

PENENTUAN ZONA KEDARURATAN NUKLIR LUAR TAPAK (OFF-SITE) DI INDONESIA

Pande Made Udiyani, Sri Kuntjoro

Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir - BATAN

Gd.80 Puspiptek Serpong

email: pmade-u@batan.go.id

ABSTRAK

PENENTUAN ZONA KEDARURATAN NUKLIR OFF-SITE (LUAR TAPAK) DI INDONESIA. Belajar dari kejadian Fukushima terutama dalam manajemen penanganan kedaruratan nuklir setelah kejadian perlu dibahas kembali untuk meningkatkan persepsi masyarakat Indonesia tentang keamanan dan keselamatan nuklir Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN). Zonasi kedaruratan sangat penting dalam manajemen kecelakaan nuklir, karena mempercepat dan lebih tepat untuk pengambilan tindakan protektif terhadap masyarakat dan lingkungan. Untuk itu, makalah ini bertujuan untuk mengetahui zona perencanaan kedaruratan nuklir (*Emergency Planning Zones, EPZ*) untuk luar tapak (*off-site*) di Indonesia. Metodologi penelitian adalah melakukan simulasi perhitungan untuk reaktor PLTN tipe PWR-1000 MWe (± 3300 MWth) pada kondisi abnormal yang dipostulasikan sebagai kecelakaan dasar disain (*Design Basis Accident, DBA*) dan kecelakaan luar dasar disain (*Beyond Design Basis Accident BDBA*) di tapak Ujung Lemah Abang, Bojanegara, Bangka Barat dan Bangka Selatan. Perhitungan dan simulasi menggunakan modul *countermeasure* dari program PC-Cosyma. Diperoleh bahwa Tapak Ujung Lemah Abang mempunyai zona perencanaan kedaruratan nuklir EPZ paling sederhana. Pengaruh kondisi tapak lebih berpengaruh dibandingkan dengan besarnya aktivitas lepasan radioaktif, terutama kondisi meteorologi dan kondisi lingkungan.

Kata kunci: Indonesia, luar tapak, zona-kedaruratan, PLTN.

ABSTRACT

THE DETERMINATION OF NUCLEAR EMERGENCY ZONE FOR OFF SITE IN INDONESIA. Learning from the Fukushima accident, especially in the nuclear emergencies management after the accident needs to be reviewed which improve Indonesian perceptions of nuclear power plant (NPP) safety. Zoning is very important for the nuclear emergency management, as it accelerates and more precise in taking protective actions on society and the environment. This paper aims to determine the nuclear emergency planning zone EPZ for off-site in Indonesia. The research methodology is to calculations for PWR- 1000 MWe (± 3300 MWth) under abnormal conditions postulated as a design basis accident, DBA and beyond design basis accidents BDBA on the site of Ujung Lemah Abang, Bojanegara, West and South Bangka. Calculations and simulations using countermeasures module of PC-Cosyma programme. The result that Ujung Lemah Abang site has the simplest nuclear emergency planning zone EPZ. Site conditions is more influential than the magnitude of the activity radioactive releases, especially the meteorological and environmental conditions.

Keywords: *Indonesia, off-site, emergency zone, NPP.*

PENDAHULUAN

Kejadian Fukushima membuat orang meragukan tentang keselamatan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN), yang berimbas kepada persepsi masyarakat terhadap keselamatan PLTN. Belajar dari Fukushima terutama dalam penanganan kedaruratan nuklir setelah kejadian, keselamatan PLTN perlu ditonjolkan kembali untuk meningkatkan persepsi masyarakat tentang keamanan dan keselamatan nuklir[1,2]. Tidak hanya peningkatan keselamatan dalam teknologi reaktor, tetapi juga penanganan manajemen kecelakaan reaktor di dalam dan luar tapak (*off-*

site][3,4,5]. Manajemen kecelakaan reaktor khususnya tindakan proteksi luar tapak merupakan bagian dari metode PSA (*Probabilistic Safety Assessment*), dan kajian tentang metode PSA untuk keselamatan PWR untuk salah satu tapak di Indonesia sudah dibahas[6]. Tindakan proteksi bergantung pada zonasi kedaruratan yang ditentukan berdasarkan konsekuensi yang dihasilkan dari lepasan radioaktif dari kejadian abnormal PLTN.

