

## **PENGARUH TINGGI LEPASAN EFEKTIF TERHADAP DISPERSI ATMOSFERIK ZAT RADIOAKTIF (STUDI KASUS: CALON TAPAK PLTN BANGKA BELITUNG)**

**Arif Yuniarto<sup>1</sup>, Gabriel Soedarmini Boedi Andari<sup>2</sup>, Syahrir<sup>1</sup>**

1. Pusat Pendayagunaan Informatika dan Kawasan Strategis Nuklir- BATAN  
Kawasan PUSPIPTEK Serpong, Tangerang Selatan
2. Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Depok

### **ABSTRAK**

**PENGARUH TINGGI LEPASAN EFEKTIF TERHADAP DISPERSI ATMOSFERIK ZAT RADIOAKTIF (STUDI KASUS: CALON TAPAK PLTN BANGKA BELITUNG).** Nuklir merupakan sumber energi alternatif yang dapat dipertimbangkan dalam konteks bauran energi. Studi awal tapak PLTN dilakukan di Bangka Barat dan Bangka Selatan, Bangka Belitung. Salah satu aspek penting dalam konstruksi PLTN adalah dampak radiologi terhadap masyarakat akibat lepasan zat radioaktif atmosferik. Dampak radiologi PLTN dipengaruhi oleh dispersi zat radioaktif di udara. Penelitian ini mengkaji pengaruh tinggi lepasan efektif terhadap pola sebaran zat radioaktif dengan pendekatan *Gaussian Plume Model* menggunakan PC-CREAM 08. Dari hasil perhitungan, dispersi zat radioaktif pada tiap lokasi tapak memiliki pola yang berbeda akibat frekuensi distribusi arah angin, kecepatan angin dan stabilitas atmosfer. Pada kajian ini, stabilitas atmosfer ditentukan menggunakan metode *Solar Radiation Delta Temperature*. Distribusi spasial zat radioaktif untuk variasi ketinggian lepasan pada lokasi tapak yang sama memiliki kecenderungan yang sama, namun tinggi lepasan yang lebih rendah menghasilkan konsentrasi maksimum zat radioaktif yang lebih tinggi. Pola sebaran zat radioaktif pada masing-masing tapak dipengaruhi oleh frekuensi distribusi arah dan kecepatan angin. Namun demikian, arah angin dominan pada tapak Bangka Barat dan Bangka Selatan bertiup dengan arah yang mirip, yaitu dari arah ESE menuju WNW. Konsentrasi zat radioaktif di udara baik di Bangka Barat maupun Bangka Selatan jauh di bawah baku mutu tingkat radioaktivitas yang ditetapkan oleh badan pengawas. Hal ini menunjukkan bahwa dampak dispersi atmosferik PLTN di calon tapak Bangka Belitung tidak signifikan terhadap keselamatan lingkungan dan masyarakat. Untuk lebih merepresentasikan dampak radiologis, perlu dilakukan estimasi dosis individual masyarakat.

**Kata kunci:** tinggi lepasan efektif, dispersi atmosferik, zat radioaktif

### **ABSTRACT**

**EFFECT OF EFFECTIVE RELEASE HEIGHT ON ATMOSPHERIC DISPERSION OF RADIOACTIVE MATERIAL (CASE STUDY: CANDIDATE SITES FOR NPP IN BANGKA BELITUNG).** Nuclear is an alternative energy resource that can be considered in the context of energy mix. Preliminary studies was carried out on nuclear power plant site in West Bangka and South Bangka, Bangka Belitung. One of the important aspects in construction of nuclear power plants is radiological impact on society due to atmospheric releases of radioactive substances. This study examines the effect of effective release height on dispersion pattern of radioactive substances with *Gaussian Plume Model* using PC-CREAM 08. From calculation results, the dispersion of radioactive substances at each site has different patterns due to the frequency distribution of wind direction, wind speed and atmospheric stability. In this study, atmospheric stability was determined using *Solar Radiation Delta Temperature* method. Spatial distribution of radioactive substances in various altitude on the same site has similar tendency, but lower effective release height causes higher maximum concentration of radioactive substances. Dispersion pattern of radioactive substances on each site was influenced by the frequency distribution of wind direction and speed. Nevertheless, the dominant wind direction at the site of West and South Bangka Bangka blows a similar direction, i.e from the ESE to the WNW. Concentration of radioactive substances in the air both in the West and South Bangka Bangka far below the standard level of radioactivity was determined by regulatory body. This indicates that the effects of atmospheric dispersion of nuclear power plants in Bangka Belitung was no significant on environment and public safety. For better represent of radiological impact, it is necessary to estimate individual doses of public members.

**Keywords:** effective release height, atmospheric dispersion, radioactive substances

## PENDAHULUAN

Permasalahan ketahanan energi nasional merupakan aspek penting di dalam kelangsungan pembangunan nasional. Peningkatan kebutuhan energi terus terjadi akibat pertumbuhan jumlah penduduk dan kegiatan sektor industri. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral menyatakan bahwa hasil proyeksi dalam draft Rencana Umum Ketenagalistrikan Nasional (RUKN) 2012–2031 [1] menunjukkan pertumbuhan kelistrikan nasional tiap tahunnya meningkat rata-rata 11 persen, dengan rincian 9,2 persen untuk Jawa-Bali dan 14,8 persen untuk luar Jawa-Bali [1]. Sementara kebutuhan energi listrik nasional pada 2012 berkisar 171 terawatt hour (TWh), dan diperkirakan akan meningkat menjadi sekitar 1.248 TWh pada 2031, sehingga kebutuhan tambahan daya nasional sekitar 272 GW atau rata-rata 13,6 GW hingga 2031.

