

## PERHITUNGAN SEBARAN OZON DARI CEROBONG IRADIATOR GAMMA PRFN

Rissa Damayanti, Iwan Roswandi, Petrus Zacharias  
PRFN-BATAN, Kawasan Puspiptek Gd.71, Tangerang Selatan - 15310  
rissa@batan.go.id, iwanroswandi@batan.go.id, petza@batan.go.id

### ABSTRAK

*PERHITUNGAN SEBARAN OZON DARI CEROBONG IRADIATOR GAMMA PRFN, Analisis perhitungan meliputi estimasi seberapa banyak ozon yang tersebar di area sekitar instalasi iradiator gamma PRFN yang dihasilkan selama proses iradiasi berlangsung. Ozon yang terbentuk selama proses iradiasi akan disirkulasi oleh blower ozon dan dibuang ke udara bebas lewat cerobong buangan dengan sistem pertukaran udara ruangan iradiasi tipe basah yang membutuhkan minimal 20 kali pergantian udara per jam atau konsentrasi ozon di udara tidak melebihi nilai batas yang diizinkan yaitu 0,1 ppm. Pergerakan ozon di atmosfer / udara bebas terjadi dalam tiga dimensi secara horizontal maupun transversal, sesuai dengan arah angin (adveksi) maupun vertikal, ke lapisan atas atmosfer bumi. Untuk melakukan perhitungan tersebut dilakukan dengan menggunakan Model Dispersi Gauss. Data yang digunakan dalam melakukan perhitungan adalah kecepatan angin minimal pada ketinggian cerobong 11 meter sebesar 0.1 m/detik dan kecepatan angin maksimal sebesar 6 m/detik pada saat pagi, siang dan malam hari. Laju emisi ozon (Q) adalah 0.000707 gram/detik, dengan variasi jarak pemaparan menurut arah angin dari 1 meter hingga 6 meter (0.001 – 0.00 Km). Dari hasil perhitungan yang telah dilakukan diperoleh kondisi paparan ozon tertinggi, yaitu : pada kecepatan angin 0.1 m/s, kestabilan udara kelas A (sangat tidak stabil) pada pagi/siang dengan intensitas matahari kuat. Pada nilai-nilai paparan ozon tersebut pada jarak  $x \leq 1$  m,  $y = 0$ ,  $z = 1, 1.5, 2, 2.5, 3, \dots, 17$  m nilai konsentrasi paparan ozon  $> 0,1$  ppm (lebih dari nilai batas yang diizinkan), namun kondisi pada lokasi dengan koordinat lain  $x \geq 1$  m,  $y = 0$ ,  $z = 1, 1.5, 2, 2.5, 3, \dots, 17$  m, dan  $x = 1, 2, 3, 4, 5, 6$  m,  $y = 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3$  m,  $z = 0$  nilai konsentrasi paparan ozon  $< 0,1$  ppm (tidak lebih dari nilai batas yang diizinkan). Sehingga dapat dikatakan yang mempengaruhi besar dari konsentrasi paparan ozon ke lingkungan antara lain: kecepatan angin, kecepatan emisi gas buang, kecepatan linear gas buang dalam cerobong, percepatan gravitasi, kelas kestabilan udara, serta selisih antara temperatur gas buang dan temperatur udara lingkungan.*