Zonasi kedaruratan sangat berguna untuk manajemen kecelakaan reaktor nuklir, karena mempercepat dan tepat dalam pengambilan tindakan protektif terhadap masyarakat dan lingkungan khususnya luar tapak. Selain itu akan memudahkan dalam perencanaan kesiapsiagaan nuklir (*emergency preparedness*), sehingga jika terjadi kejadian abnormal akan memudahkan untuk melakukan mitigasi kecelakaan dan dampak konsekuensi radiasi terhadap masyarakat dan lingkungan. Terbukti zonasi kedaruratan sangat membantu dalam penanganan dan mitigasi konsekuensi dalam kejadian Fukushima, yaitu Pemerintah setempat dengan cepat dan tepat telah melakukan tindakan protektif berdasarkan zonasi kedaruratan yang telah ditetapkan[2,7]. Untuk membuktikan bahwa Indonesia sudah siap mengoperasikan PLTN daya besar untuk kondisi operasi normal maupun jikalau operasi abnormal seperti kejadian Fukushima, maka dalam makalah ini dilakukan pembahasan tentang zonasi kedaruratan untuk manajemen kecelakaan reaktor nuklir area luar tapak secara lebih komprehensif.

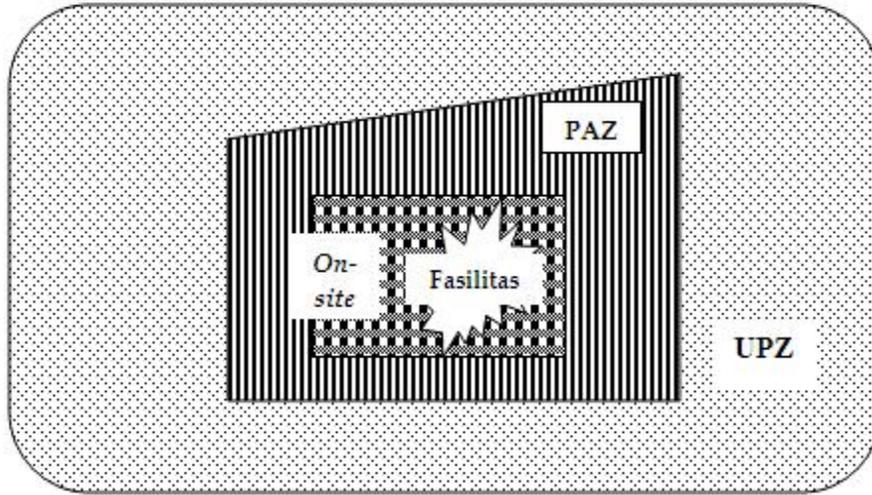
Tujuan dari penelitian dalam makalah ini adalah penentuan zona kedaruratan nuklir (*Emergency Planning Zones, EPZ*) luar tapak (*off-site*) meliputi: zona tindakan pencegahan (*Precautionary action zone, PAZ*), zona perencanaan tindakan protektif mendesak (*Urgent protective action planning zone UPZ*), dan zona proteksi jangka panjang (*Long Term Protective Zone, LPZ*), untuk calon tapak di Indonesia. Metodologi penelitian adalah dengan melakukan simulasi pada reaktor PLTN tipe PWR-1000 MWe (\pm 3300 MWth) dalam kondisi abnormal yang dipostulasikan sebagai kecelakaan dasar disain (*Design Basis Accident, DBA*) dan kecelakaan luar dasar disain (*Beyond Design Basis Accident, BDBA*) di tapak Ujung Lemah Abang, Bojanegara, Bangka Barat dan Bangka Selatan. Perhitungan dan simulasi menggunakan modul *countermeasure* PROTECE (jangka pendek) PROTECL (jangka panjang), dan AMOUNTE - AMOUNTL dari paket program PC - Cosyma[5,8,9].