Dalam menyikapi persoalan energi tersebut, pemerintah mencoba menuangkan rencana perwujudan ketahanan energi dengan menyusun beberapa peraturan perundang-undangan, misalnya Undang-undang Nomor 30 Tahun 2007 tentang Energi [2] dan Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2006 tentang Kebijakan Energi Nasional [3]. Kebijakan-kebijakan tersebut mengisyaratkan pemerintah memiliki komitmen untuk mewujudkan ketahanan energi dengan mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil dan meningkatkan diversifikasi energi melalui alternatif energi baru dan energi terbarukan. Energi nuklir merupakan pilihan alternatif sumber energi baru yang dapat dipertimbangkan dalam konteks bauran energi. Di dalam Undang-undang No.17 Tahun 2007 tentang Rencana Pembangunan Jangka Panjang Nasional, tahun 2005–2025 pada Bab IV telah mengamanatkan pada butir IV.2.3. RPJM ke-3 (2015 – 2019) untuk mulai dimanfaatkannya tenaga nuklir sebagai pembangkit listrik dengan mempertimbangkan faktor keselamatan secara ketat [4]. Energi nuklir memiliki beberapa kelebihan yang dapat dipertimbangkan, antara lain sedikit menghasilkan gas rumah kaca, rasio bahan bakar yang diperlukan dengan energi yang dihasilkan sangat besar, memiliki fitur keselamatan dan keamanan yang ketat, serta suplai listrik yang cenderung stabil. Di samping itu, memang tidak dapat dipungkiri adanya kelemahan yang perlu dimitigasi, seperti aspek efek radiasi dan pengelolaan limbah radioaktif.

Studi pemilihan tapak Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) di Indonesia sudah dimulai sejak tahun 1990-an. Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) sebagai lembaga pemerintah yang bertugas mengembangkan teknologi nuklir termasuk PLTN, terus melaksanakan kajian di berbagai daerah untuk mendapatkan alternatif tapak PLTN. Pada tahun 2010, studi awal tapak PLTN dilakukan di Provinsi Bangka Belitung, tepatnya di Kabupaten Bangka Barat dan Bangka Selatan. Kedua daerah tersebut dinilai potensial untuk dijadikan tapak PLTN. Studi kelayakan terus dilakukan sehingga diharapkan ada banyak informasi yang dapat dijadikan dasar pertimbangan teknis pemerintah terkait kebijakan energi nasional.

Salah satu aspek yang perlu diperhatikan dalam konstruksi PLTN adalah adanya dampak radiologi terhadap lingkungan dan masyarakat akibat potensi lepasan material radioaktif ke atmosfer melalui cerobong. Walaupun fitur keselamatan reaktor generasi baru sudah sangat ketat, potensi lepasan ke lingkungan perlu dikaji dan dibandingkan dengan batas dosis radiologi (resiko radiologi) yang aman bagi masyarakat. Dampak radiologi dari dispersi material radioaktif di udara sangat dipengaruhi oleh jenis zat radioaktif, desain reaktor, faktor meteorologi, aspek demografi dan perilaku hidup masyarakat. Penelitian ini mengkaji pengaruh tinggi lepasan efektif terhadap pola sebaran zat radioaktif dengan pendekatan *Gaussian Plume Model* menggunakan PC-CREAM 08.

Zat radioaktif yang dilepaskan pada ketinggian tertentu akan terdispersi sesuai dengan kondisi meteorologi pada ketinggian tersebut. Pada kondisi meteorologi yang berbeda, zat radioaktif mengalami proses penyebaran yang berbeda pula. Faktor-faktor meteorologi seperti arah angin, kecepatan angin dan suhu, memiliki sifat berbeda pada ketinggian yang berbeda. Oleh karena itu, perlu adanya kajian untuk mengetahui pengaruh tinggi lepasan efektif terhadap pola sebaran zat radioaktif yang pada akhirnya berdampak pada dosis radiologi terhadap masyarakat sekitar fasilitas nuklir.

## DASAR TEORI

### Model Dispersi Zat Radioaktif di Udara.

Ada beberapa model yang dapat digunakan untuk mengkaji dispersi zat radioaktif di udara, antara lain *Lagrangian Puff Model* dan *Eulerian grid model*. Kedua model tersebut memberikan representasi rinci mengenai proses fisik difusi turbulen. Namun, keduanya dianggap tidak sesuai dan terlalu membebani komputer terkait metodologi lepasan dalam durasi yang panjang (operasi normal atau rutin PLTN) di mana diperlukan asumsi yang lebih sederhana. Sebagai contoh, difusi arah angin

dapat diabaikan dalam kasus ini. Model yang paling dikenal berguna untuk memprediksi dispersi dalam kondisi tersebut adalah *Gaussian Plume Model* (GPM). Model ini banyak diadopsi karena relatif mudah untuk diterapkan, dan nilai parameter terkait dengan jumlah mudah terukur seperti kecepatan angin dan awan. Model ini juga dianggap sesuai di mana titik akhir dari perhitungan merupakan rata-rata jangka panjang atau konsentrasi waktu terintegrasi di udara, seperti yang biasa dilakukan pada kajian dosis untuk lepasan kontinu. Model Gaussian terdiri dari persamaan tunggal. Persamaan Gaussian diperoleh dengan memecahkan asumsi persamaan difusi turbulensi homogen dan keseragaman kondisi angin. Kondisi beluk ditentukan oleh koefisien dispersi horizontal ( $\sigma_y$ ) dan koefisien distribusi vertikal ( $\sigma_z$ ). Nilai  $\sigma_y$  dan  $\sigma_z$  merupakan suatu fungsi dari jarak reseptor. Model ini adalah yang paling banyak digunakan dalam perhitungan dispersi atmosfer, dan telah digunakan secara luas untuk mempelajari konsekuensi dari dampak radiologi dan lingkungan di bawah rekomendasi IAEA. Persamaan Umum Model Gaussian ditunjukkan pada Persamaan 1 [5]:

$$X(x, y, z) = \frac{Q_o}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left[-\left(\frac{y^2}{2\sigma_y^2} + \frac{(z-h_e)^2}{2\sigma_z^2}\right)\right] \dots\dots\dots (1)$$

di mana:

