

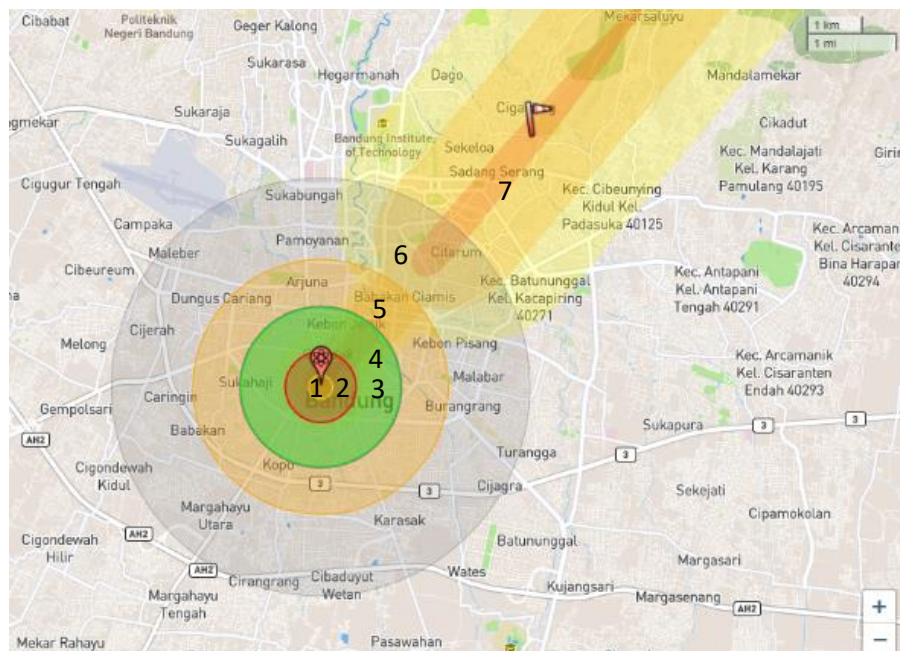
BAB 4 HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Deskripsi Data

Penelitian ini dilakukan secara simulasi dengan melakukan pemodelan objek pengamatan. Pemodelan yang dilakukan menggunakan data properti objek, diantaranya spesifikasi material baja, material detektor, sumber radiasi, ukuran, jarak dan sebagai gambaran atau ilustrasi detonasi senjata nuklir. Pada penelitian ini bodi baja kendaraan TKT 4x4 disebut model **shielded**, bodi baja kendaraan TKT 4x4 dengan penambahan unsur Pb disebut model **shielded+Pb** dan tanpa bodi baja kendaraan (free field) disebut model **unshielded**.

4.1.1 Skenario Detonasi Senjata Nuklir

Skenario detonasi senjata nuklir digambarkan untuk memperkirakan dampak kerusakan yang mungkin dihasilkan oleh detonasi senjata nuklir yang terjadi di wilayah Indonesia.

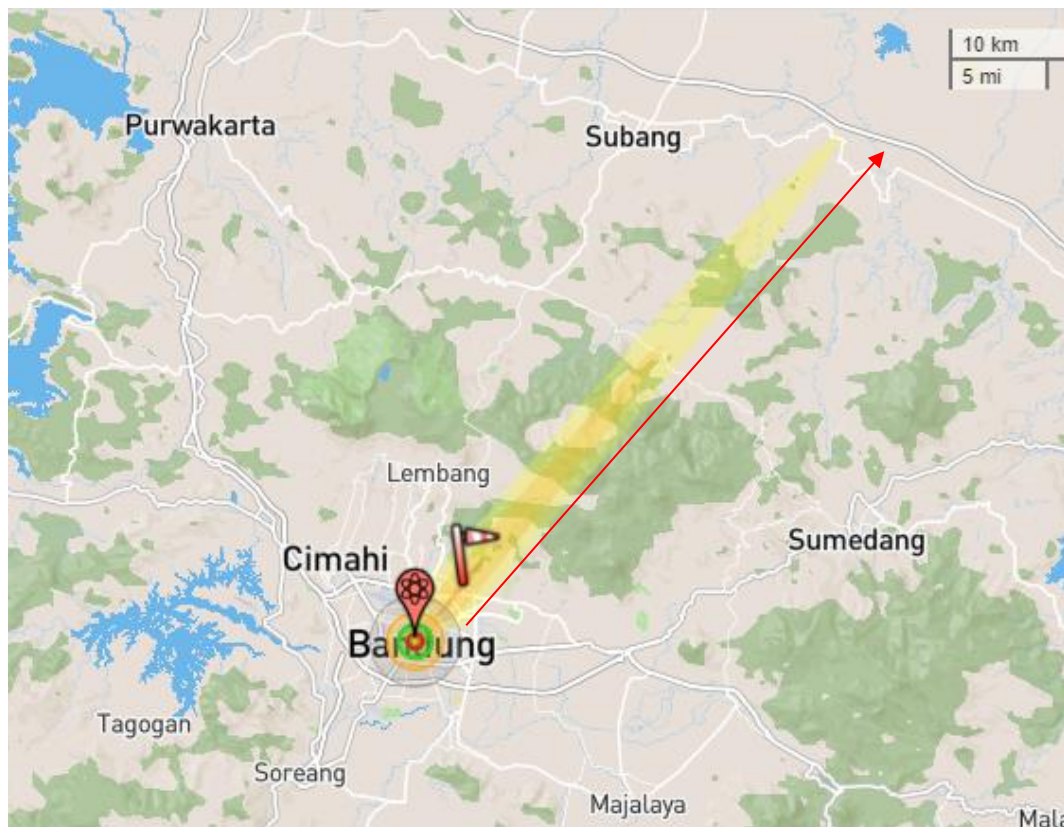


Gambar 4. 1 Skenario detonasi senjata nuklir dengan yield 20 Kiloton (Kt), area 1 radius *fireball*, 2 radius *heavy blast damage*, 3 radius radiasi, 4 radius *moderate blast damage*, 5 radius radiasi termal, 6 radius *light blast damage* dan 7 jangkauan radiasi *fallout*