TEORI

Pembagian area zona kedaruratan nuklir EPZ dibagi menjadi dua area yaitu: area dalam tapak (*on-site*) dan luar tapak (*off site*)[10,11]. Area dalam tapak (*on-site*) adalah area dalam tapak fasilitas yang dibatasi atau dikelilingi oleh pagar atau tanda tertentu. Di dalam area ini adalah area pengendalian radiasi dan kontaminasi di bawah kontrol operator atau pekerja radiasi fasilitas. Untuk keadaan darurat transportasi atau keadaan darurat yang melibatkan sumber radiasi yang tidak terkontrol atau kontaminasi lokal area bisa diklasifikasikan sebagai bukan area dalam tapak. Namun, jika respon awal dari operator fasilitas terhadap suatu kejadian cepat dan dapat dikendalikan dengan membuat tanda radiasi dan kontaminasi, maka area ini diklasifikasikan sebagai area dalam tapak (*on-site*). Area luar tapak atau *off-site* area adalah daerah di luar area kendali operator fasilitas, yaitu area yang bisa atau dikategorikan berpotensi menjadi keadaan darurat yang diakibatkan oleh lepasan radioaktif dari fasilitas nuklir. Tingkat perencanaan kedaruratan bervariasi bergantung pada penerimaan dosis radiasi dan jarak dari fasilitas. Dalam area luar tapak terdapat dua tingkat perencanaan kedaruratan dalam zona yang berbeda yaitu: zona tindakan pencegahan (*Precautionary action zone, PAZ*) dan zona perencanaan tindakan protektif mendesak (*Urgent protective action planning zone UPZ*). Untuk zona proteksi jangka panjang (*Long Term Protective Zone, LPZ*) ditempatkan di luar area UPZ, yang ditentukan khusus untuk area yang dikenakan untuk larangan konsumsi makanan lokal dan larangan mengkonsumsi produksi pertanian dan peternakan karena area sudah terkontaminasi. Zona LPZ adalah untuk tindakan protektif dengan tujuan untuk mengurangi dosis jangka panjang dari proses deposisi radioaktif di tanah dan dari alur paparan ingesti (makanan). Tindakan proteksi di zona LPZ bergantung pada hasil dari pemantauan lingkungan yang dilakukan setelah terjadi kedaruratan nuklir. Pembagian zona kedaruratan nuklir diilustrasikan kembali pada Gambar 1.

Zona tindakan pencegahan (PAZ) adalah di mana tindakan protektif mendesak telah direncanakan sebelumnya dan akan dilaksanakan segera setelah deklarasi darurat diumumkan. Tujuannya adalah untuk secara substansial mengurangi risiko efek kesehatan deterministik parah dengan mengambil tindakan protektif dalam zona ini sebelum atau segera setelah lepasan radioaktif terjadi. Sedangkan tindakan protektif mendesak (*Urgent protective action planning zone UPZ*) adalah daerah yang ditentukan sekitar fasilitas dengan persiapan dilakukan untuk segera

menerapkan tindakan perlindungan mendesak berdasarkan data pemantauan lingkungan dan penilaian kondisi fasilitas dengan tujuan mencegah penerimaan dosis yang melebihi ketentuan dalam standar regulasi keselamatan. Untuk fasilitas reaktor PLTN dengan daya termal > 1000 MWth diperkirakan zona PAZ adalah pada radius 3-5 km dari fasilitas, zona UPZ pada radius 5-30 km dari fasilitas, dan zona LPZ di luar batas zona UPZ [11]. Pada Tabel 1 dicantumkan tindakan protektif yang dilakukan untuk setiap zona kedaruratan nuklir untuk PLTN dengan daya > 1000 MWth.



Gambar 1. Ilustrasi zonasi kedaruratan nuklir

Tabel 1. Zonasi kedaruratan off site untuk zona PAZ dan UPZ [11]