- X (x,y,z) = konsentrasi di udara pada titik (x,y,z), (Bq/m<sup>3</sup>)
- x = jarak sejajar arah angin, (m)
- y = jarak tegak lurus arah angin, (m)
- z = ketinggian dari atas tanah, (m)
- $\sigma_y$  = koefisien dispersi horizontal (m)
- $\sigma_z$  = koefisien dispersi vertikal (m)
- Q<sub>o</sub> = laju lepasan (Bq/s)
- u = kecepatan angin rata-rata (m/s)
- h<sub>e</sub> = tinggi lepasan efektif (m)

**Faktor Meteorologi**

Meteorologi merupakan ilmu yang mempelajari tentang atmosfer. Kondisi atmosfer pada suatu saat disebut cuaca, sedangkan rata-rata dari cuaca dalam periode yang panjang disebut iklim. Unsur utama pembentuk cuaca dan iklim adalah suhu udara, tekanan udara, kelembaban udara, curah hujan, angin dan durasi pancaran sinar matahari.

Stabilitas atmosfer merupakan salah satu parameter yang diperlukan dalam pemodelan kualitas dispersi udara untuk memperkirakan parameter dispersi lateral dan vertikal yang digunakan dalam pendekatan GPM. Seringkali kelas stabilitas atmosfer didefinisikan sebagai A (sangat tidak stabil), B (tidak stabil), C (agak tidak stabil), D (netral), E (agak stabil), dan F (stabil). Dalam beberapa hal, ada stasiun meteorologi yang memiliki sensor untuk mengukur stabilitas atmosfer. Namun ada beberapa stasiun yang tidak memiliki sensor stabilitas atmosfer. Jika stabilitas atmosfer tidak dapat diukur secara langsung menggunakan sensor, maka penentuannya dapat menggunakan beberapa metode, misalnya metode *Turner*, metode *Solar Radiation Delta Temperature* (SRDT), dan metode *sigma theta*. Data dari stasiun pengamatan akan diolah dengan menggunakan metode *Solar Radiation Delta Temperature* (SRDT) untuk penentuan kelas stabilitas yang diperlukan untuk analisis dispersi. Metode ini menggunakan lapisan permukaan kecepatan angin (diukur pada atau dekat 10 m) dalam kombinasi dengan pengukuran radiasi matahari total setiap siang hari dan tingkat rendah vertikal dari perbedaan suhu ( $\Delta T$ ) pada malam hari [6].

**TATA KERJA**

**Bahan dan Alat**

Bahan yang digunakan dalam kajian ini merupakan data sekunder dari publikasi kajian mengenai calon tapak PLTN Bangka Belitung yang meliputi data reaktor, data meteorologi, peta lokasi dan data demografi (distribusi penduduk, tata guna lahan, produksi dan konsumsi makanan, perilaku hidup masyarakat). Data reaktor yang digunakan mengacu pada jenis reaktor AP1000. Data meteorologi yang digunakan dalam kajian ini merupakan data calon tapak PLTN Bangka Belitung tahun 2012, meliputi arah angin, kecepatan angin, suhu udara, radiasi matahari dan curah hujan pada ketinggian 10, 40, 60 dan 80 meter [7].

Alat digunakan dalam melakukan kajian dampak dispersi atmosferik zat radioaktif antara lain perangkat lunak PC-CREAM 08 untuk menghitung konsentrasi zat radioaktif dengan pendekatan *Gaussian Plume Model* (GPM), perangkat lunak WRPLOT View untuk menggambarkan cakrawala angin (*windrose*), perangkat lunak Met.Ana untuk menentukan kelas stabilitas atmosferik dan *joint*

*frequency distribution*, serta Arcview GIS 3.3 untuk mengolah data konsentrasi pada tiap titik reseptor.

### **Metode**

Dalam kajian ini, parameter yang dijadikan sebagai variabel bebas antara lain tinggi lepasan efektif dan lokasi tapak. Variasi tinggi lepasan efektif disesuaikan dengan ketersediaan data meteorologi, yaitu pada ketinggian 40, 60 dan 80 meter. Berdasarkan studi awal, Provinsi Bangka Belitung memiliki dua tapak calon PLTN potensial, yaitu di Kabupaten Bangka Barat dan Bangka Selatan. Variabel-variabel bebas tersebut diamati pengaruhnya terhadap variabel terikat, yaitu konsentrasi zat radioaktif pada tiap titik reseptor.

Pada tahap pertama dilakukan pengolahan data masukan yang akan digunakan dalam proses kajian. Data reaktor diolah untuk menentukan suku sumber (lepasan radioaktif). Data meteorologi diolah untuk mendapatkan distribusi arah angin dan stabilitas atmosferik (*joint frequency distribution*) pada tiap-tiap variasi tinggi lepasan efektif (40, 60 dan 80 meter). Stabilitas atmosferik diperoleh dengan metode SRDT.