Sumber: diolah peneliti

Gambar 4. 1 merupakan ilustrasi detonasi senjata nuklir dengan *yield* 20 Kt, berbahan bakar jenis *high enriched* Uranium dengan massa Uranium 5.51 Kg didetonasi di udara pada ketinggian 180 m diatas permukaan tanah. Pada ilustrasi ini, senjata nuklir yang digunakan memiliki massa, *yield* dan bahan bakar yang sama dengan senjata nuklir *Fat Man* milik Amerika Serikat. (G. Samuel dan J. D Philip, 1977) Area 1 merupakan radius maksimal dari *fire ball* senjata nuklir sekitar 0.13 km², kerusakan pada daratan (ground) bergantung pada ketinggian terjadinya detonasi, jika *fire ball* menyentuh tanah maka muatan radioaktif *fallout* akan meningkat signifikan, sehingga apapun yang berada dalam radius ini akan lebur; Area 2 radius *heavy blast damage* dengan tekanan 20 psi sekitar 2.23 km², konsentrat keras dari bangunan akan menyebabkan kerusakan dengan tingkat kefatalan mendekati 100%. Optimasi efek ini terjadi pada ketinggian *burst* 450 m; Area 3 radius paparan radiasi dengan dosis ionisasi 500 rem terjadi sekitar 6.11 km², dosis ionisasi sebesar itu akan menyebabkan tingkat kefatalan yang sangat tinggi, hingga dalam waktu 1 bulan 15% orang yang melintasi area ini akan meninggal karena kanker akibat paparan radiasi; Area 4 radius *moderat blast* dengan tekanan 5 psi sekitar 6.36 km², akan menyebabkan kerusakan pada bangunan dan tingkat kefatalan tergantung pada area sebaran, memiliki potensi yang tinggi untuk menyebabkan kebakaran; Area 5 radius radiasi termal dengan *third degree burn* sekitar 16.1 km², luka bakar ke seluruh lapisan kulit, dan seringkali tidak menimbulkan rasa sakit karena merusak saraf nyeri, dapat menyebabkan cedera jaringan atau kecacatan yang parah hingga memerlukan amputasi. Probabilitas 100% untuk *third degree burn* adalah 8,9 kal/cm; Area 6 radius *light blast damage* dengan tekanan 1 psi sekitar 43 km², dapat menyebabkan kaca jendela pada area ini pecah yang dapat menyebabkan kecelakaan pada orang-orang yang mendekati kaca untuk melihat *flash* dari ledakan nuklir; Area 7 radius jangkauan *fallout* radiasi produk fisi yang terbawa angin dengan estimasi kecepatan angin 24

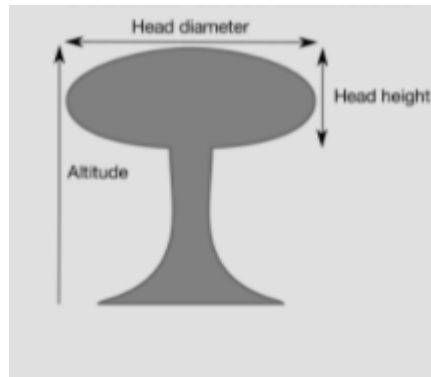
km/jam, jangkauan *fallout* yang terbawa angin terbagi menjadi 4 rentang yaitu 1 rem/h (terbawa angin 53.2 km, lebar 4.56 km, area kontaminasi 325 km²), 10 rem/h (31.2 km, 2.57 km, 142 km²), 100 rem/h (9.15 km, 0.58 km, 27.7 km²) dan 1000 rem/h (0.93 km, 2.57 km, 142 km²) sedangkan dosis maksimum maksimum yang diterima oleh seseorang menurut Badan Pengawas Teknologi Nuklir dalam keputusan nomor 12 /ka-BAPETEN/VI-99 tentang keselamatan kerja adalah 50 rem/y. Jangkauan *fallout* maksimum berdasarkan kecepatan angin 24 km/j ditampilkan pada Gambar 4.2.



Gambar 4. 2 Jangkauan maksimum *fallout*, panah merah jangkauan jarak maksimum dari target detonasi

Sumber: diolah peneliti

Detonasi senjata nuklir akan menciptakan suatu peristiwa yang disebut *mushroom cloud* akibat ledakan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.3.



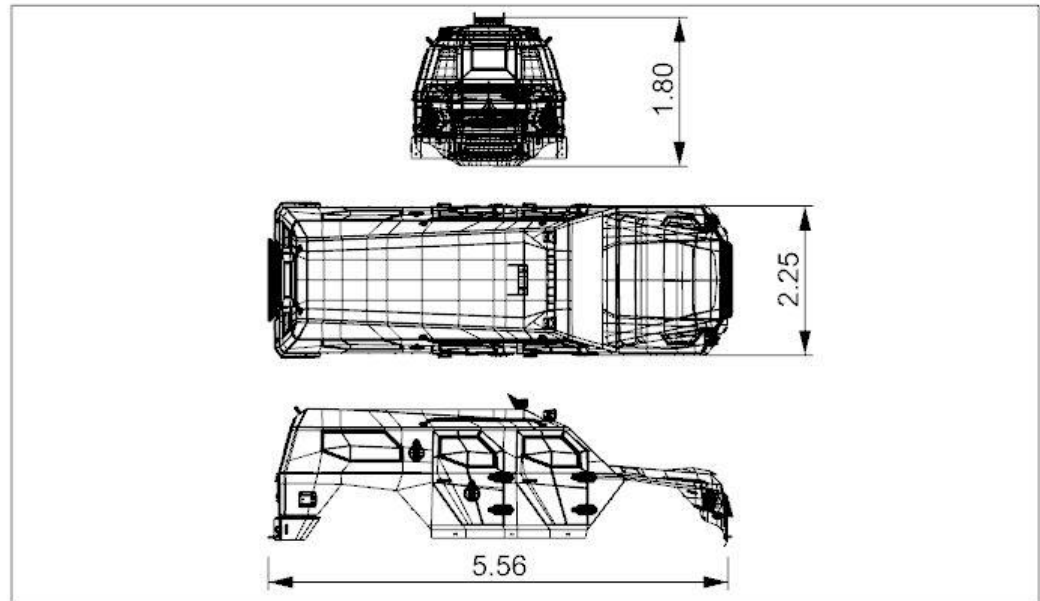
Gambar 4. 3 *Mushroom cloud* dengan *altitude* 7.21 km, *head diameter* 5.19 km, ketinggian *height* 3.38 km.

Sumber: W, Alex

Ilustrasi detonasi senjata nuklir dilakukan di Kota Bandung – Jawa Barat menurut wikipedia memiliki luas kota 167.3 km² artinya jika dianggap sebaran fisi bahan bakar Uranium sebanyak 5.51 kg terjadi secara merata maka akan terdapat 32.94 g/km² Uranium yang tersebar di kota bandung. Pada ilustrasi dampak *fallout* terdapat paparan minimum yang kemudian diasumsikan oleh peneliti sebagai satu fisi yang diperhitungkan sebagai area yang mungkin untuk dilakukan penembusan atau evakuasi menggunakan kendaraan taktis 4x4.

4.1.2 Kendaraan Taktis 4x4

Kendaraan taktis 4x4 yang menjadi model acuan dalam penelitian ini ditampilkan pada Gambar 4.4.



Gambar 4. 4 Dimensi acuan bodi kendaraan taktis 4x4, bagian atas tampak depan, tengah tampak atas dan bawah tampak samping

Sumber: diolah peneliti

Dimensi acuan pada Gambar 4. 4 merupakan salah satu kendaraan taktis 4x4 yang diperjelas secara visual bagian rangka bodi oleh peneliti. Ketebalan yang diasumsikan 14.5 mm. Dimensi ini digunakan untuk mempertimbangkan perubahan massa atau bobot kendaraan setelah dan sebelum penambahan Pb pada bodi kendaraan.

4.1.3 Spesifikasi Material

4.1.3.1 Baja

Material baja yang digunakan pada penelitian ini memiliki *mechanical properties* seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 *Mechanical properties* baja

<i>Hardness</i> (HB)	Charpy-V, 10x10 mm test specimen Min.	<i>Proof Stress</i> $R_{p0.2}$ (min MPa)	<i>Tensile Strength</i> R_m (MPa)	<i>Elongation</i> A_{50} (min %)
450-500	25 J/-40°C	1400	1640	10

Sumber: PT. Pindad

Baja yang digunakan sebagai sampel bodi kendaraan takstis 4x4 dalam penelitian ini memiliki massa jenis sebesar 5.2324 g/cm^3 atau samadengan 5232.4 kg/m^3 dengan ketebalan 3 cm. Komposisi kimia baja dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Komposisi kimia baja

Unsur	No. Atom	Fraksi Massa
C	6	0.0032
Si	14	0.004
Mn	25	0.012
P	15	0.00015
S	16	0.0001
Cr	24	0.0101
Ni	28	0.0181
Mo	42	0.007
B	5	0.00005
Fe	26	0.9453

Sumber: PT. Pindad

Dengan asumsi dimensi kendaraan dimensi bodi kendaraan Panjang= 5.65m, Lebar= 2.25m Tinggi= 1.80m dan Ketebalan baja = 0.0145 m. Maka bobot kendaraan adalah 3.35 ton.