Type area	PAZ	UPZ
Tujuan	Pencegahan atau pengurangan efek deterministik	Menghindari dosis radiasi
Waktu pengumuman	Sebelum atau segera setelah terlepas (terdispersi)	Dalam beberapa jam setelah lepasan
Respons/ tanggapan	Sheltering, evakuasi	Pemantauan lingkungan, pengaturan pusat evakuasi
Radius	3~5km	5~30km
Scope Reason/ lingkup Alasan	<ul style="list-style-type: none"> Tindakan perlindungan darurat dilakukan sebelum dan setelah lepasan radioaktif yang dapat menghindari dosis radiasi yang fatal (kematian segera, <i>early lethality</i>) dan dosis radiasi yang melebihi Tingkat Intervensi Umum (<i>General Intervention Level, GIL</i>). Radius jarak PAZ maksimum diasumsikan di 5km berdasarkan alasan berikut: <ol style="list-style-type: none"> Batasan Jarak yang diasumsikan untuk <i>early lethality</i>, kecuali dalam situasi sangat darurat 	Radius ini dapat digambarkan sebagai berikut: <ul style="list-style-type: none"> Dalam situasi sangat darurat dalam pembangkit listrik tenaga nuklir, hot spot harus diidentifikasi- kasi dalam beberapa jam untuk mengurangi risiko mematikan awal (<i>early lethality risk</i>) dan harus dipantau untuk menentukan perlunya evakuasi. Di daerah dalam radius ini, konsentrasi bahan radioaktif dikurangi menjadi 1/10 dibandingkan dengan konsentrasi di perbatasan PAZ. Jarak ini dapat digunakan sebagai dasar yang memungkinkan untuk

	<p>2. Dosis radiasi dikurangi menjadi 1/10 dibandingkan dengan dosis radiasi di on site</p> <p>3. Di luar daerah di luar jarak ini, tindakan perlindungan darurat tidak mungkin dibenarkan.</p> <p>4. Jarak ini adalah batas atas realistis yang memungkinkan dilakukan sheltering dan evakuasi sebelum atau segera setelah lepasan radioaktif terjadi</p> <p>5. Jika tanggap darurat awal dikerahkan di daerah yang lebih besar (lebih dari jari-jari ini), efektivitas tindakan perlindungan darurat bagi yang berdomisili di dekat tapak dapat menurun.</p>	<p>perluasan respon/tanggap darurat.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Jarak dari 5 - 30 km adalah batas praktis untuk memulai pemantauan dalam beberapa jam dan menggunakan tindakan perlindungan darurat yang sesuai - Dalam kondisi cuaca rata-rata, total dosis efektif untuk setiap individu tidak melebihi GIL untuk evakuasi dalam situasi yang sangat darurat
--	--	--

TATA KERJA

Metodologi penelitian adalah dengan melakukan simulasi reaktor PLTN tipe PWR-1000 MWe (± 3300 MWth) pada kondisi abnormal yang dipostulasikan sebagai kecelakaan dasar disain (*Design Basis Accident*, DBA) dan kecelakaan luar dasar disain (*Beyond Design Basis Accident*, BDBA) di tapak Ujung Lemah Abang, Bojanegara, Bangka Barat dan Bangka Selatan. Perhitungan dan simulasi menggunakan modul *countermeasure* PROTECE (jangka pendek) PROTECL (jangka panjang), dan AMOUNTE - AMOUNTL dari paket program PC-Cosyma[5,8,9].

Kegiatan yang dilakukan adalah :

1. Penyiapan data input *sourceterm* dengan postulasi kecelakaan DBA dan BDBA untuk PWR-1000 [6,9,12]
2. Penyiapan data input lingkungan dan meteorologi untuk menentukan daerah zonasi EPZ luar tapak (PAZ, UPZ, dan LPZ) untuk kecelakaan DBA dan BDBA [13,14,15]
3. Penyiapan data input penduduk untuk menentukan daerah zonasi kedaruratan nuklir EPZ luar tapak (PAZ, UPZ, dan LPZ) untuk kecelakaan DBA dan BDBA [16,17,18]

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil perhitungan penerimaan dosis individu efektif pada kecelakaan dasar disain (*Design Basis Accident*, DBA) dan kecelakaan luar dasar disain (*Beyond Design Basis Accident*, BDBA) untuk empat tapak yang digunakan sebagai acuan simulasi ditampilkan pada Tabel 2. Berdasarkan data dosis pada Tabel 2, ditentukan zonasi i Perencanaan kedaruratan nuklir (*Emergency Planning Zones*, EPZ) dan ditampilkan pada Tabel 3.