Pada tahap kedua dilakukan perhitungan konsentrasi radionuklida dengan menggunakan hasil pengolahan data masukan yang diperoleh pada tahap pertama. Data masukan yang digunakan pada tahap ini antara lain suku sumber lepasan radioaktif dan data *joint frequency distribution* meteorologi. Perhitungan konsentrasi dilakukan dengan pendekatan *Gaussian Plume Model* menggunakan PC-CREAM 08. Data konsentrasi zat radioaktif diplotkan ke dalam peta menggunakan Arcview GIS 3.3.

Pada tahap ketiga dilakukan analisis pengaruh tinggi lepasan efektif terhadap dispersi zat radioaktif di udara yang ditunjukkan dengan hasil perhitungan konsentrasi zat radioaktif pada tiap area studi. Konsentrasi maksimum zat radioaktif di udara dibandingkan dengan baku mutu tingkat radioaktivitas lingkungan sebagai verifikasi awal terhadap tingkat keselamatan masyarakat di sekitar tapak dari aspek lepasan atmosferik.

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

Dalam penelitian ini, jenis reaktor yang dipilih adalah tipe *Pressurized Water Reactor* (PWR) AP-1000. Pemilihan AP-1000 didasarkan pada kehandalan teknologi yang telah terbukti beroperasi di beberapa negara. Jenis dan jumlah zat radioaktif yang lepas dari cerobong reaktor diambil dari "*Westinghouse AP1000 Design Control Document Rev. 19*" [8]. Ringkasan suku sumber reaktor AP1000 ditunjukkan pada Tabel 1.

Area studi sebaran konsentrasi zat radioaktif di udara disusun dalam jarak 50 km dari pusat tapak (dibagi 17 segmen) dan 16 arah mata angin. Setiap kisi diberi nomor yang disusun ke arah jarak dan berputar searah jarum jam ke seluruh arah mata angin,. Dengan demikian, nomor kisi terkecil (nomor 1) melingkupi radius 0,5 km arah N, sedangkan nomor kisi terbesar (nomor 272) melingkupi radius 50 km arah NNW. Penyusunan area studi dalam kisi-kisi yang diberi nomor bertujuan untuk mempermudah identifikasi lokasi tata guna lahan dan analisis distribusi spasial konsentrasi zat radioaktif di udara.

Data arah dan kecepatan angin diolah menggunakan WRPLOT View untuk menggambarkan cakra angin (*windrose*) sebagai perkiraan awal dispersi zat radioaktif di udara. Cakra angin pada Gambar 1 menunjukkan frekuensi angin yang bertiup dari (*blowing from*) arah tertentu menuju ke arah kebalikannya dengan kecepatan tertentu. Pada tapak Bangka Barat dan Bangka Selatan arah angin dominan bertiup dari arah ESE menuju WNW. Secara umum, cakra angin di tiap tapak dengan ketinggian berbeda memiliki kecenderungan arah angin yang hampir sama. Namun demikian, elevasi yang lebih tinggi memiliki kecepatan angin yang lebih besar daripada elevasi yang lebih rendah. Hal ini menunjukkan bahwa pada elevasi yang lebih tinggi, angin cenderung bertiup lebih cepat daripada elevasi yang lebih rendah.

Data meteorologi tiap jam selama satu tahun berupa kecepatan angin, suhu udara dan radiasi matahari diolah menggunakan metode *Solar Radiation Delta Temperature* (SRDT) untuk penentuan kelas stabilitas tiap jam yang diperlukan untuk analisis dispersi dengan *software* Met.Ana. Setelah diperoleh kelas stabilitas atmosfer, disusun *joint frequency distribution* antara arah angin dan kelas stabilitas yang digunakan sebagai parameter *input* dalam analisis PC-CREAM. Penyusunan *joint frequency distribution* dibedakan tiap ketinggian untuk mengetahui variabel pengaruh tinggi lepasan. Untuk keperluan kajian dispersi zat radioaktif dengan PC-CREAM, arah hembusan angin perlu dibalik sehingga menunjukkan frekuensi arah angin yang bertiup ke (*blowing to*) arah mata angin

tertentu. Hal ini dilakukan karena analisis dilakukan terhadap wilayah yang terkena dampak, yaitu wilayah di mana angin menuju.

**Tabel 1.** Suku Sumber Reaktor AP1000 [8]

Radionuklida <sup>(1)</sup>	Laju lepasan (Bq/tahun) <sup>(2)</sup>	Radionuklida <sup>(1)</sup>	Laju lepasan (Bq/tahun) <sup>(2)</sup>
Ar-41	1.26E+12	Rb-88 (Kr-88)	Kr-88
Ba-140	1.55E+07	Mn-54	1.59E+07
La-140 (Ba-140)	Ba-140	Nb-95	9.25E+07
C-14	2.70E+11	Ru-103	2.96E+06
Ce-141	1.55E+06	Rh-103m (Ru-103)	Ru-103
Co-57	3.03E+05	Ru-106	2.89E+06
Co-58	8.51E+08	Rh-106 (Ru-106)	Ru-106
Co-60	3.22E+08	Sb-125	2.26E+06
Cr-51	2.26E+07	Te-125m (Sb-125)	Sb-125
Cs-134	8.51E+07	Sr-89	1.11E+08
Cs-137	1.33E+08	Sr-90	4.44E+07
Ba-137m (Cs-137)	Cs-137	Y-90 (Sr-90)	Sr-90
Fe-59	2.92E+06	Xe-131m	3.22E+12
H-3	1.30E+13	Xe-133	1.70E+14
I-131	4.44E+09	Xe-133m	3.22E+12
Xe-131m (I-131)	I-131	Xe-133 (Xe-133m)	Xe-133m
I-133	1.48E+10	Xe-135	1.22E+13
Xe-133 (I-133)	I-133	Cs-135 (Xe-135)	Xe-135
Xe-133m (I-133)	I-133	Xe-135m	2.59E+11
Kr-85	1.52E+14	Xe-135 (Xe-135m)	Xe-135m
Kr-85m	1.33E+12	Xe-138	2.22E+11
Kr-85 (Kr-85m)	Kr-85m	Cs-138 (Xe-138)	Xe-138
Kr-87	5.55E+11	Zr-95	3.70E+07
Rb-87 (Kr-87)	Kr-87	Nb-95 (Zr-95)	Zr-95
Kr-88	1.70E+12	Nb-95m (Zr-95)	Zr-95

