

# KOMPARASI PENGGUNAAN BAHAN BAKAR LEU DAN MOX TERHADAP AKTIVITAS DAN KONSEKUENSI RADIASI LB-LOCA

**Pande Made Udiyani**

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir - BATAN

Kawasan Puspiptek, Serpong, Tangerang Selatan, 15314

*e-mail:* [pmade-u@batan.go.id](mailto:pmade-u@batan.go.id)

(Naskah diterima tanggal: 27-08-2012, disetujui tanggal: 21-09-2012)

## ABSTRAK

**KOMPARASI PENGGUNAAN BAHAN BAKAR LEU DAN MOX TERHADAP AKTIVITAS DAN KONSEKUENSI RADIASI LB-LOCA.** Penggunaan bahan bakar uranium pengkayaan rendah LEU atau MOX pada reaktor daya akan menghasilkan lepasan radionuklida ke lingkungan selama pengoperasiannya. Pemilihan bahan bakar MOX sebagai bahan bakar reaktor daya mempunyai keuntungan derajat bakar yang tinggi dan keuntungan ekonomi. Untuk mengetahui aktivitas dan konsekuensi radiasi dari penggunaan MOX atau LEU di reaktor daya maka dapat dilakukan komparasi dari ke dua jenis bahan bakar tersebut. Komparasi dilakukan untuk teras yang seluruh bahan bakarnya menggunakan LEU dan MOX dengan kondisi postulasi kecelakaan yang sama. Analisis dilakukan pada PWR 1000 MWe dengan postulasi kecelakaan LB-LOCA dan disimulasikan pada tapak Ujung Watu, menggunakan modul ATMOS, LATDAS dan LATRISK dari PC-Cosyma. Dari hasil komparasi diperoleh bahwa penggunaan bahan bakar MOX akan meningkatkan aktivitas radiasi atmosfer dan deposisi permukaan terutama untuk nuklida dari logam alkali (Cs), Halogen (I), dan aktinida (Pu). Penggunaan bahan bakar MOX akan meningkatkan penerimaan dosis radiasi jangka pendek 13 kali, dosis jangka panjang 18 kali, dan 19 kali penerimaan *fatal cancer risk* total.

**Kata kunci:** LEU, MOX, LB-LOCA, aktivitas radiasi.

## ABSTRACT

**COMPARISON OF USING LEU AND MOX FUEL FOR LB-LOCA RADIATION CONSEQUENCES AND RADIATION ACTIVITY.** The use of low enrichment uranium (LEU) fuel or MOX fuel in power reactor will produce radionuclides release into the environment during operation. Selection of MOX fuel as a fuel for power reactor has the advantage of high burnup and economic benefits. The activity and radiation consequences resulted from the use of MOX or LEU fuel in power reactor can be determined by comparing the values resulted from the two fuel types. Comparison is done for a reactor core entirely loaded with LEU or MOX type with similar LB-LOCA postulation condition. In this research, the analysis takes a case of a PWR of 1000 MWe with postulation condition of LB-LOCA (Large Break-Lost of Coolant Accident) and is simulated to Ujung Watu site. The analysis uses ATMOS, LATDAS dan LATRISK modules from PC-Cosyma. The comparison analysis shows that the use of MOX fuel will increase radiation activity of the atmosphere and surface deposition, especially for nuclides of alkali metal (Cs), Halogen (I) and actinide (Pu). The use of MOX fuel will

increase short-term dose of 13 times, long-term dose of 18 times, and total fatal cancer risk of 19 times of those values resulted from the use of LEU fuel.