Penerimaan dosis masyarakat sekitar tapak pada Tabel 2 meliputi penerimaan radiasi melalui berbagai alur paparan (*pathway*) yaitu paparan radiasi interna melalui awan radioaktif (*cloudshine*) dan ingesti (*foosstuff*) dari permukaan tanah (*groundshine*); serta paparan radiasi eksterna dari awan radioaktif dan permukaan tanah. Besarnya dosis radiasi yang diterima dipengaruhi oleh aktivitas suku sumber (*sourceterm*) yang lepas ke atmosfer, kondisi meteorologi (stabilitas cuaca, kecepatan angin, sinar matahari, dan arah angin), kondisi lingkungan (topografi, produksi dan konsumsi bahan makanan lokal, dan distribusi penduduk)[6]. Dengan aktivitas suku sumber yang sama (simulasi pada tipe reaktor dan postulasi kecelakaan yang sama) menghasilkan besaran dosis yang diterima berbeda, hal ini disebabkan adanya perbedaan variabel lainnya yaitu kondisi meteorologi dan kondisi lingkungan. Berdasarkan hasil perhitungan penerimaan dosis pada Tabel 2, maka zonasi perencanaan kedaruratan nuklir (*Emergency Planning Zones*, EPZ) dapat diestimasi. Hasil estimasi untuk calon tapak di Indonesia (Ujung Lemah Abang, Bojanegara, Bangka Barat dan Bangka Selatan) terdapat pada Tabel 3.

Pembagian zona daerah kedaruratan dalam tapak *on-site* dan luar tapak *off-site* untuk perencanaan kedaruratan EPZ dibagi menjadi beberapa kriteria berdasarkan penerimaan dosis dan tindakan proteksi yang dilakukan untuk mitigasi konsekuensi radiologi yaitu [1,19]:

- a. Zona dalam tapak (*On-Site*): adalah zona di bawah pengawasan operator PLTN yang umumnya ditentukan berdasarkan besarnya potensi risiko dan konsekuensi dari PLTN. Untuk PLTN daya besar (>1000 MWth) diambil area dalam radius 0.80 km atau disebut juga zona eksklusif (*exclusive zone*).
- b. Zona luar tapak (*Off-ite*): yaitu zona PAZ : tindakan protektif mendesak (*Precautionary Action Zone*) yang diambil dalam area radius 3-5 km; Untuk area ini tindakan evakuasi dianjurkan bila dosis efektif melebihi 50 mSv, dan sheltering dianjurkan bila dosis efektif melebihi 10 mSv. Zona UPZ : *Urgent Protective Zone* : 5-30 km, untuk wilayah ini persiapan yang dibuat untuk perlindungan segera berdasarkan pemantauan lingkungan. Zona LPZ : *Long Term Protective Zone* pada area radius ≥ 20 km, di daerah ini persiapan yang dibuat untuk menentukan tindakan protektif jangka panjang (*longterm countermeasure*) seperti pembatasan konsumsi produk lokal dan relokasi. Tindakan pada zona LPZ ini tergantung pada hasil pemantauan lingkungan.

Tabel 2. Dosis Individu Efektif untuk Tapak di Indonesia Berdasarkan Postulasi Kecelakaan dan Jarak Radius dari Fasilitas PLTN

Radius (km)	Dosis Individu Efektif (Sv) Tapak Ujung Lemah Abang		Radius (km)	Dosis Individu Efektif (Sv) Tapak Bojanegara	
	DBA	BDBA		DBA	BDBA
0.8	4.44E-03	3.13E-02	0.8	7.51E-03	2.90E-01
3	3.43E-04	2.59E-02	3	6.22E-03	1.46E-01
5	1.76E-04	1.67E-02	5	3.49E-03	1.33E-01
10	7.33E-05	1.24E-02	10	1.27E-03	1.15E-01
20	4.75E-05	5.98E-03	20	6.73E-04	6.87E-02
30	1.92E-05	1.64E-03	30	1.96E-04	7.10E-03
Radius (km)	Dosis Individu Efektif (Sv) Tapak Bangka Barat		Radius (km)	Dosis Individu Efektif (Sv) Tapak Bangka Selatan	
	DBA	BDBA		DBA	BDBA
0.8	2.65E-02	3.11E-01	0.8	1.94E-02	2.90E-01
3	7.16E-03	1.70E-01	3	9.45E-03	1.36E-01
5	7.11E-03	1.57E-01	5	6.89E-03	1.31E-01
10	7.08E-03	1.23E-01	10	6.74E-03	1.05E-01
20	2.26E-03	8.86E-02	20	1.54E-03	9.94E-02
30	1.07E-03	8.25E-03	30	6.77E-04	8.30E-03