4.1.3.2 Baja dengan Penambahan Pb

Baja dengan komposisi kimia seperti pada Tabel 4.1 diatas kemudian ditambahkan dengan material Pb sebesar 5% yang dapat ditemukan pada proses *ball milling*, karena penambahan Pb sebesar 10% tidak disarankan karena keterbatasan regulasi dan pertimbangan kadungan racun dalam Pb. (M. S. Mansy., *at. al*, 2021, E Nunes, *et. al.*, 2002) Penambahan sebesar 5% tergolong dalam baja panduan menengah atau jumlah unsur paduan kurang dari 10%. Penambahaan ini ditujukan sebagai upaya untuk meningkatkan kemampuan bodi baja kendaraan dalam menahan radiasi *gamma* dan neutron. Persentase penambahan Pb sebesar 5% berdasarkan literatur tidak akan merubah *mechanical properties* dari baja yang sudah disesuaikan dengan kebutuhan sebagai bodi kendaraan taktis 4x4. (*Metals*

Handbook, 1998. J. A. Schey *at., all.*, 1977) Komposisi kimia setelah penambahan Pb ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Komposisi kimia baja dengan penambahan Pb

Unsur	No. Atom	Fraksi Massa
C	6	0.00304
Si	14	0.000238
Mn	25	0.0038
P	15	0.003325
S	16	0.00076
Cr	24	0.003325
Ni	28	0.0114
Mo	42	0.00285
B	5	0.000019
Fe	26	0.921244
Pb	82	0.05

Sumber: PT. Pindad

Dengan asumsi dimensi kendaraan dimensi bodi kendaraan Panjang= 5.65 m, Lebar= 2.25 m Tinggi= 1.80 m dan Ketebalan baja = 0.0145 m. Maka bobot kendaraan adalah 3.43 ton, terjadi penambahan bobot 74.7 Kg.

4.1.3.3 Area Deteksi

Area deteksi digunakan sebagai suatu pendeteksi radiasi di dalam kendaraan taktis 4x4.

4.1.4 *Quality Factor Energy-dependent (Q_n/Q_γ)*

Quality Factor (Q) merupakan suatu standar prosedur yang disarankan ICRP dalam melakukan pengukuran dosis radiasi. (ICRP 74, H. Schumacer dan B. R. L Sibert, 1992) Q memiliki nilai yang berbeda untuk setiap jenis dan energi sumber yang digunakan. Nilai Q yang digunakan pada penelitian ini disajikan pada Tabel 4.4 sesuai energi dan jenis sumber.

Tabel 4. 4 Quality factor berdasarkan energi neutron dan gamma yang digunakan

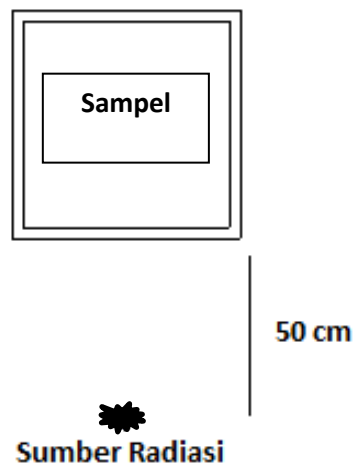
No.	Neutron		Gamma	
	Energi (MeV)	Q_n	Energi (MeV)	Q_γ
1	2.50E-08	3.99	1.00E-02	7.2
2	1.00E-07	1.93	1.50E-02	3.19
3	1.00E-06	0.612	2.00E-02	1.81
4	1.00E-05	0.203	3.00E-02	0.9
5	1.00E-04	0.0828	4.00E-02	0.62
6	1.00E-03	0.445	5.00E-02	0.5
7	1.00E-02	9.91	6.00E-02	0.47
8	1.00E-01	157	8.00E-02	0.49
9	5.00E-01	366	1.00E-01	0.58
10	1.00E+00	452	1.50E-01	0.85
11	1.50E+00	423	2.00E-01	1.15
12	2.00E+00	413	3.00E-01	1.8
13	2.50E+00	394	4.00E-01	2.38
14	3.00E+00	401	5.00E-01	2.93
15	3.50E+00	435	6.00E-01	3.44
16	4.20E+00	403	8.00E-01	4.38
17	4.60E+00	373	1.00E+00	5.2
18	5.00E+00	389	1.50E+00	6.9
19	5.40E+00	341	2.00E+00	8.6
20	5.80E+00	354	3.00E+00	11.1
21	6.20E+00	352	4.00E+00	13.4
22	6.60E+00	357	5.00E+00	15.5
23	7.00E+00	363	6.00E+00	17.6
24	7.80E+00	363	8.00E+00	21.6
25	8.20E+00	347	1.00E+01	25.6
26	8.60E+00	357		
27	9.00E+00	366		
28	9.40E+00	370		
29	9.80E+00	379		
30	1.00E+01	391		

Sumber: ICRP 74, H. Schuhmacer dan B. R. L Sibert (1992)

4.2 Hasil Pengumpulan Data

Pengukuran dosis radiasi dilakukan dengan variasi sumber dan energi yang berbeda. Pustaka data sumber radiasi yang digunakan dalam perhitungan yaitu *Evaluated Nuclear Data Formats* versi B-VI (ENDF/B-VI) dan

Evaluated Nuclear Data Library (ENDL). Sumber radiasi yang digunakan yaitu neutron dan *gamma*. Rentang energi neutron dari 2.5E-08 MeV - 10 MeV, sedangkan untuk energi *gamma* dari 1E-02 MeV - 10 MeV. Rentang energi tersebut berdasarkan data ICRP 74 yang sudah dilakukan pengujian untuk masing-masing nilai Q. Setiap sumber radiasi berada pada jarak 50 cm seperti pada Gambar 4.1.