**Key words:** LEU, MOX, LBLOCA, radiation activity.

## PENDAHULUAN

Penggunaan bahan bakar uranium untuk pengoperasian reaktor daya akan mengakibatkan adanya lepasan radionuklida produk fisi dan aktivasi ke lingkungan dalam kondisi operasi normal ataupun abnormal. Lepasannya radionuklida dalam pengoperasian normal maupun abnormal diharapkan masih dalam ALARA (*as low as reasonable achievable*) atau batasan yang ditetapkan oleh badan regulator nasional maupun internasional. Uranium yang digunakan sebagai bahan bakar reaktor daya adalah uranium dengan pengkayaan rendah LEU (*low enrichment uranium*) yang utamanya dari  $UO_2$ ; dan dengan bahan utamanya dari MOX (*Mixed Oxide*). Di samping itu untuk mempertahankan ketersediaan uranium, penggunaan bahan bakar di teras reaktor daya sudah dilakukan walaupun masih relatif kecil jumlahnya di teras. Bahan bakar MOX adalah bahan bakar nuklir yang mengandung lebih dari satu bahan bakar fisi oksida, yaitu  $(U,Pu)O_2$ . Penggunaan MOX sebagai bahan bakar reaktor daya mempunyai keunggulan yaitu derajat bakar tinggi, keuntungan ekonomi dari penggunaan uranium yang lebih efisien, dan diperkirakan akan meningkatkan probabilitas terjadinya kecelakaan<sup>[1-2]</sup>. Selain itu penambahan plutonium dalam pembuatan MOX diperkirakan juga akan meningkatkan aktivitas radiasi terutama untuk nuklida produk fisi dari kelompok aktinida. Indonesia sebagai calon pengguna reaktor daya sangat perlu membuat kajian tentang dampak radiasi yang ditimbulkan dari pengoperasian PLTN (Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir) untuk berbagai jenis reaktor dan jenis bahan bakarnya.

Analisis komparasi dilakukan untuk PWR (*Pressurized Water Reactor*) yang menggunakan bahan bakar LEU atau MOX dengan inventori yang sudah dihitung oleh Lyman<sup>[1]</sup>, dengan postulasi dan asumsi yang sama terjadinya kecelakaan dasar desain pada teras yang menggunakan bahan bakar LEU atau MOX<sup>[3-5]</sup>. Analisis suku sumber (*source term*) dan mekanisme perpindahan nuklida untuk setiap subsistem keselamatan reaktor dari penggunaan bahan bakar MOX pernah dilakukan sebelumnya dengan asumsi berbeda pada postulasi LB-LOCA (*Large Break-Lost of Coolant Accident*)<sup>[6]</sup>, tetapi perhitungan dan komparasi dengan LEU terhadap dampak dan risiko yang ditimbulkan di lingkungan dikaji dalam makalah ini. Walaupun penggunaan 100% MOX dalam teras reaktor PWR masih dalam kajian<sup>[1]</sup>, tetapi untuk komparasi dampak penggunaan dua jenis bahan bakar LEU dan MOX di dalam makalah ini menggunakan asumsi kondisi maksimum. Dalam kajian komparasi ini, bahan bakar MOX yang digunakan sebagai dasar estimasi dan evaluasi memiliki komposisi kandungan plutonium dalam persen berat adalah: Pu-238 (0,04); Pu-239 (93,08); Pu-240 (6,54); Pu-241 (0,21); Pu-242 (0,1) dan Am-241 (0,03)<sup>[1]</sup>. Aktivitas dan konsekuensi radiasi dihitung menggunakan modul ATMOS, LATDAS dan LATRISK dari paket program PC-Cosyma dengan input data menggunakan kondisi calon tapak spesifik di Indonesia.

Tujuan dan manfaat penelitian ini adalah untuk mengetahui aktivitas dan konsekuensi radiasi lepasan radionuklida produk fisi terhadap penggunaan kedua jenis bahan bakar tersebut. Hasil komparasi aktivitas dan konsekuensi di lingkungan, dengan penggunaan dua jenis bahan bakar ini dapat digunakan sebagai salah satu

acuan dalam pemilihan reaktor daya yang akan dibangun di Indonesia.

### Teori

Bahan bakar oksida campuran atau MOX, adalah bahan bakar nuklir yang mengandung lebih dari satu bahan oksida dari material fisil. Bahan bakar MOX terbuat dari campuran plutonium dengan uranium alam, uranium reprosesis (hasil olah ulang) atau *depleted uranium*. Bahan bakar MOX adalah bahan bakar alternatif dari bahan bakar uranium pengkayaan rendah (LEU) yang digunakan dalam reaktor air ringan. Bahan bakar MOX adalah bahan bakar yang akan mendominasi pembangkit tenaga nuklir generasi berikutnya. Sebagai contoh, campuran 7% plutonium dan 93% uranium alam untuk bahan bakar LEU akan bereaksi sama, meskipun tidak identik. Bahan bakar nuklir MOX mengandung  $UO_2$  dan  $PuO_2$ , dan / atau satu fasa padat (U, Pu)  $O_2$ . Kandungan  $PuO_2$  dalam bahan bakar dapat bervariasi dari 1,5% hingga 25-30% berat tergantung pada jenis reaktor nuklir dan penggunaannya<sup>[1]</sup>.

