05	2.559E+05	2.469E+05	2.393E+05	2.319E+05	2.178E+05	2.046E+05	1.922E+05
FM	2.575E+05	1.902E+05	1.867E+05	1.842E+05	1.765E+05	1.612E+05	1.347E+05	1.132E+05	9.558E+04	6.917E+04	5.110E+04	3.859E+04
SM	2.800E+04	2.309E+04	2.204E+04	2.152E+04	2.035E+04	1.833E+04	1.505E+04	1.248E+04	1.040E+04	7.264E+03	5.090E+03	3.572E+03
SUMTOT	6.625E+07	2.217E+07	1.913E+07	1.754E+07	1.494E+07	1.237E+07	9.887E+06	8.582E+06	7.736E+06	6.660E+06	5.959E+06	5.438E+06
GTOTAL	6.637E+07	2.219E+07	1.915E+07	1.756E+07	1.496E+07	1.239E+07	9.897E+06	8.590E+06	7.743E+06	6.665E+06	5.964E+06	5.443E+06
0												
CUMULATIVE TABLE TOTALS												
AP+FF	6.637E+07	2.219E+07	1.915E+07	1.756E+07	1.496E+07	1.239E+07	9.897E+06	8.590E+06	7.743E+06	6.665E+06	5.964E+06	5.443E+06
ACT+FF	6.686E+07	2.248E+07	1.940E+07	1.780E+07	1.519E+07	1.260E+07	1.008E+07	8.747E+06	7.879E+06	6.767E+06	6.040E+06	5.499E+06
AP+ACT+FF	6.686E+07	2.248E+07	1.940E+07	1.780E+07	1.519E+07	1.260E+07	1.008E+07	8.747E+06	7.879E+06	6.767E+06	6.040E+06	5.499E+06

(c) Daya 15 MW

Gambar 1. Produk fisi pada daya (a) 5 MW, (b) 10 MW dan (c) 15 MW

Memasukkan data pada Tabel 1 ke seperti di tunjukkan pada Tabel 2 sampai dalam perangkat lunak HotSpot Versi Tabel 4. 3.0.3 sehingga akan didapatkan hasil

Tabel 2. Laju dosis pada operasi reaktor 5 MW dengan variasi kecepatan angin 1-5 m/detik

Jarak (km)	Laju dosis (Sv/Jam) pada kecepatan angin :				
	1 m/detik	1,5 m/detik	2 m/detik	2,5 m/detik	3 m/detik
0,1	9,20E-02	6,30E-02	4,80E-02	3,80E-02	3,20E-02
0,2	4,30E-02	3,00E-02	2,30E-02	1,90E-02	1,60E-02
0,3	2,60E-02	1,90E-02	1,50E-02	1,20E-02	1,00E-02
0,4	1,80E-02	1,40E-02	1,10E-02	8,90E-03	7,60E-03
0,5	1,40E-02	1,00E-02	8,40E-03	7,00E-03	5,90E-03
0,6	1,10E-02	8,30E-03	6,80E-03	5,70E-03	4,90E-03
0,7	8,50E-03	6,80E-03	5,60E-03	4,70E-03	4,10E-03
0,8	7,00E-03	5,70E-03	4,80E-03	4,10E-03	3,50E-03
0,9	5,80E-03	4,90E-03	4,10E-03	3,50E-03	3,10E-03

Tabel 2. Lanjutan

Jarak (km)	Laju dosis (Sv/Jam) pada kecepatan angin :				
	1 m/detik	1,5 m/detik	2 m/detik	2,5 m/detik	3 m/detik
1	4,80E-03	4,20E-03	3,60E-03	3,10E-03	2,70E-03
2	1,10E-03	1,30E-03	1,30E-03	1,20E-03	1,10E-03
3	3,60E-04	5,30E-04	5,90E-04	6,00E-04	5,80E-04
4	1,30E-04	2,40E-04	3,10E-04	3,40E-04	3,50E-04
5	4,70E-05	1,20E-04	1,70E-04	2,00E-04	2,20E-04