*Kata kunci: Iradiator Gamma, Sebaran Ozon, Cerobong Iradiator, Dispersi.*

### ABSTRACT

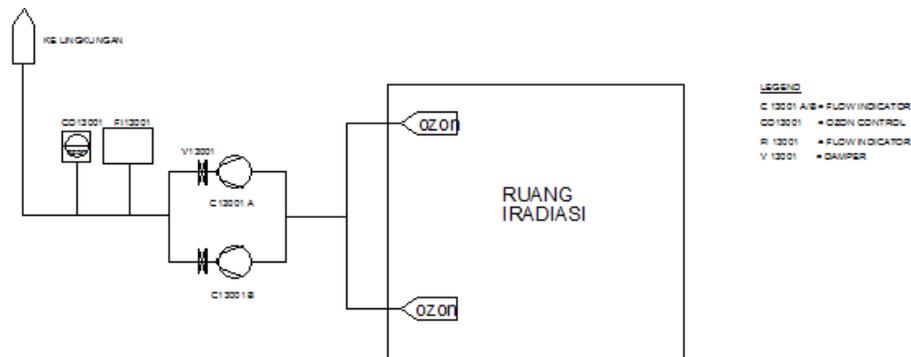
*A CALCULATION OF OZONE DISTRIBUTION FROM THE CHIMNEY GAMMA IRRADIATOR PLANT OF PRFN. Calculation includes estimation of ozone scattered in the area around the installation of the PRFN gamma irradiator generated during irradiation process. Ozone which is formed during irradiator in operation will be circulated by the blower and discharged into the atmosphere through the exhaust chimney of the wet type air exchange system irradiation room that requires a minimum of 20 times the air changes per hour or the concentration of ozone in the air does not exceed the allowed limit is 0.1 ppm. The movement of ozone in the atmosphere occurs in three dimensions horizontally and transverse, in accordance with the direction of the wind (advection) or vertically, to the top layer of the earth's atmosphere. To perform these calculations the Gaussian Dispersion Model has been used. The data used in the calculation are the minimum wind speed at the height of the chimney 11 meters of 0.1 m / sec and a maximum wind speed of 6 m / sec during the morning, afternoon and evening. Ozone emission rate (Q) is 0.000707 grams / sec, with a variation of exposure downwind distance of 1 meter to 6 meters (0.001 - 00:00 Km). From the results of the calculations have been done obtained the highest ozone exposure conditions, ie: at a wind speed of 0.1 m / s, air stability classes A (very unstable) in the morning / afternoon with strong solar intensity. At the values of ozone exposure are at a distance  $x \leq 1$  m,  $y = 0$ ,  $z = 1, 1.5, 2, 2.5, 3, \dots, 17$  m value exposure to ozone concentrations  $> 0.1$  ppm (over limit values allowed) , but the conditions at other locations*

with coordinates  $x \geq 1$  m,  $y = 0$ ,  $z = 1, 1.5, 2, 2.5, 3, \dots 17$  m, and  $x = 1, 2, 3, 4, 5, 6$  m,  $y = 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3$  m,  $z = 0$  value exposure to ozone concentrations  $< 0.1$  ppm (no more than the permitted limit values). So it can be said that influence of the concentration of ozone exposure to the environment, among others: the wind speed, the speed of exhaust emissions, exhaust gas linear velocity in the chimney, the acceleration of gravity, air stability classes, as well as the difference between the temperature of the exhaust gas and ambient air temperature.

*Keywords : Gamma Irradiator, Distribution of Ozone, Chimney Irradiator, Dispersion*

## 1. PENDAHULUAN

Guna menunjang proses iradiasi di dalam ruang iradiasi dibutuhkan sistem ventilasi dan pengkondisian udara untuk mengeluarkan gas ozon dari ruang iradiasi, agar diperoleh pergantian udara segar dan sehat sehingga dapat memberikan jaminan keselamatan bagi pekerja maupun lingkungan sekitar instalasi iradiator berada. Ozon merupakan gas beracun dan bersifat reaktif sehingga dapat membahayakan kesehatan manusia serta merusak komponen peralatan. Merujuk pada perka BAPETEN nomor 11/Ka-BAPETEN/VI-99 tentang izin konstruksi dan operasi iradiator, pertukaran udara ruangan iradiasi untuk iradiator tipe penyimpanan basah membutuhkan minimal 20 kali pergantian udara per jam atau konsentrasi ozon di udara tidak melebihi nilai batas yang diizinkan yaitu 0,1 ppm.