Bahan utama fisil untuk bahan bakar MOX segar adalah bahan fisil plutonium (Pu) antara lain nuklida Pu-239 dan Pu-241. Total kandungan Pu tergantung pada derajat bakar, waktu pendinginan dari bahan UOX di *Spent Fuel*-SF, dan lama penyimpanan Pu setelah olah ulang. Konsep *Lead and lag time* dalam siklus bahan bakar sangat penting karena waktu paro dari Pu-241 (14,35 tahun), dengan peluruhan beta menjadi Am-241<sup>[7]</sup>.

Bahan bakar dirancang untuk kinerja optimal dalam reaktor dengan menggunakan utilitas yang minimal dan meniadakan kegagalan bahan bakar di dalam teras. Oleh karena itu karakteristik bahan bakar dengan derajat bakar tinggi dipilih untuk memenuhi kriteria tersebut. Desain mekanis LEU dengan derajat bakar yang lebih rendah dan MOX dengan derajat bakar tinggi sangat mirip, tetapi beberapa sifat dan dampak penggunaannya berbeda. Karakteristik bahan bakar dengan derajat

bakar tinggi dapat mempengaruhi mekanisme persyaratan peraturan.

Dibandingkan dengan teras bahan bakar LEU, bahan bakar MOX mempunyai kelebihan antara lain koefisien temperatur moderator negatif, koefisien Doppler negatif, mengurangi fraksi neutron tunda, dan *lifetime* neutron, dan mengurangi nilai batang kendali individu. Perbedaan utama antara derajat bakar tinggi dan rendah bahan bakar LWR adalah kandungan bahan fisil berbeda, implikasi pada kekritisan dan perisai, nuklida produk fisi lebih tinggi, implikasi pada perisai dan perpindahan panas, tekanan gas produk fisi lebih tinggi berpengaruh terhadap kelongsong, sifat mekanik kelongsong berbeda, efek *fuel rim* berbeda yang berimplikasi terhadap dosis radiasi lepasan, perbedaan dalam sifat neutronik dan termomekanis. Dampak negatif dari penggunaan bahan bakar MOX tidak semua dapat dikurangi dengan modifikasi pada desain teras<sup>[1]</sup>.

Bahan bakar Pu-239 memiliki tampang lintang serapan thermal dan *fission cross-sections* tinggi dibandingkan U-235, sehingga spektrum neutron lebih sedikit di teras yang menggunakan MOX. Sifat lain bahan bakar MOX dapat mempengaruhi pelepasan radionuklida selama kecelakaan. Hal ini karena perilaku fisik inferior pelet MOX dengan pelet  $UO_2$  terhadap pelepasan gas hasil fisi lebih besar pada temperatur tinggi dan derajat bakar (*burnups*) lebih besar dari 35 GWD/THm. Mikrostruktur heterogen bahan bakar MOX (akibat dari kehadiran kluster plutonium) menghasilkan tampilan *hot spot* dari derajat bakar lokal sangat tinggi, di mana konsentrasi tinggi gas fisi menumpuk<sup>[1]</sup>.

Tidak ada perbedaan yang signifikan antara lepasan produk fisi dari bahan bakar MOX dan LEU untuk lepasan uranium, tetapi untuk produk fisi plutonium ada perbedaan sekitar dua lipat lebih tinggi<sup>[7]</sup>. Sifat dan perilaku bahan bakar, seperti oksidasi kelongsong, *crud*, *gap pellet-cladding* dan *cladding bowing*, sudah

dievaluasi tetapi tidak ditemukan. Hal yang penting untuk perbandingan keseluruhan pengaruh pada siklus bahan bakar ketika membandingkan bahan bakar tersebut dengan derajat bakar rendah dengan tinggi. Sifat lain dari bahan bakar seperti tingkat rekah pelet dan oksidasi bahan bakar, ditemukan hanya memiliki pengaruh kecil<sup>[7]</sup>.

Bahan bakar MOX membutuhkan pengayaan uranium yang lebih tinggi menghasilkan produk fisi (FP), dan transuranik (TRU) yang lebih tinggi. Panas peluruhan dan aktivitas spesifik total disumbang sepenuhnya oleh produk fisi, terutama oleh Sr-90 (waktu paro 29 tahun), Y-90, Cs-137 (waktu paro 30 tahun) dan Ba-137m. Waktu paro total untuk isotop ini hingga 200 tahun. Setelah 100-200 tahun, aktivitas spesifik dan panas peluruhan dari aktinida menjadi dominan<sup>[7]</sup>.