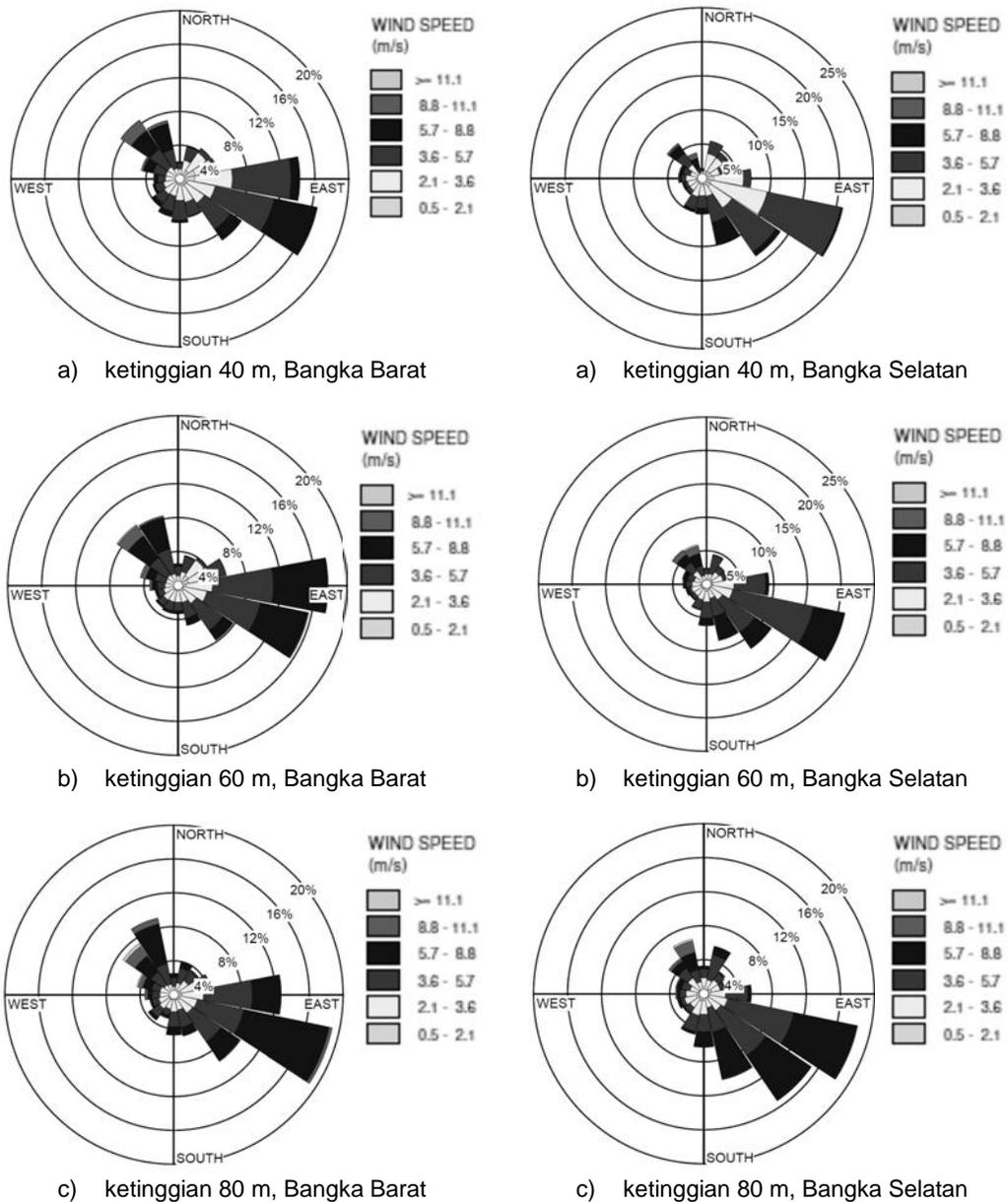
(1) : Radionuklida sesuai suku sumber AP-1000

(2) : Laju lepasan sesuai suku sumber AP-1000

Konsentrasi radionuklida di udara dianalisis dengan model PLUME yang ada di PC-CREAM. Parameter input yang digunakan dalam perhitungan model tersebut antara lain suku sumber reaktor (radionuklida dan jumlah lepasannya), jarak titik reseptor yang akan diamati (sesuai penyusunan kisi), tinggi lepasan efektif, tingkat kekasaran tapak (*roughness length*) dan data meteorologi.