Gambar 1. Diagram Sistem Ventilasi

## 2. LANDASAN TEORI

Pergerakan pencemaran udara di dalam atmosfer terjadi dalam tiga dimensi secara horizontal maupun transversal, sesuai dengan arah angin (adveksi) maupun vertikal, ke lapisan atas atmosfer bumi<sup>[4]</sup>. Dinamika serta atmosferik merupakan faktor-faktor yang sangat menentukan pencemaran udara setelah diemisikan dari sumbernya, sehingga timbul kaitan yang erat antara sumber  $O_3$  dengan daerah penerima. Menurut Budirahardjo<sup>[3]</sup>, sumber-sumber emisi yang menyebabkan terjadinya kontaminasi di udara terbagi menjadi tiga (3) kelompok, yaitu: sumber emisi bergerak, sumber titik tetap, dan sumber campuran.

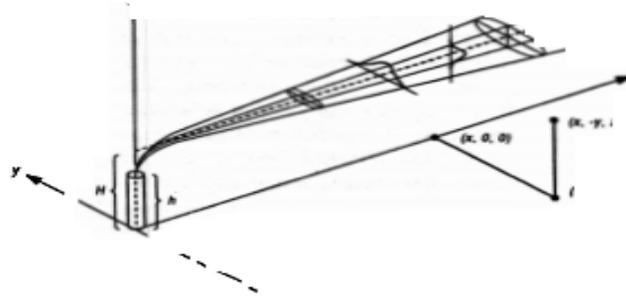
Salah satu contoh sumber titik tetap yaitu cerobong asap. Emisi yang dikeluarkan melalui cerobong tersebut pasti akan mengakibatkan terjadinya penurunan kualitas udara disekitar jika tidak dilakukan penanganan yang baik. Oleh karena itu, analisis perhitungan yang dilakukan ini bertujuan untuk mengetahui komponen-komponen parameter pemodelan udara emisi sumber titik tetap, sehingga didapatkan perkiraan besarnya paparan kontaminan ozon yang dihasilkan untuk perencanaan penanganan kontaminasi tersebut di udara sekitar.

### Sistem Cerobong

Cerobong udara harus dibuat dengan mempertimbangkan aspek pengendalian pencemaran udara yang didasarkan pada lokasi dan tinggi cerobong. Pertimbangan kondisi meteorologis dan tata guna tanah merupakan salah satu pertimbangan untuk mendapatkan lokasi dan tinggi cerobong yang tepat, dimana dengan perhitungan modelling pencemaran udara akan dapat ditentukan dispersi udara, dari cerobong terhadap kondisi udara sekitarnya. Dari dispersi udara, dapat ditentukan konsentrasi udara di atas permukaan tanah yang sesuai dengan standar kualitas udara ambien. Rancang bangun atau disain cerobong disesuaikan kondisi pabrik dengan pertimbangan emisi yang akan dikeluarkan tidak melebihi baku mutu emisi yang ditetapkan. Disamping itu beberapa persyaratan perencanaan cerobong secara umum seperti berikut:

1. Tinggi cerobong sebaiknya 2 - 2 1/2 kali tinggi bangunan sekitarnya sehingga lingkungan sekitarnya tidak terkena turbulensi.
2. Kecepatan aliran gas dari cerobong sebaiknya lebih besar dari 20 m/detik sehingga gas-gas yang keluar dari cerobong akan terhindar dari turbulensi.
3. Gas-gas dari cerobong dengan diameter lebih kecil dari 5 feet dan tinggi kurang dari 200 feet akan mengakibatkan konsentrasi di bagian bawah akan menjadi tinggi.
4. Konsentrasi maksimum bagian permukaan tanah dari cerobong gas-gas (agar terjadi difusi) biasanya terjadi pada jarak 5 - 10 kali tinggi cerobong downwind.
5. Konsentrasi maksimum zat pencemar berkisar antara 0,001 - 1% dari konsentrasi zat pencemar dalam cerobong.
6. Konsentrasi di permukaan dapat dikurangi dengan menggunakan cerobong yang tinggi. Variasi konsentrasi pencemar pada permukaan akan berbanding terbalik dengan kuadrat tinggi cerobong efektif.
7. Warna cerobong harus mencolok sehingga mudah terlihat.
8. Cerobong dilengkapi dengan pelat penahan angin yang melingkari cerobong secara memanjang ke arah ujung atas.
9. Puncak cerobong sebaiknya terbuka, jika pihak industri menganggap perlu untuk memberi penutup (biasanya cerobong kecil/rendah) maka penutup berbentuk segitiga terbalik (terbuka ke atas).
10. Setiap cerobong diberi nomor dan dicantumkan dalam denah industri.
11. Disamping itu di sekitar cerobong sebaiknya dilengkapi dengan tempat parkir sehingga kendaraan sampling dapat sedekat mungkin dengan lubang sampling.
12. Apabila cerobong tidak sesuai dengan ketentuan di atas (untuk industri yang beroperasi sebelum dan sejak tahun 1995), maka perlu dilakukan modifikasi perlakuan gas buang. Hal tersebut dilakukan dengan mengubah kecepatan serta temperatur gas, sehingga akan diperoleh tinggi cerobong efektif yang lebih tinggi.