## TATA KERJA

Metodologi yang digunakan adalah perhitungan dan simulasi, sebagai input data *source terms* yang diprediksi lepas ke lingkungan dari PWR kapasitas 1000 MWe. Postulasi kecelakaan dasar desain yaitu

kecelakaan hilangnya pendingin LOCA besar atau LB-LOCA (*Large Break-Lost of Coolant Accident*). Produk fisi diinventori menggunakan hasil perhitungan Lyman untuk PWR berbahan bakar LEU dan bahan bakar seluruh teras dari MOX<sup>[1]</sup>.

Berdasarkan kondisi teras tersebut dilakukan postulasi kecelakaan dengan asumsi akan mengakibatkan kegagalan teras mencapai kurang lebih 30%. Asumsi fraksi *gap release* untuk MOX enam kali lebih besar dibandingkan dengan LEU<sup>[1,9]</sup>. Mekanisme perpindahan nuklida dari teras ke *containment* mengikuti asumsi dari NUREG-1465<sup>[5]</sup> untuk kecelakaan LB-LOCA, tercantum dalam Tabel 1. Dengan asumsi sistem *spray* di *containment* berfungsi dan mampu mengurangi 46% Iodine serta filter HEPA (*High Efficiency Particulate Airbone*) di cerobong mempunyai efisiensi 90% untuk Iodine dan 99% untuk nuklida produk fisi lainnya.

Aktivitas dan konsekuensi radiasi dihitung menggunakan modul ATMOS, LATDAS dan LATRISK dari paket program PC-Cosyma dengan input data menggunakan kondisi calon tapak spesifik Ujung Watu-Muria.

Tabel 1. Fraksi lepasan produk fisi pada kondisi LB-LOCA<sup>[5]</sup>.

Nuklida	In-Vessel	Ex-Vessel	Late In-Vessel
Gas Mulia	0,95	0	0
Halogen	0,35	0,25	0,1
Alkali metals	0,25	0,35	0,1
Grup Te	0,05	0,25	0,005
Grup Ba, Sr	0,02	0,1	0
Grup Ru	0,0025	0,0025	0
Grup Mo	0,0025	0,0025	0
Lantanida	0,005	0,005	0
Grup Ce	0,005	0,005	0

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil perhitungan dan simulasi untuk komparasi aktivitas dan konsekuensi radiasi penggunaan bahan bakar MOX terhadap LEU pada reaktor PWR tercantum pada Tabel 2-5 dan Gambar 1-3.

Hasil analisis dan perhitungan untuk komparasi inventori dalam teras dan *source terms* ke lingkungan ditampilkan pada Tabel 2. Dari Tabel 2, produk fisi di dalam inventori untuk teras LEU tidak berbeda jauh dibandingkan dengan produk fisi teras MOX, kecuali untuk nuklida dari kelompok aktinida

seperti nuklida dari Pu, Am dan kelompok Cm. Nuklida dari kelompok plutonium ini untuk teras MOX lebih tinggi dibandingkan teras LEU. Hal ini berkaitan dengan penambahan plutonium segar dalam bahan

baku MOX yang dapat mencapai hingga 30% berat<sup>[1]</sup>. Selain rasio aktinida, rasio nuklida dari kelompok rutenium, antimon dan telurium untuk teras MOX lebih tinggi dari teras LEU.

Tabel 2. Komparasi nuklida produk fisi di inventori dan *source terms* LB-LOCA.