Zonasi perencanaan kedaruratan EPZ untuk Tapak Ujung Lemah Abang (Tabel 3) untuk kecelakaan dasar disain (DBA) tidak menunjukkan adanya zonasi perencanaan kedaruratan luar tapak yang signifikan. Bahkan untuk dalam tapak (*on-site*) dosis yang diterima belum memenuhi kriteria terjadinya kedaruratan, karena area pada radius 0.8 km masih dalam batasan dosis yang bisa diterima oleh pekerja radiasi. Pada kecelakaan BDBA, zonasi perencanaan kedaruratan tapak Ujung Lemah Abang untuk zona dalam tapak berdasarkan kriteria penerimaan dosis (Tabel 2) diestimasi pada area radius 0,8 km. Untuk zona luar tapak PAZ diestimasi pada radius > 0,8 km sampai 10 km (2.59E-02 sampai 1,24 E-02 Sv), dengan tindakan protektif *sheltering* karena penerimaan dosis > 1,00E-02 Sv atau 10 mSv. Tindakan evakuasi tidak perlu dilakukan karena dosis masih di bawah 5,00 E-02 Sv. Zona UPZ diestimasi pada area dalam radius 10 sampai 30 km, karena dosis 5.98E-03 Sv melebihi batasan untuk masyarakat umum 1.00E-03 Sv. Zona LPZ tidak ada, karena penerimaan dosis pada area ini tidak memerlukan tindakan protektif jangka panjang (*longterm countermeasure*).

Zonasi EPZ untuk Tapak Bojanegara pada Tabel 3, dosis yang diterima area dalam tapak (*on-site*) untuk kecelakaan dasar disain (DBA) adalah 7.51E-03 Sv, dalam batasan dosis yang bisa diterima oleh pekerja radiasi sebesar 2.00E-02 Sv/tahun. Zona PAZ ditentukan untuk area di bawah 3 km, karena dosis masih di atas nilai batas dosis yang bisa diterima masyarakat. Dalam area ini tindakan protektif bisa dilakukan dengan pembatasan orang untuk berada di luar ruangan,

dan jika di dalam ruangan disarankan dalam kondisi ventilasi udara terbatas. Pada kecelakaan BDBA, zonasi perencanaan kedaruratan tapak Bojanegara untuk zona dalam tapak diestimasi pada area radius 0,8 km. Untuk zona luar tapak PAZ diestimasi pada radius >0,8 sampai 10 km (1.46E-01 sampai 1.15E-01 Sv). Pada zona ini tindakan protektif evakuasi sudah harus dilakukan, karena penerimaan dosis di atas kriteria dosis evakuasi yaitu 5,00E-02 Sv atau 50mSv. Zona UPZ diestimasi pada area luar radius 10 sampai 30 km, karena dosis 7.10E-03 Sv melebihi batasan untuk masyarakat umum 1.00E-03 Sv. Zona LPZ tidak ada, karena penerimaan dosis pada area ini tidak memerlukan tindakan protektif jangka panjang (*longterm countermeasure*).

Tabel 3. Zonasi Perencanaan Kedaruratan Nuklir (*Emergency Planning Zones, EPZ*)

Zona Perencanaan kedaruratan nuklir (<i>Emergency Planning Zones, EPZ</i>) Tapak Ujung Lemah Abang				
Zonasi EPZ	DBA		BDBA	
	Radius (km)	Dosis (Sv)	Radius (km)	Dosis (Sv)
1. On Site	< 0,8	4.44E-03	0,8	3.13E-02
2. PAZ	-	3.43E-04	0,8-10	1.24E-02
3. UPZ	-	-	10-30	5.98E-03
4. LPZ	-	-	> 30	-
Zona Perencanaan kedaruratan nuklir (<i>Emergency Planning Zones, EPZ</i>) Tapak Bojanegara				
Zonasi EPZ	DBA		BDBA	
	Radius (km)	Dosis (Sv)	Radius (km)	Dosis (Sv)
1. On Site	0,8	7.51E-03	0,8	2.90E-01
2. PAZ	< 3	6.22E-03	0,8- 10	1.15E-01
3. UPZ	-	-	10-30	7.10E-03
4. LPZ	-	-	> 30	-
Zona Perencanaan kedaruratan nuklir (<i>Emergency Planning Zones, EPZ</i>) Tapak Bangka Barat				
Zonasi EPZ	DBA		BDBA	
	Radius (km)	Dosis (Sv)	Radius (km)	Dosis (Sv)
1. On Site	0,8	2.65E-02	0,8	3.11E-01
2. PAZ	0,8-3	7.16E-03	0,8-20	8.86E-02
3. UPZ	-	-	20-30	8.25E-03
4. LPZ	-	-	> 30	-
Zona Perencanaan kedaruratan nuklir (<i>Emergency Planning Zones, EPZ</i>) Tapak Bangka Selatan				
Zonasi EPZ	DBA		BDBA	
	Radius (km)	Dosis (Sv)	Radius (km)	Dosis (Sv)
1. On Site	0,8	1.94E-02	0,8	2.90E-01
2. PAZ	0,8-3	6.89E-03	0,8-20	9.94E-02
3. UPZ	-	-	20-30	8.30E-03
4. LPZ	-	-	> 30	-