Perhitungan dilakukan dengan menggunakan Model Dispersi Gauss. Pemodelan ini dapat menyatakan secara sederhana penyimpangan partikel di udara terhadap waktu. Banyaknya polutan yang dikeluarkan secara tetap dari cerobong asap ( $Q$ ) akan terbawa angin dengan kecepatan  $u$  dalam arah horizontal ( $x$ ) dengan kerapatan massa  $Q/u$ . Untuk polutan yang tidak bereaksi, massa polutan yang terkandung dalam setiap volume dan setiap jarak akan sama harganya. Akan tetapi kadarnya akan berkurang sesuai dengan bertambahnya jarak, karena turbulensi atmosfer cenderung menyebarkan material ke arah horizontal dan vertikal. Kadar rata-rata polutan pada suatu titik akan berbanding terbalik terhadap lebar sebaran dan kecepatan angin dalam sistem koordinat tiga-dimensi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2, terdapat cerobong pada titik pusat, dengan jarak jatuhnya asap dinyatakan oleh  $x$ , melebarnya asap dinyatakan oleh  $y$ , dan tinggi semburan asap dinyatakan oleh  $z$ .



Gambar 2. Sistem koordinat sebaran asap yang memperlihatkan distribusi Gauss dalam arah horizontal dan vertikal

### 3. TATA KERJA

Data yang digunakan dalam melakukan perhitungan adalah kecepatan angin minimal pada ketinggian cerobong 11 meter adalah 0.1 m/detik dan kecepatan angin maksimal adalah 6 m/detik untuk wilayah sekitar instalasi iradiator pada saat pagi, siang dan malam hari. Laju emisi ozon (Q) adalah 0.000707 gram/detik, dengan variasi jarak pemaparan menurut arah angin dari 1 meter hingga 6 meter (0.001 – 0.00 Km).

Setelah menganalisis kondisi tersebut, maka dapat ditentukan point-point parameter yang dapat digunakan dalam merancang permodelan udara emisi. Berikut ini tabel kelas kestabilan udara ditentukan dari besarnya kecepatan angin pada ketinggian cerobong.

Tabel 1. Kelas Kestabilan Udara

Kecepatan Angin (m/detik)	Pagi / Siang			Malam		Dimana
	Intensitas Sinar Matahari			Keadaan Awan		
	Kuat	Sedang	Lemah	Berawan	Cerah	
< 2	A	A – B	B	E	F	A (sangat tidak stabil) B (sedang) C (sedikit tidak stabil) D (netral) F (stabil)
2 – 3	A – B	B	C	E	F	
3 – 5	B	B – C	C	D	E	
5 – 6	C	C – D	D	D	D	
> 6	C	D	D	D	D	

- Untuk persoalan cemaran (terhadap penduduk dan ekosistem) untuk permukaan tanah, maka bentuk persamaan dispersi gauss yang digunakan dengan  $y = 0, z = 0$ , adalah :

$$\chi(x,0,0;H) = \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_z u} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{H}{\sigma_z} \right)^2 \right] \dots\dots\dots (1)$$

Dimana :