No.	Nuklida	Rasio MOX/LEU		No.	Nuklida	Rasio MOX/LEU	
		di inventori <sup>[1]</sup>	dari cerobong			di inventori <sup>[1]</sup>	dari cerobong
1.	Kr-85	0,55	7,44	29.	Te-131m	1,30	1,77
2.	Kr-85m	0,61	8,25	30.	Te-132	1,03	1,40
3.	Kr-87	0,58	7,88	31.	I-131	1,06	14,45
4.	Kr-88	0,56	7,56	32.	I-132	1,04	14,14
5.	Xe-133	0,98	24,88	33.	I-133	0,98	13,36
6.	Xe-135	1,68	22,84	34.	I-134	0,95	12,89
7.	Rb-86	0,54	73,98	35.	I-135	0,99	13,48
8.	Sr-89	0,52	7,00	36.	Cs-134	0,96	130,77
9.	Sr-90	0,46	6,21	37.	Cs-136	1,67	227,02
10.	Sr-91	0,60	8,18	38.	Cs-137	0,99	134,69
11.	Sr-92	0,67	9,14	39.	Ba-139	0,92	12,57
12.	Y-90	0,45	0,61	40.	Ba-140	0,93	12,75
13.	Y-91	0,58	0,79	41.	La-140	0,92	1,25
14.	Y-92	0,67	0,91	42.	La-141	0,92	1,25
15.	Zr-95	0,82	1,12	43.	La-142	0,90	1,22
16.	Zr-97	0,92	1,25	44.	Ce-141	0,92	13,02
17.	Nb-95	0,82	1,11	45.	Ce-143	0,85	11,58
18.	Mo-99	0,98	13,27	46.	Ce-144	0,78	10,66
19.	Tc-99m	0,97	13,26	47.	Pr-143	0,85	1,16
20.	Ru-103	1,32	17,97	48.	Nd-147	0,95	1,29
21.	Ru-105	1,56	21,24	49.	Np-239	0,96	13,11
22.	Ru-106	2,13	28,94	50.	Pu-238	1,37	18,62
23.	Rh-105	1,59	21,59	51.	Pu-239	3,31	45,03
24.	Sb-127	1,42	1,94	52.	Pu-240	4,41	59,95
25.	Sb-129	1,19	1,61	53.	Pu-241	3,58	48,68
26.	Te-127	1,45	1,97	54.	Am-241	6,84	92,67
27.	Te-127m	1,59	2,17	55.	Cm-242	7,21	98,02
28.	Te-129m	1,24	1,62	56.	Cm-244	3,07	41,69

Berdasarkan postulasi LB-LOCA, asumsi kegagalan teras, mekanisme transport nuklida dari teras ke lingkungan, hasil perhitungan rasio nuklida MOX/LEU untuk seluruh grup menunjukkan hasil yang lebih tinggi dibandingkan rasio nuklida di dalam inventori ke dua teras. Karena untuk kondisi abnormal dengan suhu teras dan derajat bakar yang lebih tinggi akan berpengaruh terhadap peningkatan fraksi *gap release* nuklida dari bahan bakar MOX di dalam teras<sup>[1,9-10]</sup>. Dalam perhitungan nuklida di dalam gap dan asumsi fraksi *gap release* untuk MOX enam kali lebih besar

dibandingkan dengan LEU<sup>[1,9]</sup>, akan menghasilkan perhitungan rasio nuklida produk fisi untuk teras MOX/LEU menjadi lebih tinggi. Akibatnya sejumlah produk fisi terutama dari kelompok aktinida dan kelompok alkali metal menunjukkan rasio yang tinggi. Hal itu selain karena fraksi *gap release*, penambahan plutonium dalam teras MOX, dan sifat sifat dari nuklida yang bersangkutan. Peningkatan *source terms* yang lepas ke lingkungan akan menimbulkan konsekuensi radiasi yang lebih besar di lingkungan dan masyarakat sekitar tapak reaktor.

Tabel 3. Komparasi konsentrasi udara dan deposisi permukaan LB-LOCA untuk PWR bahan bakar MOX dan LEU.