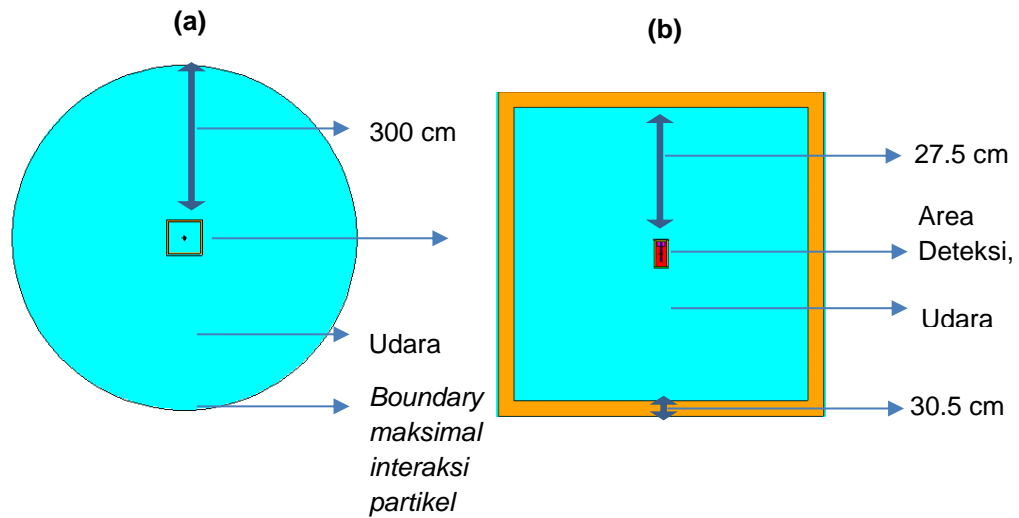


Gambar 4. 5 Jarak sumber terhadap baja

Sumber: diolah peneliti

4.2.1 Model Visual Dua (2D) dan Tiga Dimensi (3D)

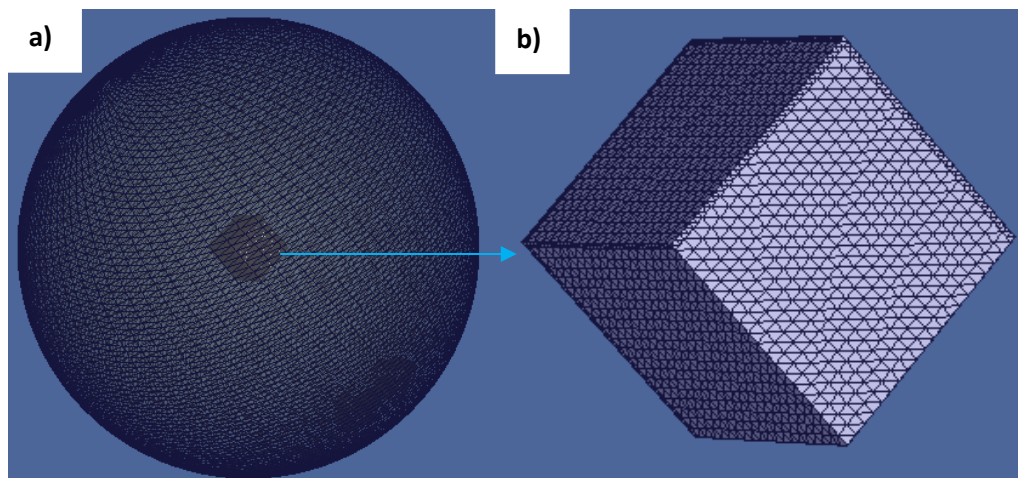
Pada penelitian ini untuk memastikan model yang digunakan dalam simulasi sesuai dengan perancangan, maka kode yang disusun dapat diproses menggunakan Vised untuk menampilkan model geometeri dalam tampilan 2D - 3D dan posisi sumber.



Gambar 4. 6 Model 2D, a) tampilan secara keseluruhan area interaksi partikel dengan lingkaran batas maksimum, kotak tengah bodi baja kendaraan, area deteksi pada pusat lingkaran dan biru cyan udara, b) tampilan baja kendaraan berwarna oranye, area deteksi persegi panjang dominasi berwarna merah dan udara berwarna cyan

Sumber: diolah peneliti

Tampilan model dalam 2D seperti pada Gambar 4.2. Bagian a) tampilan 2D secara keseluruhan, meliputi sampel baja kendaraan taktis 4x4 dengan bentuk persegi dan lingkaran lingkungan. Lingkaran lingkungan merupakan batasan lingkungan interaksi partikel. Bagian b) tampilan 2D yang diperbesar dari baja berwarna jingga, dapat terlihat di dalam persegi terdapat geometri area deteksi sebagai pendeteksi radiasi jika terdapat radiasi yang menembus baja. Baja memiliki ketebalan 3 cm dengan panjang setiap sisi 30 cm dan detektor terletak di titik pusat baja.



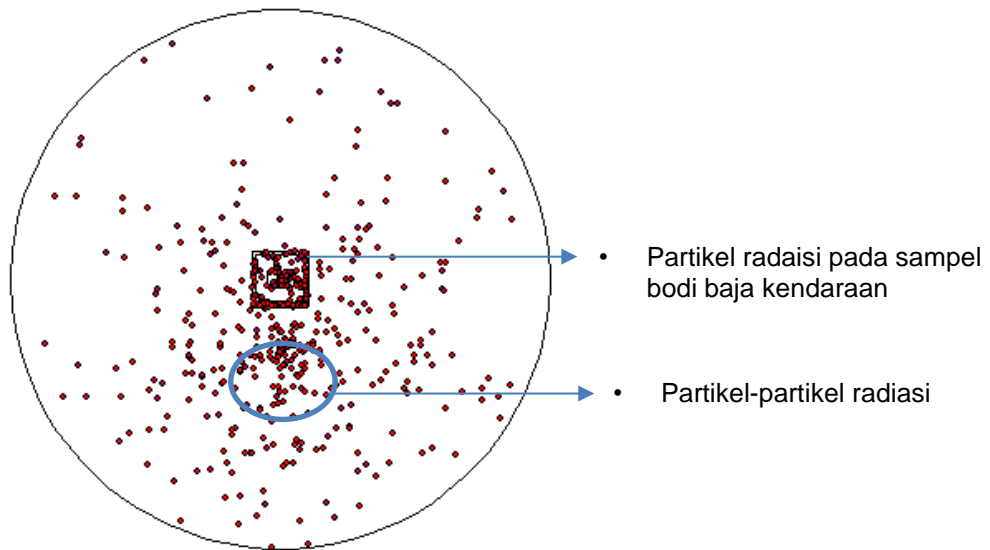
Gambar 4. 7 Model 3D, a) tampilan secara keseluruhan, b) tampilan baja bodi kendaraan

Sumber: diolah peneliti

Pada Gambar 4.7 ditampilkan model 3D yang digunakan dalam penelitian. Setiap bagian yang ditampilkan menunjukkan model geometri lebih nyata, dimana bagian (a) berbentuk bola dan (b) berbentuk kubus. Sehingga model yang akan diuji sudah dipastikan sesuai secara geometri untuk kemudian melakukan pengujian menggunakan MCNP.

4.2.2 Hasil Simulasi Paparan Radiasi

Geometri yang sudah dipastikan sesuai dengan rancangan selanjutnya diuji dengan *tally mode* F6 untuk sumber neutron dan *gamma* agar mendapatkan data deposisi energi rata-rata dengan satuan MeV. Kartu DE (*Dose Energy*) dan DF (*Dose Function*) digunakan untuk mengontrol data agar sesuai standar ICRP 74 dan 60 yang telah mempertimbangkan faktor Q *non-linear* sehingga satuan dari hasil yang diperoleh menjadi Sv/h. Area pengamatan yaitu pada bagian pusat kotak baja.



Gambar 4. 8 Tampilan visual interaksi partikel radiasi berwarna merah dan bod baja berbentuk kotak

Sumber: diolah peneliti

Interaksi partikel pada model pengujian dapat dilihat secara visul 2D menggunakan Vised seperti pada Gambar 4.8.