Jarak (km)	Laju dosis (Sv/Jam) pada kecepatan angin :			
	3,5 m/detik	4 m/detik	4,5 m/detik	5 m/detik
0,1	2,80E-02	2,40E-02	2,20E-02	2,00E-02
0,2	1,40E-02	1,20E-02	1,10E-02	9,70E-03
0,3	8,90E-03	7,90E-03	7,00E-03	6,40E-03
0,4	6,60E-03	5,80E-03	5,20E-03	4,70E-03
0,5	5,20E-03	4,60E-03	4,10E-03	3,80E-03
0,6	4,30E-03	3,80E-03	3,40E-03	3,10E-03
0,7	3,60E-03	3,20E-03	2,90E-03	2,60E-03
0,8	3,10E-03	2,80E-03	2,50E-03	2,30E-03
0,9	2,70E-03	2,40E-03	2,20E-03	2,00E-03
1	2,40E-03	2,20E-03	2,00E-03	1,80E-03
2	1,00E-03	9,30E-04	8,70E-04	8,10E-04
3	5,60E-04	5,30E-04	5,00E-04	4,80E-04
4	3,50E-04	3,40E-04	3,30E-04	3,20E-04
5	2,30E-04	2,30E-04	2,30E-04	2,20E-04

Tabel 3. Laju dosis pada operasi reaktor 10 MW dengan variasi kecepatan angin 1-5 m/detik

Jarak (km)	Laju dosis (Sv/Jam) pada kecepatan angin :				
	1 m/detik	1,5 m/detik	2 m/detik	2,5 m/detik	3 m/detik
0,1	1,80E-01	1,30E-01	9,60E-02	7,70E-02	6,50E-02
0,2	8,60E-02	6,00E-02	4,60E-02	3,80E-02	3,20E-02
0,3	5,30E-02	3,80E-02	3,00E-02	2,40E-02	2,10E-02
0,4	3,70E-02	2,70E-02	2,20E-02	1,80E-02	1,50E-02
0,5	2,80E-02	2,10E-02	1,70E-02	1,40E-02	1,20E-02
0,6	2,10E-02	1,70E-02	1,40E-02	1,10E-02	9,80E-03
0,7	1,70E-02	1,40E-02	1,10E-02	9,50E-03	8,20E-03
0,8	1,40E-02	1,10E-02	9,60E-03	8,10E-03	7,10E-03
0,9	1,20E-02	9,80E-03	8,20E-03	7,10E-03	6,20E-03
1	9,70E-03	8,40E-03	7,20E-03	6,20E-03	5,40E-03
2	2,30E-03	2,60E-03	2,50E-03	2,40E-03	2,20E-03
3	7,20E-04	1,10E-03	1,20E-03	1,20E-03	1,20E-03
4	2,50E-04	4,80E-04	6,20E-04	6,80E-04	6,90E-04
5	9,50E-05	2,40E-04	3,40E-04	4,10E-04	4,40E-04

Tabel 3. Lanjutan

Jarak (km)	Laju dosis (Sv/Jam) pada kecepatan angin :			
	3,5 m/detik	4 m/detik	4,5 m/detik	5 m/detik
0,1	5,60E-02	4,90E-02	4,30E-02	3,90E-02
0,2	2,70E-02	2,40E-02	2,10E-02	1,90E-02
0,3	1,80E-02	1,60E-02	1,40E-02	1,30E-02
0,4	1,30E-02	1,20E-02	1,00E-02	9,50E-03
0,5	1,00E-02	9,20E-03	8,30E-03	7,50E-03
0,6	8,60E-03	7,60E-03	6,90E-03	6,20E-03
0,7	7,20E-03	6,50E-03	5,80E-03	5,30E-03
0,8	6,20E-03	5,60E-03	5,10E-03	4,60E-03
0,9	5,50E-03	4,90E-03	4,40E-03	4,10E-03
1	4,80E-03	4,40E-03	4,00E-03	3,60E-03
2	2,00E-03	1,90E-03	1,70E-03	1,60E-03
3	1,10E-03	1,10E-03	1,00E-03	9,60E-04
4	6,90E-04	6,80E-04	6,60E-04	6,40E-04
5	4,60E-04	4,60E-04	4,60E-04	4,50E-04