Nuklida	Konsentrasi udara, Bq s/m <sup>3</sup>		Rasio MOX/LEU	Deposisi Permukaan, Bq/m <sup>2</sup>		Rasio MOX/LEU
	LEU	MOX		LEU	MOX	
Kr-85m	3,32E+10	2,76E+11	8,30	0,00E+00	0,00E+00	-
Kr-88	3,19E+10	2,41E+11	7,55	0,00E+00	0,00E+00	-
Rb-88	3,56E+10	2,68E+11	7,55	3,56E+07	2,68E+08	7,55
Sr-89	1,80E+07	1,26E+08	7,01	1,80E+04	1,26E+05	7,01
Sr-90	1,32E+06	8,21E+06	6,21	1,32E+03	8,21E+03	6,21
Sr-91	9,13E+06	7,49E+07	8,21	9,13E+03	7,49E+04	8,21
Sr-92	1,06E+06	9,72E+06	9,15	1,06E+03	9,72E+03	9,15
Y-90	1,63E+05	1,01E+06	6,19	1,63E+02	1,01E+03	6,19
Y-91	4,83E+04	3,10E+05	6,42	4,83E+01	3,10E+02	6,42
Y-92	3,69E+06	3,38E+07	9,15	3,69E+03	3,38E+04	9,15
Ru-106	2,47E+04	7,16E+05	29,02	2,47E+01	7,16E+02	29,02
Te-131m	8,00E+05	1,42E+06	1,77	8,00E+02	1,42E+03	1,77
Te-132	7,05E+06	9,89E+06	1,40	7,05E+03	9,89E+03	1,40
I-131	3,35E+08	4,85E+09	14,46	3,03E+06	4,39E+07	14,46
I-132	2,04E+07	2,00E+08	9,77	1,85E+05	1,81E+06	9,76
I-133	4,85E+08	6,48E+09	13,37	4,38E+06	5,86E+07	13,37
I-135	1,95E+08	2,63E+09	13,49	1,76E+06	2,38E+07	13,49
Xe-133	8,56E+11	2,16E+13	25,17	0,00E+00	0,00E+00	-
Xe-135	1,62E+11	3,71E+12	22,85	0,00E+00	0,00E+00	-
Cs-134	1,01E+07	1,33E+09	130,87	1,01E+04	1,33E+06	130,87
Cs-136	2,95E+06	6,69E+08	226,65	2,95E+03	6,69E+05	226,65
Cs-137	7,67E+06	1,03E+09	134,77	7,67E+03	1,03E+06	134,77
Ba-140	3,99E+07	3,99E+08	10,00	3,99E+04	3,99E+05	10,00
La-140	7,60E+06	7,59E+07	9,98	7,60E+03	7,59E+04	9,98
Pu-241	2,47E+04	1,20E+05	4,86	2,47E+01	1,20E+01	0,49
Cm-242	2,75E+02	2,69E+03	9,78	2,75E-01	2,69E+00	9,78
Cm-244	1,63E+01	6,81E+01	4,18	1,63E-02	6,81E-02	4,18

Simulasi yang dilakukan pada tapak, pengaruh kondisi lingkungan akan berpengaruh terhadap distribusi lepasan nuklida di atmosfer dan deposisi di permukaan. Tabel 3 menampilkan hasil perhitungan konsentrasi lepasan produk fisi di atmosfer dan deposisi di permukaan tanah untuk ke dua teras. Pada kondisi lingkungan tapak yang sama, aktivitas radiasi dari lepasan bahan radioaktif menunjukkan hasil yang berbeda untuk teras LEU dan MOX. Rasio MOX/LEU yang lebih dari satu akan berimplikasi pada aktivitas radiasi di

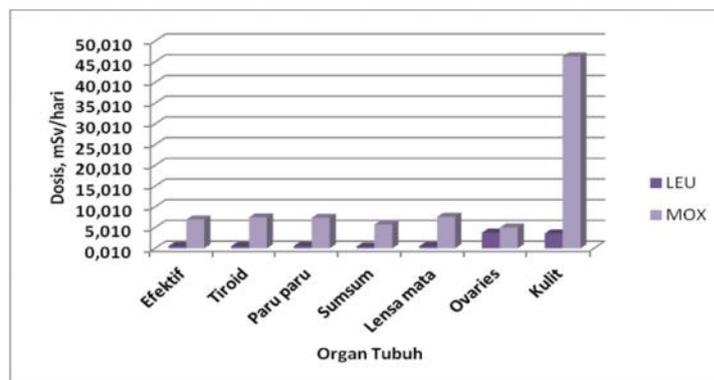
lingkungan untuk teras MOX lebih besar dibandingkan teras LEU. Aktivitas radiasi akan berpengaruh terhadap penerimaan dosis radiasi masyarakat serta risiko penyakit atau kematian akibat penerimaan paparan radiasi. Semakin tinggi aktivitas paparan radiasi di lingkungan, maka penerimaan dosis dan risiko akan makin besar. Dari Tabel 3 terlihat bahwa aktivitas radiasi di lingkungan dari teras MOX lebih besar dibandingkan teras LEU. Aktivitas nuklida produk fisi yang berpengaruh pada penerimaan dosis karena: sifat nuklida, waktu paro panjang, dan

toksistasitas yang tinggi. Kelompok toksistasitas tinggi adalah alkali metal seperti Cs, I-131, dan kelompok nuklida aktinida. Karena aktivitas nuklida untuk teras MOX jauh lebih tinggi dibandingkan teras LEU, maka akan berdampak terhadap peningkatan penerimaan dosis dan risiko yang diterima masyarakat dari kelompok kritis yang terkena paparan radiasi.