- Q = Laju emisi ozon (g/detik)
- $\sigma_y$  = koefisien dispersi Gauss horizontal (m)
- $\sigma_z$  = koefisien dispersi Gauss vertikal (m)
- U = kecepatan angin arah sumbu x (m/detik)
- H = ketinggian efektif cerobong (m)

- Untuk persoalan cemaran (terhadap penduduk dan ekosistem) pada x (1,2,3,4,5,6 meter) dan y (0.5,1,1.5,2,3 meter), maka bentuk persamaan dispersi gauss yang digunakan adalah :

$$\chi(x,y,0;H) = \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_z u} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{H}{\sigma_z} \right)^2 \right] \dots \dots \dots (2)$$

Dimana :

- Q = Laju emisi ozon (g/detik)
- $\sigma_y$  = koefisien dispersi Gauss horizontal (m)
- $\sigma_z$  = koefisien dispersi Gauss vertikal (m)
- U = kecepatan angin arah sumbu x (m/detik)
- H = ketinggian efektif cerobong (m)
- Y = Jarak dari sumbu x (m)

- Untuk persoalan cemaran (terhadap penduduk dan ekosistem) pada x (1,2,3,4,5,6 meter) dan z (1,1.5,2,2.5,3 meter), maka bentuk persamaan dispersi gauss yang digunakan adalah :

$$c(x,0,z;H) = \frac{Q}{2\pi \sigma_y \sigma_z u} \left\{ \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{z-H}{\sigma_z} \right)^2 \right] + \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{z+H}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right\} \dots \dots \dots (3)$$

Dimana :

- Q = Laju emisi ozon (g/detik)
- $\sigma_y$  = koefisien dispersi Gauss horizontal (m)
- $\sigma_z$  = koefisien dispersi Gauss vertikal (m)
- U = kecepatan angin arah sumbu x (m/detik)
- H = ketinggian efektif cerobong (m)
- z = Jarak dari sumbu z (m)

Untuk menghitung dispersi Gauss di atas menggunakan kelas kestabilan udara pada Tabel 1, sehingga didapat konstanta-konstanta pembentuk koefisien-dispersi Gauss.

Tabel 2. Tabel Koefisien Dispersi Gauss<sup>[1]</sup>

Stabilitas (kelas)	x < 1 km				x > 1 km		
	a	c	d	F	c	d	f
A	213	440,8	1,941	9,27	459,7	2,094	-9,6
B	156	106,6	1,149	3,3	108,2	1,098	2
C	104	61	0,911	0	61	0,911	0
D	68	33,2	0,725	-1,7	44,5	0,516	-13
E	50,5	22,8	0,678	-1,3	55,4	0,305	-34
F	34	14,4	0,740	-0,35	62,6	0,180	-48,6

Catatan : harga b = 0,894 untuk semua kelas  
 $\sigma_y = aX^b$  dan  $\sigma_z = cX^d + f$   
 X = jarak konsentrasi sebaran (km)

#### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

- 4.1. Perhitungan konsentrasi sebaran ozon tertinggi dari cerobong iradiator gamma pada permukaan tanah dengan x (1,2,3,4,5,6 meter); y = 0; z = 0  
Perhitungan ini didasarkan pada asumsi bahwa untuk nilai sebaran ozon tertinggi berada pada kondisi kecepatan angin paling minimal yaitu pada perhitungan ini digunakan U = 0.1 m/detik, kestabilan udara digunakan kelas A (sangat tidak stabil) pada pagi/siang dengan intensitas matahari kuat, maka dengan kondisi tersebut dan dengan data yang ada pada Tata Kerja diatas diperoleh hasil perhitungan menggunakan Persamaan 1 dan Tabel 2 diatas sebagai berikut :

$$\sigma_y = aX^b = 213 \times 0.001^{0,894} = 0.442975 \text{ m}$$

$$\sigma_z = cX^d + f = 440.8 \times 0.001^{1.941} + 9.27 = 9.2707 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} \chi(x,0,0;H) &= \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_z u} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{H}{\sigma_z} \right)^2 \right] \\ &= \frac{0.000707 \text{ g/det}}{3.14 \times 0.442975 \text{ m} \times 9.2707 \text{ m} \times 0.1 \text{ m/det}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{11 \text{ m}}{9.2707 \text{ m}} \right)^2 \right] \\ &= 2.712 \times 10^{-4} \text{ g/m}^3 = 0.1266 \text{ ppm} \end{aligned}$$