Tabel 4. Laju dosis pada operasi reaktor 15 MW dengan variasi kecepatan angin 1-5 m/detik

Jarak (km)	Laju dosis (Sv/Jam) pada kecepatan angin :				
	1 m/detik	1,5 m/detik	2 m/detik	2,5 m/detik	3 m/detik
0,1	2,70E-01	1,80E-01	1,40E-01	1,10E-01	9,50E-02
0,2	1,20E-01	8,80E-02	6,80E-02	5,50E-02	4,70E-02
0,3	7,70E-02	5,60E-02	4,40E-02	3,60E-02	3,00E-02
0,4	5,40E-02	4,00E-02	3,20E-02	2,60E-02	2,20E-02
0,5	4,00E-02	3,10E-02	2,50E-02	2,10E-02	1,80E-02
0,6	3,10E-02	2,40E-02	2,00E-02	1,70E-02	1,40E-02
0,7	2,50E-02	2,00E-02	1,70E-02	1,40E-02	1,20E-02
0,8	2,00E-02	1,70E-02	1,40E-02	1,20E-02	1,00E-02
0,9	1,70E-02	1,40E-02	1,20E-02	1,00E-02	9,10E-03
1	1,40E-02	1,20E-02	1,10E-02	9,10E-03	8,00E-03
2	3,50E-03	3,90E-03	3,70E-03	3,50E-03	3,20E-03
3	1,10E-03	1,60E-03	1,80E-03	1,80E-03	1,70E-03
4	4,00E-04	7,40E-04	9,30E-04	1,00E-03	1,00E-03
5	1,60E-04	3,70E-04	5,40E-04	6,10E-04	6,60E-04

Jarak (km)	Laju dosis (Sv/Jam) pada kecepatan angin :			
	3,5 m/detik	4 m/detik	4,5 m/detik	5 m/detik
0,1	8,20E-02	7,20E-02	6,40E-02	5,80E-02
0,2	4,00E-02	3,50E-02	3,20E-02	2,90E-02
0,3	2,60E-02	2,30E-02	2,10E-02	1,90E-02
0,4	1,90E-02	1,70E-02	1,50E-02	1,40E-02
0,5	1,50E-02	1,40E-02	1,20E-02	1,10E-02
0,6	1,30E-02	1,10E-02	1,00E-02	9,20E-03

Tabel 4. Lanjutan

Jarak (km)	Laju dosis (Sv/Jam) pada kecepatan angin :			
	3,5 m/detik	4 m/detik	4,5 m/detik	5 m/detik
0,7	1,10E-02	9,50E-03	8,60E-03	7,80E-03
0,8	9,20E-03	8,20E-03	7,50E-03	6,80E-03
0,9	8,10E-03	7,20E-03	6,60E-03	6,00E-03
1	7,10E-03	6,40E-03	5,80E-03	5,40E-03
2	3,00E-03	2,80E-03	2,60E-03	2,40E-03
3	1,70E-03	1,60E-03	1,50E-03	1,40E-03
4	1,00E-03	1,00E-03	9,80E-04	9,40E-04
5	6,80E-04	6,90E-04	6,80E-04	6,70E-04

HASIL DAN PEMBAHAAN

Dari hasil simulasi dengan menggunakan perangkat lunak HotSpot Versi 3.03 diperoleh hasil perhitungan berupa :

- TEDE (*Total Effective Dose Equivalent*) (Sv)
- Konsentrasi radioaktivitas di udara ($\text{Bq}\cdot\text{sec}/\text{m}^3$)
- Kontaminasi permukaan tanah (kBq/cm^2)
- Laju dosis di permukaan tanah (Sv/jam)

TEDE adalah besarnya dosis yang akan diterima oleh personil atau penduduk yang berada di sekitar reaktor pada saat kecelakaan berlangsung. Besarnya dosis yang diterima tergantung dari jarak dan lamanya personil/penduduk tersebut berada di daerah yang mengandung radiasi. Bila personil/penduduk tersebut berada didalam gedung maka dosis yang terima akan lebih kecil dari pada personil/penduduk berada di tempat yang terbuka.