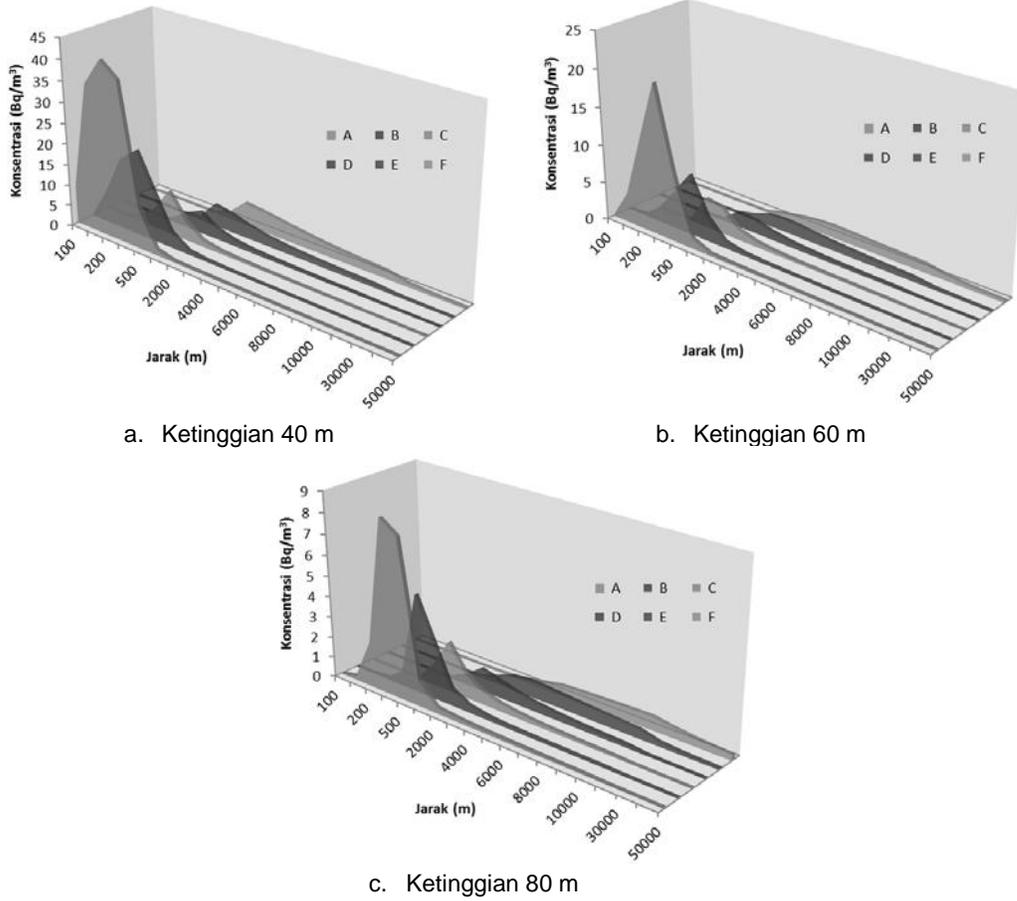
Konsentrasi radionuklida hasil perhitungan dikategorikan berdasarkan kelas stabilitas atmosfer untuk tiap ketinggian dan lokasi tapak, seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Dari ilustrasi tersebut dapat disimpulkan bahwa kelas stabilitas tidak stabil (A, B dan C) cenderung menghasilkan konsentrasi radionuklida yang lebih tinggi pada jarak yang lebih dekat dari titik lepasan kemudian turun secara signifikan pada jarak yang lebih jauh dari titik lepasan. Pada kelas stabilitas netral (D) grafik konsentrasi radionuklida terhadap jarak dari titik lepasan cenderung lebih landai daripada kelas stabilitas tidak stabil. Demikian pula untuk kelas stabilitas yang lebih stabil (E dan F) grafik konsentrasi radionuklida terhadap jarak dari titik lepasan cenderung lebih landai lagi daripada kelas stabilitas netral. Hubungan konsentrasi terhadap jarak dari titik lepasan untuk tiap kelas stabilitas ini sejalan dengan kajian Simulasi Penyebaran Efluen Radioaktif Melalui Udara: Studi Kasus PLTN Jepara, halaman 71 [9]. Dalam kajian tersebut dinyatakan bahwa pada kelas yang lebih stabil, puncak konsentrasi berada pada kisaran jarak yang lebih jauh. Sebaliknya, semakin labil maka puncak konsentrasi akan berada pada jarak yang lebih dekat dari titik lepasan.

Secara umum, perbedaan tinggi lepasan memberikan grafik konsentrasi terhadap jarak yang cenderung sama. Namun demikian, konsentrasi maksimum radionuklida lebih besar untuk titik lepasan yang lebih rendah, seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Pada tinggi lepasan yang lebih rendah, angin yang bertiup merupakan angin dengan kelas kecepatan yang rendah pula sehingga zat radioaktif cenderung terakumulasi pada jarak yang lebih dekat dari titik lepasan. Sebaliknya, pada titik lepasan yang lebih tinggi, kecepatan angin terdistribusi mulai dari kecepatan angin yang rendah hingga tinggi sehingga zat radioaktif terdispersi secara merata hingga jarak yang jauh dari titik lepasan.