Berdasarkan aktivitas radiasi dalam Tabel 3, perhitungan konsekuensi radiasi di lingkungan dan masyarakat untuk teras MOX dan LEU tercantum pada Gambar 1 (dosis jangka pendek). Data dosis pada Gambar 1 adalah penerimaan dosis pada daerah eksklusi dalam radius 800 m dari tapak. Penerimaan dosis radiasi jangka pendek (*short term dose*) dari penggunaan bahan bakar MOX untuk setiap penerimaan pada organ tubuh dan dosis efektif lebih tinggi

dibandingkan reaktor dengan penggunaan bahan bakar LEU. Data pada Gambar 1 yang berkaitan dengan data dalam Tabel 3, terlihat jelas bahwa aktivitas radiasi yang lebih tinggi di teras MOX dibandingkan teras LEU, akan menghasilkan penerimaan dosis jangka pendek yang lebih tinggi.

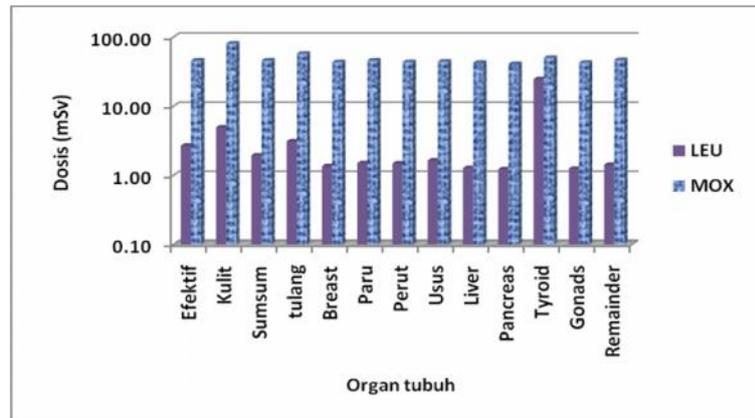
Tabel 4 memperlihatkan rasio konsekuensi MOX/LEU mencapai hampir 14 kali, artinya penggunaan bahan bakar MOX dapat meningkatkan penerimaan dosis radiasi efektif pada setiap organ tubuh di lingkungan melebihi 100%. Penerimaan dosis radiasi jangka pendek berasal dari *pathway cloudshine* dan *grounshine* (interna dan eksterna melalui inhalasi dan imersi) dan paparan langsung eksterna. Hampir semua nuklida produk fisi dapat menimbulkan dosis jangka pendek, terutama dari produk gas mulia dan nuklida dengan waktu paro pendek.



Gambar 1. Dosis radiasi jangka pendek (*short term dose*) kondisi LB-LOCA PWR untuk bahan bakar MOX dan LEU.

Tabel 4. Komparasi penerimaan dosis radiasi jangka pendek (*short term dose*) kondisi LB-LOCA PWR untuk bahan bakar MOX dan LEU.

Organ Tubuh	Rasio MOX/LEU untuk Jarak Radius, (km)				
	0,8	3,0	5,0	10,0	20,0
Efektif	13,35	13,57	13,73	13,94	14,37
Tiroid	13,94	14,05	14,17	14,00	14,22
Paru paru	12,67	12,97	13,16	13,37	13,90
Sumsum	13,49	13,59	13,70	13,94	14,27
Lensa mata	14,43	14,54	14,65	14,91	15,28
Ovaries	13,34	13,43	13,54	13,77	14,10
Kulit	12,85	12,87	12,91	12,98	13,80



Gambar 2. Dosis radiasi jangka panjang (*long term dose*) kondisi LB-LOCA PWR untuk bahan bakar MOX dan LEU.

Tabel 5. Komparasi rasio penerimaan dosis radiasi jangka panjang (*long term dose*) kondisi LB-LOCA PWR untuk bahan bakar MOX dan LEU.