4.2.2.1 Hasil Deteksi Tanpa Bodi Baja

Pengujian deteksi deposisi energi rata-rata dari sumber radiasi neutron dan *gamma* pada pusat area deteksi tanpa bodi baja kendaraan, selanjutnya disebut ***unshielded***. Energi radiasi bervariasi dari terendah – tertinggi. Hasil yang diperoleh yaitu data $D_n^{*(10)}$ *absorbed dose neutron* dan $D_\gamma^{*(10)}$ data *absorbed dose gamma*. Data pada Tabel 4.6 termasuk ***unshielded*** atau sumber diarahkan secara langsung tanpa penghalang selain udara.

Tabel 4. 5 Data *unshielded absorbed dose neutron* pada area pengamatan

No.	Energi (MeV)	$D_n^{*(10)}$ (Sv/h)	Error (%)
1	2.50E-08	9.66E-18	0.96
2	1.00E-07	9.89E-18	0.88
3	1.00E-06	7.51E-18	0.88

4	1.00E-05	7.90E-18	0.96
5	1.00E-04	7.38E-18	0.93
6	1.00E-03	1.08E-17	0.91
7	1.00E-02	4.32E-17	0.98
8	1.00E-01	7.31E-16	1.06
9	5.00E-01	7.28E-15	1.07
10	1.00E+00	1.99E-14	1.06
11	1.50E+00	2.26E-14	1.08
12	2.00E+00	3.05E-14	1.08
13	2.50E+00	3.82E-14	1.09
14	3.00E+00	4.18E-14	1.08
15	3.50E+00	4.95E-14	1.05
16	4.20E+00	5.39E-14	1.07
17	4.60E+00	5.54E-14	1.1
18	5.00E+00	5.72E-14	1.09
19	5.40E+00	6.41E-14	1.09
20	5.80E+00	6.88E-14	1.09
21	6.20E+00	7.76E-14	1.1
22	6.60E+00	8.40E-14	1.11
23	7.00E+00	8.97E-14	1.11
24	7.80E+00	1.13E-13	1.11
25	8.20E+00	1.25E-13	1.12
26	8.60E+00	1.37E-13	1.12
27	9.00E+00	1.48E-13	1.12
28	9.40E+00	1.68E-13	1.12
29	9.80E+00	1.84E-13	1.13
30	1.00E+01	1.99E-13	1.13

Sumber: diolah peneliti

Pada Tabel 4.7 termasuk data dosis gamma *unshielded*, yaitu tidak terdapat material baja antara sumber dan detektor.

Tabel 4. 6 Data *unshielded absorbed dose gamma* pada area pengamatan

No.	Energi (MeV)	$D_{\gamma}^{*(10)}$ (Sv/h)	Error (%)
1	1.00E-02	1.25E-12	2.37
2	1.50E-02	3.03E-10	2.4
3	2.00E-02	1.92E-09	2.26
4	3.00E-02	6.80E-09	1.48
5	4.00E-02	9.65E-09	1.26
6	5.00E-02	1.36E-08	1.18

7	6.00E-02	1.73E-08	1.15
8	8.00E-02	2.39E-08	1.13
9	1.00E-01	2.99E-08	1.14
10	1.50E-01	4.26E-08	1.18
11	2.00E-01	5.42E-08	1.2
12	3.00E-01	7.56E-08	1.22
13	4.00E-01	9.45E-08	1.21
14	5.00E-01	1.13E-07	1.19
15	6.00E-01	1.30E-07	1.18
16	8.00E-01	1.63E-07	1.17
17	1.00E+00	1.94E-07	1.16
18	1.50E+00	2.66E-07	1.15
19	2.00E+00	3.38E-07	1.15
20	3.00E+00	4.95E-07	1.15
21	4.00E+00	6.62E-07	1.16
22	5.00E+00	8.42E-07	1.18
23	6.00E+00	1.03E-06	1.19
24	8.00E+00	1.43E-06	1.21
25	1.00E+01	1.85E-06	1.23

Sumber: diolah peneliti

4.2.2.2 Hasil Deteksi pada Pusat Bodi Baja

Data hasil pengujian *absorbed dose* terdeteksi di dalam bodi baja kendaraan tanpa tambahan Pb, selanjutnya disebut ***shielded***. Data ditunjukkan pada Tabel 4.8 untuk hasil dari sumber neutron pada pusat *shielded*.

Tabel 4. 7 Data *shielded absorbed dose neutron* tanpa Pb pada area pengamatan

No.	Energi (MeV)	$D_n^{*(10)}$ (Sv/h)	Error (%)
1	2.50E-08	2.54E-18	1.67
2	1.00E-07	4.30E-18	1.31
3	1.00E-06	6.81E-18	0.93
4	1.00E-05	6.83E-18	1.01
5	1.00E-04	7.46E-18	0.94
6	1.00E-03	8.01E-18	0.99
7	1.00E-02	4.54E-17	0.98
8	1.00E-01	7.05E-16	1.07
9	5.00E-01	7.57E-15	1.08
10	1.00E+00	1.75E-14	1.15

11	1.50E+00	2.25E-14	1.09
12	2.00E+00	2.97E-14	1.08
13	2.50E+00	3.68E-14	1.1
14	3.00E+00	4.01E-14	1.1
15	3.50E+00	4.59E-14	1.08
16	4.20E+00	4.74E-14	1.12
17	4.60E+00	4.84E-14	1.15
18	5.00E+00	5.03E-14	1.13
19	5.40E+00	5.53E-14	1.14
20	5.80E+00	5.97E-14	1.14
21	6.20E+00	6.65E-14	1.15
22	6.60E+00	7.16E-14	1.17
23	7.00E+00	7.57E-14	1.17
24	7.80E+00	9.51E-14	1.18
25	8.20E+00	1.05E-13	1.19
26	8.60E+00	1.15E-13	1.2
27	9.00E+00	1.23E-13	1.2
28	9.40E+00	1.38E-13	1.21
29	9.80E+00	1.53E-13	1.21
30	1.00E+01	1.63E-13	1.21

Sumber: diolah peneliti

Pada Tabel 4.9 data *dose* untuk hasil dari sumber *gamma* yang terdeteksi pada area pengamatan.

Tabel 4. 8 Data *shielded absorbed dose gamma* tanpa Pb pada area pengamatan

No.	Energi (MeV)	$D_{\gamma}^{*(10)}$ (Sv/h)	Error (%)
1	1.00E-02	4.57E-14	3.8
2	1.50E-02	1.40E-11	3.11
3	2.00E-02	9.48E-11	3.27
4	3.00E-02	3.88E-10	3.61
5	4.00E-02	5.55E-10	3
6	5.00E-02	7.87E-10	3.51
7	6.00E-02	1.05E-09	3.44
8	8.00E-02	1.52E-09	3.7
9	1.00E-01	3.15E-09	2.79
10	1.50E-01	4.55E-09	3.7
11	2.00E-01	1.25E-08	2.53
12	3.00E-01	2.99E-08	1.88
13	4.00E-01	4.69E-08	1.67
14	5.00E-01	6.11E-08	1.56

15	6.00E-01	7.52E-08	1.49
16	8.00E-01	1.03E-07	1.41
17	1.00E+00	1.30E-07	1.35
18	1.50E+00	1.89E-07	1.31
19	2.00E+00	2.51E-07	1.28
20	3.00E+00	3.70E-07	1.28
21	4.00E+00	5.00E-07	1.29
22	5.00E+00	6.33E-07	1.31
23	6.00E+00	7.68E-07	1.34
24	8.00E+00	1.04E-06	1.38
25	1.00E+01	1.32E-06	1.42

Sumber: diolah peneliti

4.2.2.3 Hasil Deteksi pada pusat Bodi Baja+Pb

Data hasil pengujian dosis terdeteksi di dalam baja dengan tambahan Pb, selanjutnya disebut ***shielded + Pb***. Data ditunjukkan pada Tabel 4.10 untuk hasil dari sumber neutron dan Tabel 4.11 hasil dari sumber *gamma*.