Konsentrasi udara adalah merupakan besarnya konsentrasi udara yang mengandung zat radioaktif pada variasi jarak dari reaktor. Semakin jauh dari reaktor maka konsentrasi udara semakin kecil. Faktor lain yang mempengaruhi adalah kecepatan dan arah angin pada saat terjadi kedaruratan.

Kontaminasi permukaan tanah merupakan zat radioaktif yang terbawa oleh udara akan jatuh ke permukaan tanah, sehingga tanah tersebut akan terkon-

taminasi zat radioaktif. Bila massa dari zat radioaktif besar maka daerah kontaminasi terbesar adalah daerah dengan jarak yang paling dekat dengan reaktor, dan bila massa zat radioaktif ringan maka kontaminasi akan menyebar jauh dari reaktor.

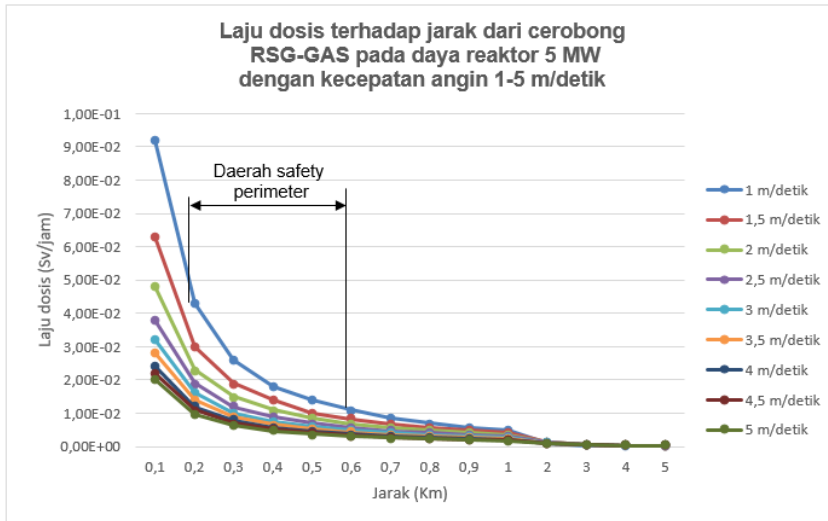
Hasil perhitungan laju dosis memberikan gambaran bahwa zat radioaktif yang menempel dipermukaan tanah akan mengkontaminasi daerah tersebut dan kontaminasi tersebut juga akan memancarkan radiasi. Pancaran radiasi tersebut menjadikan pedoman untuk menentukan daerah *safety perimeter* di sekitar reaktor^[9]. Semakin jauh dari reaktor maka laju dosis semakin kecil karena zat radioaktif yang terbawa udara semakin sedikit.

Faktor lain yang menentukan besarnya laju dosis adalah :

- Aktivitas radioaktif yang keluar dari cerobong reaktor, jika *source term* yang keluar dari teras reaktor besar maka laju dosis yang terukur akan tinggi. Sehingga akan mempengaruhi tingkat keparahan kecelakaan reaktor dan tingkat kedaruratan di reaktor.
- Kecepatan angin, semakin cepat angin bertiup maka semakin jauh sebaran zat radioaktifnya.
- Arah angin, zat radioaktif akan banyak terdeposit pada arah angin yang tidak berubah.

- Jarak , semakin jauh dari reaktor maka laju dosisnya akan semakin rendah.
- Stabilitas udara yang tidak stabil akan mempengaruhi arah sebaran zat radioaktif sebaliknya jika stabilitas udara stabil maka arah sebaran dapat diprediksi.