Dengan cara perhitungan yang sama dihasilkan perhitungan konsentrasi sebaran ozon maksimal pada beberapa variasi koordinat terlihat pada Tabel 3  
Tabel 3. Hasil perhitungan konsentrasi sebaran ozon maksimal dari cerobong iradiator gamma pada x (1,2,3,4,5,6 meter), y = 0, z = 0

Koordinat (m)	c (ppm)
2,0,0	0.0681
3,0,0	0.0474
4,0,0	0.0367
5,0,0	0.0300
6,0,0	0.0255

- 4.2. Perhitungan konsentrasi sebaran ozon tertinggi dari cerobong iradiator gamma pada x (1,2,3,4,5,6 meter); y (0.5,1,1.5,2,2.5,3 meter); z = 0

Perhitungan ini didasarkan pada asumsi bahwa untuk nilai sebaran ozon tertinggi berada pada kondisi kecepatan angin paling minimal yaitu pada perhitungan ini digunakan U = 0.1 m/detik, kestabilan udara digunakan kelas A (sangat tidak stabil) pada pagi/siang dengan intensitas matahari kuat, maka dengan kondisi tersebut dan dengan data yang ada pada Tata Kerja diatas diperoleh hasil perhitungan menggunakan Persamaan 2 dan Tabel 2 diatas sebagai berikut :

- Koordinat (1,0.5,0) →  $\sigma_y = aX^b = 213 \times 0.001^{0,894} = 0.442975 \text{ m}$   
 $\sigma_z = cX^d + f = 440.8 \times 0.001^{1.941} + 9.27 = 9.2707 \text{ m}$

$$\begin{aligned} \chi(x,y,0;H) &= \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_z u} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \\ &\quad \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{H}{\sigma_z} \right)^2 \right] \end{aligned}$$

$$= \frac{0.000707 \text{ g/det}}{3.14 \times 0.442975 \text{ m} \times 9.2707 \text{ m} \times 0.1 \text{ m/det}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{0.5 \text{ m}}{0.442975 \text{ m}} \right)^2 \right] \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{11 \text{ m}}{9.2707 \text{ m}} \right)^2 \right]$$

$$= 0.00014343 \text{ g/m}^3 = 0.067 \text{ ppm}$$

Dengan cara perhitungan yang sama dihasilkan perhitungan konsentrasi sebaran ozon maksimal pada beberapa variasi koordinat terlihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil perhitungan konsentrasi sebaran ozon maksimal dari cerobong iradiator gamma pada x (1,2,3,4,5,6 meter); y (0.5,1,1.5,2,2.5,3 meter); z = 0

Koordinat (m)	c (ppm)	Koordinat (m)	c (ppm)	Koordinat (m)	c (ppm)
1,0.5,0	0.0670	2,0.5,0	0.05667	3,0.5,0	0.04338
1,1,0	0.0099	2,1,0	0.03259	3,1,0	0.03318
1,1.5,0	0.00041	2,1.5,0	0.01296	3,1.5,0	0.02123
1,2,0	0.0000047	2,2,0	0.00356	3,2,0	0.01136
1,2.5,0	0.00000002	2,2.5,0	0.00068	3,2.5,0	0.00508
1,3,0	1.39022E-11	2,3,0	8.9022E-05	3,3,0	0.00190
Koordinat (m)	c (ppm)	Koordinat (m)	c (ppm)	Koordinat (m)	c (ppm)
4,0.5,0	0.03478	5,0.5,0	0.02900	6,0.5,0	0.02489
4,1,0	0.02963	5,1,0	0.02604	6,1,0	0.02303
4,1.5,0	0.02268	5,1.5,0	0.02177	6,1.5,0	0.02024
4,2,0	0.01561	5,2,0	0.01694	6,2,0	0.01689
4,2.5,0	0.00965	5,2.5,0	0.01227	6,2.5,0	0.01338
4,3,0	0.00536	5,3,0	0.00827	6,3,0	0.01007