Dari Tabel 3, zonasi EPZ Tapak Bangka Barat untuk area dalam tapak (*on-site*) untuk kecelakaan dasar disain (DBA) adalah 2.65E-02 Sv. Zona ini adalah zona di bawah pengawasan operator PLTN. Zona PAZ ditentukan dalam area 0,8 dan 3 km pada dosis 7.16E-03. Pada kecelakaan BDBA, zonasi perencanaan kedaruratan *on-site* diestimasi pada area radius 0,8 km pada dosis 3.11E-01Sv. Untuk zona tapak PAZ diestimasi pada radius >0,8 sampai 20 km (1.70E-01 sampai 8.86E-02 Sv). Pada zona ini tindakan protektif evakuasi sudah harus dilakukan, karena penerimaan dosis di atas kriteria dosis eakuasi 5,00E-02 Sv atau 50mSv. Zona UPZ diestimasi pada area luar radius 20 sampai 30 km pada dosis individu efektif 8.25E-03. Pada zona UPZ ini pemantauan lingkungan dilakukan karena dosis masih melebihi batas dosis untuk masyarakat umum 1.00E-03 Sv. Zona LPZ tidak ada, karena penerimaan dosis pada area ini tidak memerlukan tindakan protektif jangka panjang (*longterm countermeasure*).

Zonasi EPZ Tapak Bangka Selatan untuk *on-site* pada Tabel 3 untuk kecelakaan DBA pada dosis 1.94E-02 Sv dalam area radius 0.8 km dari fasilitas. Zona PAZ dalam area 0,8 dan 3

km pada dosis $6.89E-03$. Pada kecelakaan BDBA, zonasi *on-site* diestimasi pada area radius 0,8 km pada dosis $2.90E-01$ Sv. Zona PAZ diestimasi dalam radius 0,8 sampai 20 km ($1.36E-01$ sampai $9.94E-02$ Sv). Tindakan protektif evakuasi sudah harus dilakukan pada zona PAZ, karena penerimaan dosis di atas kriteria dosis eakuasi $5,00E-02$ Sv atau 50mSv. Zona UPZ diestimasi dalam area 20km dan 30 km pada dosis individu efektif $8.25E-03$. Pada zona UPZ ini pemantauan lingkungan dilakukan karena dosis masih melebihi batas dosis untuk masyarakat umum $1.00E-03$ Sv. Zona LPZ tidak ada, karena penerimaan dosis pada area ini tidak memerlukan tindakan protektif jangka panjang (*longterm countermeasure*).

Zona kedaruratan nuklir EPZ untuk tapak di Indonesia yang digunakan untuk dasar simulasi pada penelitian ini, dari sisi kedaruratan nuklir yang paling sederhana ditemukan untuk tapak Ujung Lemah Abang dibandingkan Tapak Bojanegara, Bangka Barat, dan Bangka Selatan. Dalam penentuan zonasi perencanaan kedaruratan nuklir, pengaruh kondisi tapak lebih berpengaruh dibandingkan dengan besarnya aktivitas lepasan radioaktif, terutama kondisi meteorologi dan kondisi lingkungan.