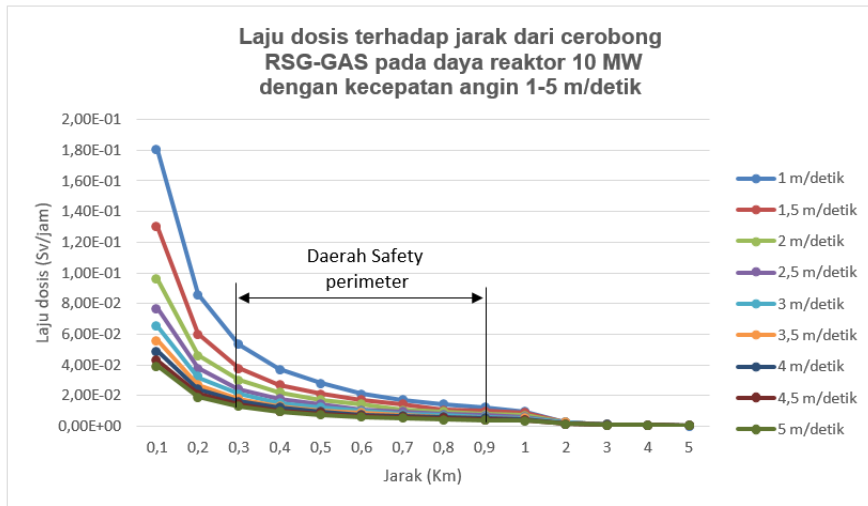
Dari hasil *running* perangkat lunak HotSpot versi 3.0.3 dapat ditampilkan dalam grafik seperti pada Gambar 2, 3 dan 4 hubungan antara jarak dan laju dosis dalam kondisi kedaruratan nuklir di RSG-GAS pada daya reaktor 5, 10 dan 15 MW.



Gambar 2. Laju dosis terhadap jarak dari cerobong RSG-GAS pada daya 5 MW dengan kecepatan angin 1-5 m/detik

Pada Gambar 2 menunjukkan bahwa daerah *safety perimeter* pada saat reaktor terjadi kecelakaan dan reaktor beroperasi pada daya 5 MW, daerah *safety perimeter* nya adalah berkisar antara jarak 200 m sampai 600 m dari RSG-GAS. Kecepatan udara semakin tinggi maka daerah *safety perimeter* semakin dekat dengan RSG-GAS hal ini karena material zat radioaktif terbawa dengan cepat oleh udara dan akan jatuh

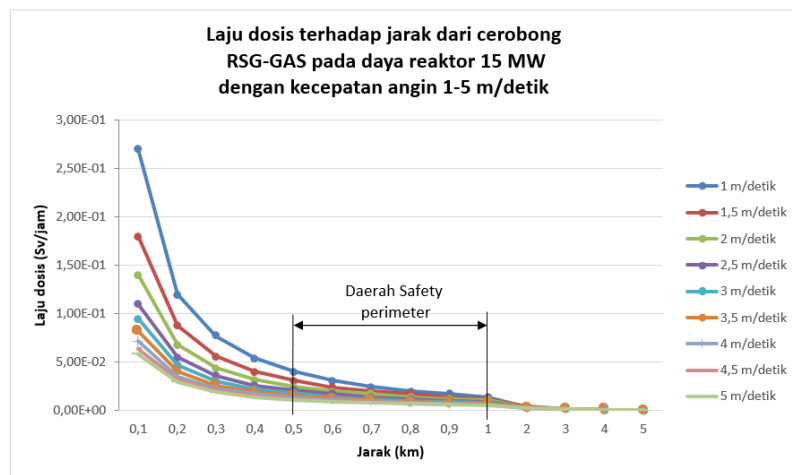
pada lokasi yang lebih jauh dari reaktor. Faktor lain yang mempengaruhi besarnya laju dosis adalah besarnya aktivitas zat radioaktif yang dikeluarkan dari cerobong RSG-GAS. Aktivitas zat radioaktif Iodine 131 pada daya 5 MW dengan waktu operasi 4 hari sebesar $1,696E^{+05}$ Curie. Semakin tinggi daya reaktor maka aktivitas zat radioaktif juga akan semakin tinggi.



Gambar 3. Laju dosis terhadap jarak dari cerobong RSG-GAS pada daya 10 MW dengan kecepatan angin 1-5 m/detik

Gambar 3 menunjukkan bahwa daerah *safety perimeter* pada saat reaktor terjadi kecelakaan dan reaktor beroperasi pada daya 10 MW, daerah *safety perimeter* nya adalah berkisar antara jarak 300 m sampai 900 m dari RSG-GAS. Daerah *safety perimeter* lebih jauh dibandingkan pada saat reaktor

dioperasikan daya 5 MW. Penyebab semakin jauh daerah *safety perimeter* karena aktivitas zat radioaktif yang dikeluarkan dari cerobong pada saat terjadi kecelakaan lebih besar. Aktivitas zat radioaktif Iodine 131 pada daya 10 MW dengan waktu operasi 4 hari sebesar $3,401E^{+05}$ Curie.