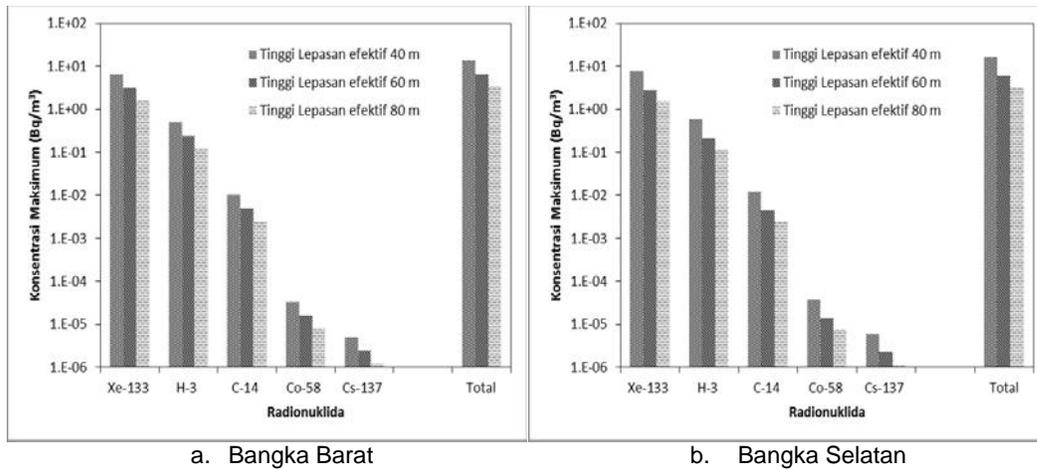


**Gambar 1.** Cakra angin di Calon Tapak PLTN Bangka Belitung

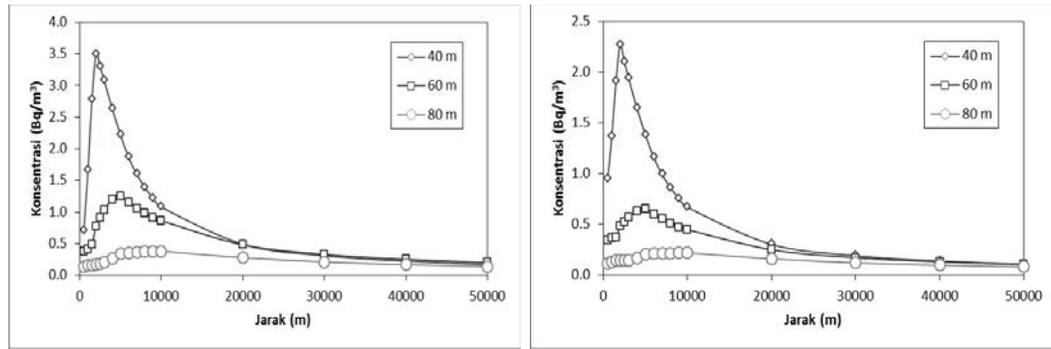
Untuk mempertegas kesimpulan pengaruh tinggi lepasan terhadap dispersi zat radioaktif, konsentrasi radionuklida tiap ketinggian dianalisis pola dispersinya pada jarak tertentu dari titik lepasan. Secara umum, dispersi zat radioaktif di semua sektor menunjukkan kemiripan pola sebaran. Dalam hal ini diambil contoh pola dispersi zat radioaktif pada sektor 12 (arah WSW), baik di tapak Bangka Barat maupun Bangka Selatan, seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Dari gambar tersebut dapat disimpulkan bahwa tinggi lepasan yang lebih rendah menghasilkan grafik konsentrasi radionuklida dengan puncak yang lebih tinggi dan berada lebih dekat dari titik lepasan, seperti telah dibahas di atas.



Gambar 2. Konsentrasi Radionuklida Tiap Kelas Stabilitas



Gambar 3. Konsentrasi Maksimum Radionuklida Tiap Tinggi Lapisan



a. Bangka Barat

b. Bangka Selatan

**Gambar 4.** Dispersi Konsentrasi Radionuklida pada Tiap Jarak dan Ketinggian

Sebagai verifikasi awal terhadap tingkat keselamatan masyarakat di sekitar tapak, konsentrasi maksimum zat radioaktif di udara untuk tiap lokasi tapak dan tinggi lepasan dibandingkan dengan baku mutu tingkat radioaktivitas yang ditetapkan pada Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 7 Tahun 2013 Tentang Nilai Batas Radioaktivitas Lingkungan [10]. Perbandingan antara konsentrasi maksimum zat radioaktif di udara hasil perhitungan dan baku tingkat radioaktivitas berkisar pada orde  $10^{-15}$  hingga  $10^{-7}$  seperti ditunjukkan pada Tabel 2. Hal ini mengindikasikan bahwa konsentrasi di udara jauh di bawah ambang baku mutu.