Tabel 4. 9 Data *shielded absorbed dose neutron* dengan tambahan Pb pada area pengamatan

No.	Energi (MeV)	$D_n^{*(10)}$ (Sv/h)	Error (%)
1	2.50E-08	2.33E-18	1.75
2	1.00E-07	4.05E-18	1.34
3	1.00E-06	6.63E-18	1.02
4	1.00E-05	6.68E-18	0.94
5	1.00E-04	7.92E-18	0.99
6	1.00E-03	7.47E-18	0.94
7	1.00E-02	4.54E-17	0.98
8	1.00E-01	7.06E-16	1.07
9	5.00E-01	7.56E-15	1.09
10	1.00E+00	1.75E-14	1.15
11	1.50E+00	2.25E-14	1.09
12	2.00E+00	2.95E-14	1.09
13	2.50E+00	3.69E-14	1.11
14	3.00E+00	4.00E-14	1.1
15	3.50E+00	4.56E-14	1.08
16	4.20E+00	4.70E-14	1.12
17	4.60E+00	4.97E-14	1.13
18	5.00E+00	4.80E-14	1.16

19	5.40E+00	5.49E-14	1.15
20	5.80E+00	5.89E-14	1.15
21	6.20E+00	6.59E-14	1.15
22	6.60E+00	7.07E-14	1.17
23	7.00E+00	7.46E-14	1.18
24	7.80E+00	9.36E-14	1.19
25	8.20E+00	1.03E-13	1.2
26	8.60E+00	1.13E-13	1.2
27	9.00E+00	1.21E-13	1.21
28	9.40E+00	1.36E-13	1.22
29	9.80E+00	1.50E-13	1.22
30	1.00E+01	1.60E-13	1.22

Sumber: diolah peneliti

Tabel 4. 10 Data *shieded absorbed dose gamma* dengan tambahan Pb pada area pengamatan

No.	Energi (MeV)	$D_{\gamma}^{*(10)}$ (Sv/h)	Error (%)
1	1.00E-02	2.24E-14	3.83
2	1.50E-02	5.95E-12	3.74
3	2.00E-02	3.89E-11	3.65
4	3.00E-02	1.58E-10	3.56
5	4.00E-02	2.44E-10	3.47
6	5.00E-02	3.85E-10	3.38
7	6.00E-02	5.10E-10	3.29
8	8.00E-02	9.13E-10	3.2
9	1.00E-01	1.22E-09	3.11
10	1.50E-01	3.52E-09	0.94
11	2.00E-01	8.56E-09	1.33
12	3.00E-01	1.80E-08	0.77
13	4.00E-01	3.23E-08	0.63
14	5.00E-01	4.68E-08	0.56
15	6.00E-01	6.04E-08	0.53
16	8.00E-01	8.61E-08	0.49
17	1.00E+00	1.11E-07	0.46
18	1.50E+00	1.69E-07	0.43
19	2.00E+00	2.26E-07	0.42
20	3.00E+00	3.38E-07	0.42
21	4.00E+00	4.55E-07	0.42
22	5.00E+00	5.75E-07	0.43
23	6.00E+00	6.97E-07	0.44
24	8.00E+00	9.45E-07	0.46
25	1.00E+01	1.19E-06	0.47

Sumber: diolah peneliti

4.3 Hasil Pengolahan Data

Data dosis yang diperoleh dari hasil deteksi pada area pusat pengamatan diolah untuk mendapatkan data dosis ekuivalen pada setiap model dan sumber menggunakan *Quality Factor Energy-dependent non-linear*.

4.3.1 Dosis Ekuivalen *Unshielded*

Data dosis ekuivalen untuk model *unshielded* dengan sumber radisi neutron ditampilkan dalam Tabel 4.12.

Tabel 4. 11 Dosis ekuivalen *unshielded neutron* pada area deteksi

No.	Energi (MeV)	$H_n^*(10)/\Phi$ (pSv-cm ²)	Error (%)
1	2.50E-08	3.47E-04	0.96
2	1.00E-07	1.72E-04	0.88
3	1.00E-06	4.14E-05	0.88
4	1.00E-05	1.44E-05	0.96
5	1.00E-04	5.50E-06	0.93
6	1.00E-03	4.33E-05	0.91
7	1.00E-02	3.85E-03	0.98
8	1.00E-01	1.03E+00	1.06
9	5.00E-01	2.40E+01	1.07
10	1.00E+00	8.10E+01	1.06
11	1.50E+00	8.62E+01	1.08
12	2.00E+00	1.14E+02	1.08
13	2.50E+00	1.35E+02	1.09
14	3.00E+00	1.51E+02	1.08
15	3.50E+00	1.94E+02	1.05
16	4.20E+00	1.95E+02	1.07
17	4.60E+00	1.86E+02	1.1
18	5.00E+00	2.00E+02	1.09
19	5.40E+00	1.97E+02	1.09
20	5.80E+00	2.19E+02	1.09
21	6.20E+00	2.46E+02	1.1
22	6.60E+00	2.70E+02	1.11
23	7.00E+00	2.93E+02	1.11
24	7.80E+00	3.71E+02	1.11
25	8.20E+00	3.91E+02	1.12
26	8.60E+00	4.41E+02	1.12

27	9.00E+00	4.87E+02	1.12
28	9.40E+00	5.58E+02	1.12
29	9.80E+00	6.29E+02	1.13
30	1.00E+01	7.00E+02	1.13

Sumber: diolah peneliti

Data dosis ekuivalen untuk model *unshielded* dengan sumber radisi gamma ditampilkan dalam Tabel 4.13.

Tabel 4. 12 Dosis ekuivalen *unshielded gamma* pada area deteksi

No.	Energi (MeV)	$H_{\gamma}^*(10)/\Phi$ (pSv-cm ²)	Error (%)
1	1.00E-02	1.29E-06	3.83
2	1.50E-02	1.39E-04	3.74
3	2.00E-02	5.00E-04	3.65
4	3.00E-02	8.82E-04	3.56
5	4.00E-02	8.62E-04	3.47
6	5.00E-02	9.77E-04	3.38
7	6.00E-02	1.17E-03	3.29
8	8.00E-02	1.69E-03	3.2
9	1.00E-01	2.50E-03	3.11
10	1.50E-01	5.23E-03	0.94
11	2.00E-01	8.99E-03	1.33
12	3.00E-01	1.96E-02	0.77
13	4.00E-01	3.24E-02	0.63
14	5.00E-01	4.76E-02	0.56
15	6.00E-01	6.43E-02	0.53
16	8.00E-01	1.03E-01	0.49
17	1.00E+00	1.45E-01	0.46
18	1.50E+00	2.65E-01	0.43
19	2.00E+00	4.20E-01	0.42
20	3.00E+00	7.91E-01	0.42
21	4.00E+00	1.28E+00	0.42
22	5.00E+00	1.88E+00	0.43
23	6.00E+00	2.62E+00	0.44
24	8.00E+00	4.45E+00	0.46
25	1.00E+01	6.83E+00	0.47

Sumber: diolah peneliti

4.3.2 Dosis Ekuivalent *Shielded*

Data dosis ekuivalen untuk model *shielded* dengan sumber radisi neutron ditampilkan dalam Tabel 4.14.