#### 4.3. Perhitungan konsentrasi sebaran ozon tertinggi dari cerobong iradiator gamma pada x (1,2,3,4,5,6 meter); y=0; z (1,1.5,2,2.5,3 meter)

Perhitungan ini didasarkan pada asumsi bahwa untuk nilai sebaran ozon tertinggi berada pada kondisi kecepatan angin paling minimal yaitu pada perhitungan ini digunakan  $U = 0.1 \text{ m/detik}$ , kestabilan udara digunakan kelas A (sangat tidak stabil) pada pagi/siang dengan intensitas matahari kuat, maka dengan kondisi tersebut dan dengan data yang ada pada Tata Kerja diatas diperoleh hasil perhitungan menggunakan Persamaan 3 dan Tabel 2 diatas sebagai berikut :

- Koordinat (1,0,1)  $\rightarrow \sigma_y = aX^b = 213 \times 0.001^{0.894} = 0.442975 \text{ m}$   
 $\sigma_z = cX^d + f = 440.8 \times 0.001^{1.941} + 9.27 = 9.2707 \text{ m}$

$$X(x,0,z:H) = \frac{Q}{2\pi \sigma_y \sigma_z u} \left\{ \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{z-H}{\sigma_z} \right)^2 \right] + \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{z+H}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right\}$$

$$= \frac{0.000707 \text{ g/det}}{2 \times 3.14 \times 0.442975 \text{ m} \times 9.2707 \text{ m} \times 0.1 \text{ m/det}} \left\{ \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{1 \text{ m} - 11 \text{ m}}{9.2707 \text{ m}} \right)^2 \right] + \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{1 \text{ m} + 11 \text{ m}}{9.2707 \text{ m}} \right)^2 \right] \right\}$$

$$= 2.3617 \times 10^{-4} \text{ g/m}^3 = 0.11029 \text{ ppm}$$

Dengan cara perhitungan yang sama dihasilkan perhitungan konsentrasi sebaran ozon maksimal pada beberapa variasi koordinat terlihat pada Tabel 5

Tabel 5. Hasil perhitungan konsentrasi sebaran ozon maksimal dari cerobong iradiator gamma pada x (1,2,3,4,5,6 meter); y=0; z (1,1.5,2,2.5,3 meter)

Koordinat (m)	c (ppm)
1,0,1.5	0.1133
1,0,2	0.1162
1,0,2.5	0.1189
1,0,3	0.1215
1,0,10	0.1374
1,0,11	0.1359
1,0,15	0.1189

Dari beberapa sampling hasil perhitungan yang telah dilakukan untuk beberapa variasi kondisi paparan konsentrasi ozon yang bernilai tertinggi di permukaan tanah pada koordinat x (1,2,3,4,5,6 meter), y = 0, z = 0 dapat diketahui bahwa besar konsentrasi ozon yang jatuh kepermukaan akan semakin mengecil dengan bertambahnya jarak x terhadap cerobong iradiator dan untuk jarak x = 1 m, y = 0, z = 0 dinyatakan posisi/lokasi tidak aman karena nilai konsentrasi paparan ozon sebesar 0.1266 ppm dimana lebih tinggi dari nilai batas yang diizinkan sebesar 0.1 ppm.

Dan untuk kondisi selanjutnya paparan konsentrasi ozon tertinggi pada variasi beberapa koordinat x (1,2,3,4,5,6 meter), y (0.5,1,1.5,2,2.5,3 meter), z = 0 dapat diketahui bahwa semakin jauh jarak x dan y terhadap cerobong maka semakin mengecil konsentrasi ozon yang tersebar di lingkungan. Untuk posisi/lokasi pada jarak x dan y tersebut dikatakan aman karena besar konsentrasi paparan ozon tidak ada yang melebihi nilai batas yang diizinkan 0.1 ppm.