KESIMPULAN

Zona kedaruratan nuklir *Emergency Planning Zones*, EPZ) luar tapak (*off-site*) meliputi: zona tindakan pencegahan (*Precautionary action zone*, PAZ), zona perencanaan tindakan protektif mendesak (*Urgent protective action planning zone* UPZ), dan zona proteksi jangka panjang (*Long Term Protective Zone*, LPZ)), untuk calon tapak di Indonesia sudah diperoleh. Diantara empat tapak yang dijadikan sebagai acuan simulasi kedaruratan yaitu Tapak Ujung Lemah Abang, Bojanegara, Bangka Barat dan Bangka Selatan, diperoleh bahwa Tapak Ujung Lemah Abang mempunyai zona perencanaan kedaruratan nuklir EPZ paling sederhana. Dalam penentuan zonasi perencanaan kedaruratan nuklir, pengaruh kondisi tapak lebih berpengaruh dibandingkan dengan besarnya aktivitas lepasan radioaktif, terutama kondisi meteorologi dan kondisi lingkungan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terimakasih penulis sampaikan kepada Saudara Sumantri, AMd, Staff Teknisi di Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir (PTKRN) yang membantu kami dalam menyiapkan inputan perhitungan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. IAEA, Severe Accident Management Programmes for Nuclear Power Plants, Safety Guide, No. NS-G-2.15, (2009)
- [2]. Nuclear and Industrial Safety Agency (NISA), Modular Accident Analysis Program and Methods for Estimation of Leakages and Consequences of Releases using plants data, June 6 th, Tokyo, (2011)
- [3]. Yoshida, Z., Environmental Remediation in Fukushima, Workshop paper on Emergency Preparedness of Nuclear Installation-Preparedness Against Accidental Dispersion of Radioactive Material from Damaged Nuclear Installation, Serpong, Indonesia, (2013)
- [4]. IAEA-SG, Severe Accident Management Programmes for Nuclear Power Plants, IAEA- Safety Guide - NS-G-2.15, Vienna, (2009)
- [5]. Pande, M.U., Widodo, S, Setiyanto, The Assessment of Severe Accident Consequences for Verification of Core Damaged Based on Source term release on Fukushima Accident, IAEA consultan't meeting on Harmonization and Integration Between SAMG and EOP, Daejeon, 2011
- [6]. PANDE, M.U., KUNTJORO, S., TJAHYANI, S., PSA Level 3 dan Implementasinya pada Keselamatan PWR, J. Tek. Reaktor. Nukl. Vol. 16 No.1 Februari 2014, Hal. 12-26
- [7]. Nuclear and Industrial Safety Agency (NISA), The current situation of Onagawa NPS, Tohoku Electric Power Co., Inc; Fukushima Dai-ichi and Fukushima Dai- ni NPSs, Tokyo Electric Power Co., Inc-, March 14, Tokyo, (2011)
- [8]. EUROPEAN COMMISSION, PC COSYMA, version 2.0. User Guide, National Radiological Protection Board, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, (1995)

- [9]. PANDE, M.U., Analisis mitigasi dampak radiologi untuk tanggap darurat pada reaktor PWR-1000 bahan bakar MOX / UO₂ pada kondisi DBA dan Severe accident, Laporan penelitian Triwulan 1-3, tidak dipublikasikan, (2014)
- [10]. IAEA, Method for Developing Arrangement for Response to a Nuclear or Radiological Emergency, ISBN 92-0-111503-2, Vienna, (2003).
- [11]. IAEA's, Arrangements for Preparedness for a Nuclear or Radiological Emergency, Safety Guide GS-G-2.1, (2007)
- [12]. IRSN, Research and Development with Regard to Severe Accidents in Pressurised Water Reactors: Summary and outlook-Rapport CEA-2007/351, 2007. p.19-25,
- [13]. BMKG, Data Meteorologi Kabupaten Jepara, BMKG-Jepara, 2005
- [14]. BMKG, Data Meteorologi Kabupaten Serang, BMKG-Serang, 2009.
- [15]. BMKG, Data Meteorologi Bangka Belitung, BMKG-Babel, 2012
- [16]. BPS, Jepara dalam angka, BPS-Jepara, 2007
- [17]. BPS, Serang dalam angka, BPS-Serang, 2009
- [18]. BPS, Bangka dalam angka, BPS-Babel, 2012
- [19]. ICRP, Principles for Intervention for Protection of The Public in Radiological Emergency, ICRP No. 63, 1992