Tabel 4. 13 Dosis ekuivalen *shielded neutron* pada pada area deteksi

No.	Energi (MeV)	$H_n^*(10)/\phi$ (pSv-cm ²)	Error (%)
1	2.50E-08	9.13E-05	0.96
2	1.00E-07	7.46E-05	0.88
3	1.00E-06	3.75E-05	0.88
4	1.00E-05	1.25E-05	0.96
5	1.00E-04	5.56E-06	0.93
6	1.00E-03	3.21E-05	0.91
7	1.00E-02	4.05E-03	0.98
8	1.00E-01	9.95E-01	1.06
9	5.00E-01	2.49E+01	1.07
10	1.00E+00	7.13E+01	1.06
11	1.50E+00	8.55E+01	1.08
12	2.00E+00	1.10E+02	1.08
13	2.50E+00	1.31E+02	1.09
14	3.00E+00	1.45E+02	1.08
15	3.50E+00	1.80E+02	1.05
16	4.20E+00	1.72E+02	1.07
17	4.60E+00	1.63E+02	1.1
18	5.00E+00	1.76E+02	1.09
19	5.40E+00	1.70E+02	1.09
20	5.80E+00	1.90E+02	1.09
21	6.20E+00	2.11E+02	1.1
22	6.60E+00	2.30E+02	1.11
23	7.00E+00	2.47E+02	1.11
24	7.80E+00	3.11E+02	1.11
25	8.20E+00	3.27E+02	1.12
26	8.60E+00	3.69E+02	1.12
27	9.00E+00	4.05E+02	1.12
28	9.40E+00	4.60E+02	1.12
29	9.80E+00	5.21E+02	1.13
30	1.00E+01	5.73E+02	1.13

Sumber: diolah peneliti

Data dosis ekuivalen untuk model *shielded* dengan sumber radisi gamma ditampilkan dalam Tabel 4.15.

Tabel 4. 14 Dosis ekuivalen *shielded gamma* pada pada area deteksi

No.	Energi (MeV)	$H_{\gamma}^*(10)/\Phi$ (pSv-cm ²)	Error (%)
1	1.00E-02	4.75E-08	3.83
2	1.50E-02	6.44E-06	3.74
3	2.00E-02	2.47E-05	3.65
4	3.00E-02	5.03E-05	3.56
5	4.00E-02	4.96E-05	3.47
6	5.00E-02	5.67E-05	3.38
7	6.00E-02	7.14E-05	3.29
8	8.00E-02	1.08E-04	3.2
9	1.00E-01	2.64E-04	3.11
10	1.50E-01	5.58E-04	0.94
11	2.00E-01	2.07E-03	1.33
12	3.00E-01	7.76E-03	0.77
13	4.00E-01	1.61E-02	0.63
14	5.00E-01	2.58E-02	0.56
15	6.00E-01	3.73E-02	0.53
16	8.00E-01	6.52E-02	0.49
17	1.00E+00	9.76E-02	0.46
18	1.50E+00	1.88E-01	0.43
19	2.00E+00	3.11E-01	0.42
20	3.00E+00	5.92E-01	0.42
21	4.00E+00	9.65E-01	0.42
22	5.00E+00	1.41E+00	0.43
23	6.00E+00	1.95E+00	0.44
24	8.00E+00	3.25E+00	0.46
25	1.00E+01	4.86E+00	0.47

Sumber: diolah peneliti

4.3.3 Dosis Ekuivalen *Shielded + Pb*

Data dosis ekuivalen untuk setiap model bodi baja kendaraan TKT 4x4 dengan penambahan unsur Pb pada sumber radisi neutron ditampilkan dalam Tabel 4.16.

Tabel 4. 15 Dosis ekuivalen *shielded+Pb neutron* pada pada area deteksi

No.	Energi (MeV)	$H_n^*(10)/\Phi$ (pSv-cm ²)	Error (%)
1	2.50E-08	8.37E-05	0.96
2	1.00E-07	7.04E-05	0.88
3	1.00E-06	3.65E-05	0.88
4	1.00E-05	1.22E-05	0.96
5	1.00E-04	5.90E-06	0.93
6	1.00E-03	2.99E-05	0.91
7	1.00E-02	4.05E-03	0.98
8	1.00E-01	9.97E-01	1.06
9	5.00E-01	2.49E+01	1.07
10	1.00E+00	7.12E+01	1.06
11	1.50E+00	8.57E+01	1.08
12	2.00E+00	1.10E+02	1.08
13	2.50E+00	1.31E+02	1.09
14	3.00E+00	1.44E+02	1.08
15	3.50E+00	1.79E+02	1.05
16	4.20E+00	1.71E+02	1.07
17	4.60E+00	1.67E+02	1.1
18	5.00E+00	1.68E+02	1.09
19	5.40E+00	1.69E+02	1.09
20	5.80E+00	1.88E+02	1.09
21	6.20E+00	2.09E+02	1.1
22	6.60E+00	2.27E+02	1.11
23	7.00E+00	2.44E+02	1.11
24	7.80E+00	3.06E+02	1.11
25	8.20E+00	3.22E+02	1.12
26	8.60E+00	3.63E+02	1.12
27	9.00E+00	3.99E+02	1.12
28	9.40E+00	4.53E+02	1.12
29	9.80E+00	5.12E+02	1.13
30	1.00E+01	5.63E+02	1.13

Sumber: diolah peneliti

Data dosis ekuivalen untuk setiap model bodi baja kendaraan TKT 4x4 dengan penambahan unsur Pb pada sumber radisi gamma ditampilkan dalam Tabel 4.17.

Tabel 4. 16 Dosis ekuivalen *shielded+Pb dose gamma* pada area deteksi

No.	Energi (MeV)	$H_{\gamma}^*(10)/\Phi$ (pSv-cm ²)	Error (%)
1	1.00E-02	2.32E-08	3.83
2	1.50E-02	2.74E-06	3.74
3	2.00E-02	1.02E-05	3.65
4	3.00E-02	2.06E-05	3.56
5	4.00E-02	2.19E-05	3.47
6	5.00E-02	2.78E-05	3.38
7	6.00E-02	3.46E-05	3.29
8	8.00E-02	6.45E-05	3.2
9	1.00E-01	1.02E-04	3.11
10	1.50E-01	4.31E-04	0.94
11	2.00E-01	1.42E-03	1.33
12	3.00E-01	4.67E-03	0.77
13	4.00E-01	1.11E-02	0.63
14	5.00E-01	1.98E-02	0.56
15	6.00E-01	2.99E-02	0.53
16	8.00E-01	5.44E-02	0.49
17	1.00E+00	8.30E-02	0.46
18	1.50E+00	1.68E-01	0.43
19	2.00E+00	2.81E-01	0.42
20	3.00E+00	5.41E-01	0.42
21	4.00E+00	8.78E-01	0.42
22	5.00E+00	1.29E+00	0.43
23	6.00E+00	1.77E+00	0.44
24	8.00E+00	2.94E+00	0.46
25	1.00E+01	4.40E+00	0.47

Sumber: diolah peneliti

4.3.4 Kinerja Baja sebagai Bodi Kendaraan Taktis 4x4 dalam Menahan Radiasi

Dalam menentukan atau mengukur kemampuan baja sebagai bodi kendaraan taktis 4x4 dalam menahan radiasi nuklir dapat dilihat dari faktor proteksi terhadap radiasi. Pada penelitian ini sumber radiasi nuklir terdiri dari neutron dan *gamma*, disimulasikan dan dihitung secara terpisah.