Kemudian untuk paparan konsentrasi ozon tertinggi pada variasi beberapa koordinat x (1,2,3,4,5,6 meter), y=0, z (1,1.5,2,2.5,3 meter) dapat diketahui bahwa dengan semakin dekat jarak x dan semakin tinggi z maka nilai paparan akan semakin besar, hal tersebut disebabkan karena posisi/lokasi tersebut mendekati lubang outlet cerobong iradiator. Untuk jarak x = 1, dan z = 1,1.5,2,2.5,3 dinyatakan posisi/lokasi tidak aman karena nilai konsentrasi paparan ozon lebih tinggi dari nilai batas yang diizinkan sebesar 0.1 ppm (lihat Tabel 5.)

Beberapa hal yang mempengaruhi konsentrasi ozon yang keluar dari cerobong iradiator, salah satu faktornya yaitu ketinggian semburan ozon ( $\Delta h$ ). Ketinggian semburan yang selalu berubah-ubah disebabkan oleh beberapa faktor, antara lain kecepatan angin, kecepatan emisi gas buang, kecepatan linear gas buang dalam cerobong, percepatan gravitasi, kelas kestabilan udara, serta selisih antara temperatur gas buang dan temperatur udara lingkungan. Semakin tinggi  $\Delta h$  akan semakin menguntungkan, karena akan menyebabkan ketinggian efektif cerobong menjadi lebih tinggi. Dengan demikian proses pengenceran konsentrasi kontaminan di udara semakin baik dan sebaran akan menempuh jarak yang lebih jauh, sehingga mengurangi dampak terhadap penurunan kualitas udara ambient.

## 5. KESIMPULAN

Dari hasil perhitungan sebaran ozon yang keluar dari cerobong iradiator diperoleh bahwa desain sistem ventilasi dengan ketinggian cerobong efektif 11 m telah memenuhi syarat karena besar paparan yang dihasilkan di luar instalasi iradiator gamma pada beberapa lokasi jauh dibawah nilai batas yang diizinkan yaitu 0,1 ppm sehingga tidak membahayakan penduduk dan ekosistem di permukaan tanah / sekitar instalasi iradiator. Selain ketinggian efektif dari cerobong hal lain yang mempengaruhi besar sebaran ozon yang keluar di sekitar instalasi iradiator adalah kapasitas dari blower penghisap ozon, jika semakin besar energi dari sumber CO-60 yang digunakan selama proses iradiasi maka semakin besar pula kapasitas blower penghisap yang dibutuhkan. Untuk memenuhi kebutuhan keselamatan dan memenuhi persyaratan nilai batas sebaran ozon yang diizinkan keluar lingkungan yaitu 0,1 ppm maka untuk mendesain ketinggian cerobong dan blower penghisap ozon digunakan desain kapasitas maksimum iradiator. Dan hubungan jarak x, y, dan z dapat diketahui bahwa semakin jauh jarak x dan y dari instalasi iradiator gamma maka besar sebaran paparan ozon akan semakin kecil, dan bila jarak ketinggian z semakin tinggi maka maka besar sebaran paparan ozon akan semakin besar karena semakin mendekati lubang outlet dari cerobong.

## 6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Bruce Turner., 1971, *Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates*, Research Triangle Park, North Carolina.
- [2] Anonim, 2003, (diakses tanggal 20 Desember 2011), *Cara NASA Mengurangi Emisi Cerobong Asap*. [terhubung berkala]  
<http://majalah.tempointeraktif.com/id/arsip/2003/10/06/INO/mbm.20031006.INO90725.id.html>
- [3] Budirahardjo, E., 2000, *Prediksi Dampak Penurunan Kualitas Udara Dengan Modeling Matematika*, Universitas Trisakti, Jakarta.
- [4] Fatimah, R., 2008, *Pemantauan Partikulat di Udara Ambien Secara Simultan Untuk Daerah Urban dan Non-urban*. Institut Teknologi Bandung (tidak dipublikasikan)
- [5] Wardhana, W.A., 1995, *Dampak Pencemaran Lingkungan*. Andi Offset. Yogyakarta.