Gambar 4. Laju dosis terhadap jarak dari cerobong RSG-GAS pada daya 15 MW dengan kecepatan angin 1-5 m/detik

Gambar 4 menunjukkan bahwa daerah *safety perimeter* pada saat reaktor terjadi kecelakaan dan reaktor beroperasi pada daya 10 MW, daerah *safety perimeter* nya adalah berkisar antara jarak 500 m sampai 1000 m dari RSG-GAS. Daerah *safety perimeter* lebih jauh dibandingkan pada saat reaktor dioperasikan daya 5 dan 10 MW. Penyebab semakin jauh daerah *safety perimeter* karena aktivitas zat radioaktif yang dikeluarkan dari cerobong pada saat terjadi kecelakaan lebih besar. Aktivitas zat radioaktif Iodine 131 pada daya 15 MW dengan waktu operasi 4 hari sebesar $5,063E^{+05}$ Curie.

Dengan demikian *cordoned area/safety perimeter* pada saat reaktor RSG-GAS mengalami kecelakaan dan melepaskan zat radioaktif berupa Iodine 131 melalui cerobong dan reaktor beroperasi pada daya 5, 10 dan 15 MW daerah *safety perimeter* berkisar antara 200 – 1000 m, dari cerobong reaktor tergantung dari kecepatan udara disekitar RSG-GAS. Daerah tersebut merupakan daerah yang sesegera mungkin harus dilakukan evakuasi penduduk, dan daerah tersebut di kendalikan oleh petugas penanggulangan kedaruratan nuklir. Tujuan dari evakuasi adalah agar penduduk yang berada pada daerah tersebut tidak menghirup udara yang mengandung nuklida Iodine 131 yang dapat menyebabkan gangguan pada tiroidnya^[10]. Tindakan perlindungan terhadap personil/penduduk dari bahaya radiasi menjadi prioritas utama dalam penanggulangan kedaruratan nuklir di instalasi reaktor. Prinsip utama dalam penanggulangan kedaruratan nuklir adalah menyelamatkan personil/penduduk dan lingkungan.

KESIMPULAN

Dari hasil simulasi dengan parameter/variabel utama dari uraian diatas maka dapat diambil kesimpulan bahwa radius 200-1000 m dari RSG-GAS ditetapkan sebagai *cordoned area/safety perimeter* dan pada daerah tersebut harus segera dilakukan evakuasi dan dikendalikan oleh petugas penanggulangan kedaruratan nuklir bila terjadi kedaruratan di RSG-GAS pada saat reaktor beroperasi pada daya 5, 10 dan 15 MW.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Bapeten 2010, Perka Bapeten No. 1 Tahun 2010
- [2] BATAN, "Peraturan Kepala BATAN No. 184/Ka/IX/2012 tahun 2012 tentang Program Kesiapsiagaan Nuklir Kawasan Nuklir Serpong Badan Tenaga Nuklir Nasional", 2012
- [3] IAEA 2006, *Manual for First Responders to a Radiological Emergency*
- [4] Program Kesiapsiagaan Nuklir Kawasan Nuklir Serpong, Revisi 3 Tahun 2012
- [5] PPIKSN-BATAN 2015, Pemutahiran Data Rona Lingkungan
- [6] PRSG, "Laporan Analisis Keselamatan RSG - GAS Rev. 10.1", 2011
- [7] National Atmospheric Release Advisory Center 2010, HotSpot User Guide Versi 3.0.3
- [8] Kadarusmanto dkk, "Pemanfaatan Paket Program Origen2", 1990
- [9] Generic Procedures for Response to a Nuclear or Radiological Emergency at Research Reactors, Vienna 2011.
- [10] Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency, GSR Part 7, Vienna 2015.