Organ Tubuh	Rasio MOX/LEU untuk Jarak Radius, (km)				
	0,8	3,0	5,0	10,0	20,0
Efektif	17,07	6,78	11,39	17,62	17,72
Kulit	16,46	16,48	16,49	16,54	16,59
Sumsum	23,64	32,53	34,68	38,03	39,49
Tulang	18,63	25,09	27,29	29,50	30,22
Breast	32,13	41,88	40,74	44,89	47,91
Paru paru	30,62	41,61	41,19	45,64	48,52
Perut	29,38	37,62	38,38	43,48	45,92
Usus	27,06	33,23	36,29	40,59	42,00
Liver	33,34	47,87	48,06	53,44	56,88
Pankreas	33,48	49,73	50,74	56,67	60,25
Tiroid	2,05	3,29	8,00	14,60	14,61
Gonads	34,07	48,46	48,72	54,13	57,56
Remainder	32,91	42,70	43,35	48,57	51,39

Penerimaan risiko kanker fatal (*fatal cancer risk*) akibat lepasan nuklida produk fisi teras LEU dan MOX ditunjukkan pada Gambar 3 dan komparasi penerimaan risiko untuk ke dua teras dicantumkan dalam Tabel 6.

Resiko kanker fatal (*fatal cancer risk*) yang diterima masyarakat akibat LB-LOCA dari PWR yang menggunakan bahan bakar MOX lebih tinggi dibandingkan penggunaan bahan bakar LEU yang mencapai rasio 19 kali. Risiko dari konsekuensi radiasi kecelakaan reaktor

untuk masyarakat yang berdomisili di sekitar reaktor dipengaruhi oleh aktivitas dispersi radionuklida dan kondisi lingkungan terutama distribusi populasi penduduk. Aktivitas radiasi dipengaruhi oleh jarak radius dari reaktor. Distribusi penduduk di tiap radius bergantung pada kondisi data tapak. Penerimaan risiko total dalam radius 3 km lebih rendah dibandingkan dalam radius 20 km, berkaitan dengan pola dispersi aktivitas radiasi dan distribusi populasi penduduk pada tapak Semenanjung Muria.

## SIMPULAN

Penggunaan bahan bakar MOX sebagai pengganti bahan bakar LEU pada PWR 1000 MWe dengan postulasi kecelakaan LB-LOCA dan disimulasikan pada tapak Ujung Watu meningkatkan aktivitas radiasi atmosfer dan deposisi permukaan terutama untuk nuklida dari logam alkali (Cs), Halogen (I), dan aktinida (Pu). Penggunaan bahan bakar MOX akan meningkatkan penerimaan dosis radiasi untuk jangka pendek sebesar 13 kali, untuk dosis jangka panjang sebesar 18 kali, dan dapat meningkatkan 19 kali penerimaan risiko kanker fatal total.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Lyman, E.S. (2001). *Public Health Risks of Substituting Mixed-Oxide for Uranium Fuel in Pressurized- Water Reactors*. Science & Global Security, Vol. 9, 33-79.
- [2]. Fehera, S., Reissa, T. (2012). *Wirth, A., MOX fuel effects on the isotope inventory in LWRs*. Nuclear Engineering and Design 252, 201– 208.
- [3]. Pande, M.U. (2011). *Karakteristik Radionuklida pada tiap Sub- sistem Keselamatan Reaktor daya berbahan bakar MOX*. Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir, 13 (2), 111-122.
- [4]. European Commission. (2001). *Determination of the In-Containment Source term for a Large-Break Loss of Coolant Accident*. EUR 19841 EN, 11-17.
- [5]. Soffer, L. et al. (1995). *Accident Source Terms for Light - Water Nuclear Power Plants*. NUREG-1465, NRC, Washington, 3-20.
- [6]. Ashbaugh, S.G., Powers, D.A., Goldmann, A.S. (2008). *Assessment of Severe Accident Source terms in PWR with 40% MOX and 60% LEU Core using MELCOR 1.8.5*. Sandia National Laboratories, New Mexico.
- [7]. Lovasic, Z. and Einziger, R. (2009). *Activity on Technical Influence of High Burnup UOX and MOX Water Reactor Fuel on Spent Fuel Management*. WM 2009 Conference. Phoenix, AZ, 1-6.
- [8]. Crawford, D. (2009). *LWR Fuel Performance (with emphasis on BWR fuel), Fuel Performance & Design*. Global Nuclear Fuel, Wilmington NC, 1-12.
- [9]. Roudil, D., et al. (2007). *Gap and Grain Boundaries Inventories from Pressurized Water Reactor Spent Fuels*. Journal of Nuclear Materials 362, 411-415.
- [10]. Johnson, L. et al. (2004). *Estimates of the Instans Release Fraction for UO<sub>2</sub> and MOX Fuel at t=0, National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste*. Switzerland, 3-24.