**Tabel 2.** Perbandingan Konsentrasi Maksimum di Udara dan Baku Tingkat Radioaktivitas

Radionuklida	Baku Mutu Tingkat Radioaktivitas Perka BAPETEN ( $Bq/m^3$ ) [10]	Konsentrasi Maksimum Bangka Barat ( $Bq/m^3$ )			Konsentrasi Maksimum Bangka Selatan ( $Bq/m^3$ )		
		40 m	60 m	80 m	40 m	60 m	80 m
Ce-141	3.60E+03	5.95E-08	2.85E-08	1.44E-08	6.88E-08	2.54E-08	1.36E-08
Co-58	3.00E+02	3.27E-05	1.56E-05	7.90E-06	3.78E-05	1.39E-05	7.47E-06
Co-60	4.90E+01	1.24E-05	5.91E-06	2.99E-06	1.43E-05	5.27E-06	2.83E-06
Cr-51	2.20E+04	8.67E-07	4.15E-07	2.10E-07	1.00E-06	3.70E-07	1.98E-07
Cs-134	2.00E+01	3.27E-06	1.56E-06	7.90E-07	3.78E-06	1.39E-06	7.47E-07
Cs-135	2.40E+03	6.90E-12	3.88E-12	2.87E-12	1.35E-11	7.62E-12	5.42E-12
Cs-137	1.30E+01	5.10E-06	2.44E-06	1.23E-06	5.90E-06	2.18E-06	1.17E-06
Fe-59	3.60E+02	1.12E-07	5.36E-08	2.71E-08	1.30E-07	4.78E-08	2.56E-08
I-131	5.30E+02	1.69E-04	8.13E-05	4.10E-05	1.91E-04	7.24E-05	3.87E-05
I-133	1.70E+04	5.64E-04	2.71E-04	1.36E-04	6.27E-04	2.41E-04	1.29E-04
Mn-54	8.30E+01	3.55E-06	1.70E-06	8.59E-07	7.06E-07	2.60E-07	1.40E-07
Nb-95	7.70E+02	5.17E-10	3.15E-10	2.56E-10	4.11E-06	1.51E-06	8.12E-07
Ru-103	1.00E+03	8.67E-08	4.15E-08	2.10E-08	1.31E-07	4.84E-08	2.60E-08
Ru-106	1.10E+02	4.26E-06	2.04E-06	1.03E-06	1.28E-07	4.73E-08	2.54E-08
Sb-125	4.90E+01	1.70E-06	8.15E-07	4.12E-07	1.00E-07	3.70E-08	1.98E-08
Sr-89	1.10E+03	1.91E-11	1.17E-11	9.49E-12	4.93E-06	1.82E-06	9.74E-07
Sr-90	3.90E+01	1.24E-01	5.92E-02	2.99E-02	1.97E-06	7.26E-07	3.90E-07
Te-125m	2.40E+03	1.72E-07	9.90E-08	7.28E-08	3.76E-11	2.33E-11	1.80E-11
Y-90	3.20E+04	1.60E-08	9.73E-09	7.36E-09	1.60E-08	9.73E-09	7.36E-09
Zr-95	2.20E+02	1.64E-06	6.05E-07	3.25E-07	1.64E-06	6.05E-07	3.25E-07

## KESIMPULAN

Untuk variasi ketinggian lepasan pada lokasi tapak yang sama, distribusi spasial zat radioaktif memiliki kecenderungan yang sama. Namun tinggi lepasan yang lebih rendah menghasilkan konsentrasi maksimum zat radioaktif yang lebih tinggi.

Dispersi zat radioaktif pada lokasi tapak Bangka Barat dan Bangka Selatan memiliki pola yang berbeda. Pola sebaran zat radioaktif pada masing-masing tapak dipengaruhi oleh frekuensi distribusi arah dan kecepatan angin. Hal ini ditunjukkan oleh kemiripan pola cakra angin (*windrose*) dengan peta sebaran zat radioaktif pada tiap lokasi tapak. Namun demikian, arah angin dominan pada tapak Bangka Barat dan Bangka Selatan bertuip dengan arah yang mirip, yaitu dari arah ESE menuju WNW.

Pada tinggi lepasan yang lebih rendah, angin yang bertiup merupakan angin dengan kelas kecepatan yang rendah pula sehingga zat radioaktif cenderung terakumulasi pada jarak yang lebih dekat dari titik lepasan. Sebaliknya, pada titik lepasan yang lebih tinggi, kecepatan angin terdistribusi mulai dari kecepatan angin yang rendah hingga tinggi sehingga zat radioaktif terdispersi secara merata hingga jarak yang jauh dari titik lepasan.

Konsentrasi zat radioaktif di udara baik di Bangka Barat maupun Bangka Selatan jauh di bawah baku tingkat radioaktivitas yang ditetapkan oleh badan pengawas. Perbandingan antara konsentrasi maksimum zat radioaktif di udara hasil perhitungan dan baku tingkat radioaktivitas peraturan berkisar pada orde  $10^{-15}$  hingga  $10^{-7}$ .

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, "Draft Rencana Umum Ketenagalistrikan Nasional (RUKN) 2012 – 2031," Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, Jakarta, 2012.
- [2] Undang-undang Republik Indonesia Nomor 30 Tahun 2007 tentang Energi. [Art].
- [3] Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2006 tentang Kebijakan Energi Nasional.
- [4] Undang-undang Republik Indonesia No.17 Tahun 2007 tentang Rencana Pembangunan Jangka Panjang Nasional tahun 2005 – 2025.
- [5] Radiation Protection Division, The Methodology for Assessing the Radiological Consequences of Routine Releases of Radionuclides to the Environment Used in PC-CREAM 08, Vols. HPA-RPD-058, Oxfordshire: Health Protection Agency, Centre for Radiation, Chemical and Environmental Hazards, 2009.
- [6] Environmental Protection Agency, "Meteorological Monitoring Guidance for Regulatory Modeling Applications, US EPA, 2000," US EPA, 2000.
- [7] Nuclear National Energy Agency of Indonesia (BATAN), "Draft of NPP Master Plan for Nuclear Power Plant - Nuclear Power Plant Siting Project at Bangka Island Bangka Belitung Province," PT. Surveyor Indonesia and AF-Consult Switzerland Ltd., Jakarta, 2013.
- [8] United States Nuclear Regulatory Commission, "Westinghouse AP1000 Design Control Document Rev. 19," 2011.
- [9] Y. S. B. Susilo, "Simulasi penyebaran efluen radioaktif melalui udara: studi kasus PLTN Jepara," Pasca Sarjana Program Studi Ilmu Lingkungan, Jakarta, 1999.
- [10] Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 7 Tahun 2013 Tentang Nilai Batas Radioaktivitas Lingkungan.