4.3.4.1 RPF Sumber Radiasi Neutron

RPF untuk sumber radiasi neutron dihitung menggunakan persamaan (5) yang dipertimbangkan sebagai NPF. Dari pengolahan data dosis ekuivalen diperoleh nilai NPF seperti dalam Tabel 4.18.

Tabel 4. 17 NPF *shielded* dan NPF_{Pb} *shielded+Pb*

No.	Energi (MeV)	NPF	Error (%)	NPF _{Pb}	Error (%)
1	2.50E-08	3.80	1.32	4.15	0.96
2	1.00E-07	2.30	1.10	2.44	0.88
3	1.00E-06	1.10	0.91	1.13	0.88
4	1.00E-05	1.16	0.99	1.18	0.96
5	1.00E-04	0.99	0.94	0.93	0.93
6	1.00E-03	1.35	0.95	1.45	0.91
7	1.00E-02	0.95	0.98	0.95	0.98
8	1.00E-01	1.04	1.07	1.04	1.06
9	5.00E-01	0.96	1.08	0.96	1.07
10	1.00E+00	1.14	1.11	1.14	1.06
11	1.50E+00	1.01	1.09	1.01	1.08
12	2.00E+00	1.03	1.08	1.03	1.08
13	2.50E+00	1.04	1.10	1.04	1.09
14	3.00E+00	1.04	1.09	1.05	1.08
15	3.50E+00	1.08	1.07	1.08	1.05
16	4.20E+00	1.14	1.10	1.15	1.07
17	4.60E+00	1.14	1.13	1.11	1.1
18	5.00E+00	1.14	1.11	1.19	1.09
19	5.40E+00	1.16	1.12	1.17	1.09
20	5.80E+00	1.15	1.12	1.17	1.09
21	6.20E+00	1.17	1.13	1.18	1.1
22	6.60E+00	1.17	1.14	1.19	1.11
23	7.00E+00	1.18	1.14	1.20	1.11
24	7.80E+00	1.19	1.15	1.21	1.11
25	8.20E+00	1.20	1.16	1.22	1.12
26	8.60E+00	1.20	1.16	1.22	1.12
27	9.00E+00	1.20	1.16	1.22	1.12
28	9.40E+00	1.21	1.17	1.23	1.12
29	9.80E+00	1.21	1.17	1.23	1.13
30	1.00E+01	1.22	1.17	1.24	1.13

Sumber: diolah peneliti

4.3.4.2 RPF Sumber Radiasi *Gamma*

RPF untuk sumber radiasi gamma dihitung menggunakan persamaan (6) yang dipertimbangkan sebagai GPF. Dari pengolahan data dosis ekuivalen gamma diperoleh nilai GPF seperti dalam Tabel 4.19.

Tabel 4. 18 GPF *shielded* dan GPF_{Pb} *shielded* +Pb

No.	Energi (MeV)	<i>GPF</i>	<i>Error (%)</i>	<i>GPF_{Pb}</i>	<i>Error (%)</i>
1	1.00E-02	27.26	3.09	55.68	3.10
2	1.50E-02	21.65	2.76	50.95	3.07
3	2.00E-02	20.23	2.77	49.27	2.96
4	3.00E-02	17.54	2.55	42.90	2.52
5	4.00E-02	17.39	2.13	39.46	2.37
6	5.00E-02	17.23	2.35	35.19	2.28
7	6.00E-02	16.38	2.30	33.82	2.22
8	8.00E-02	15.69	2.42	26.20	2.17
9	1.00E-01	9.48	1.97	24.46	2.13
10	1.50E-01	9.37	2.44	12.13	1.06
11	2.00E-01	4.35	1.87	6.33	1.27
12	3.00E-01	2.53	1.55	4.20	1.00
13	4.00E-01	2.01	1.44	2.93	0.92
14	5.00E-01	1.84	1.38	2.41	0.88
15	6.00E-01	1.72	1.34	2.15	0.86
16	8.00E-01	1.58	1.29	1.90	0.83
17	1.00E+00	1.49	1.26	1.75	0.81
18	1.50E+00	1.41	1.23	1.57	0.79
19	2.00E+00	1.35	1.22	1.50	0.79
20	3.00E+00	1.34	1.22	1.46	0.79
21	4.00E+00	1.32	1.23	1.46	0.79
22	5.00E+00	1.33	1.25	1.46	0.81
23	6.00E+00	1.34	1.27	1.48	0.82
24	8.00E+00	1.37	1.30	1.51	0.84
25	1.00E+01	1.40	1.33	1.55	0.85

Sumber: diolah peneliti

4.4 Pembahasan

Sistem proteksi kendaraan taktis 4x4 dari radiasi untuk kepentingan mendukung operasional militer, dipersiapkan untuk menghadapi lingkungan ancaman darurat radiasi nuklir. Darurat nuklir merupakan salah satu ancaman yang terdapat pada lingkungan NBC. Bahaya radiasi dari senjata

nuklir masih belum menjadi ancaman nyata, namun RAND *corporation* salah satu lembaga penelitian Amerika, dengan berbagai sumber termasuk menteri Departemen Pertahanan Amerika telah melakukan analisa dan dugaan potensi darurat senjata nuklir akan terjadi, salah satunya di wilayah Asia. Sebagai upaya kesiapan dalam sekenario terburuk yang mungkin terjadi, maka persiapan perlu untuk meningkatkan pertahanan dan keamanan Negara Kesatuan Republik Indonesia.

Dalam laporan Departemen Pertahanan Amerika persyaratan untuk pertahanan NBC harus memiliki sistem proteksi. Sistem proteksi harus memiliki kemampuan proteksi, deteksi, dekontaminasi dan *survivability*. Pengembangan sistem proteksi dari radiasi untuk kendaraan masih dilakukan secara tertutup, berdasarkan fakta sulitnya menemukan referensi terkait kemampuan proteksi dari radiasi nuklir terutama bagian bodi material kendaraan yang belum dipertimbangkan. Kemampuan deteksi dan dekontaminasi tidak tersedia secara spesifik, seperti disertai dengan *data sheet*. Sehingga pada penelitian ini, material Pb yang digunakan untuk melakukan peningkatan kemampuan proteksi terhadap radiasi nuklir berdasarkan riset bidang keamanan dan keselamatan reaktor nuklir dengan mempertimbangkan perubahan sifat mekanik berdasarkan penelitian .

Pada penelitian ini dilakukan simulasi dengan model kotak baja sebagai bodi baja kendaraan taktis 4x4 dan area deteksi di pusat kotak tersebut. Upaya peningkatan kemampuan proteksi dari radiasi nuklir yang diujikan peneliti yaitu dengan melakukan penambahan Pb pada bodi baja kendaraan. Hasil uji terhadap model bodi kendaraan akan dihasilkan *protection factor* untuk setiap sumber radiasi yang merepresentasikan kemampuan proteksi.

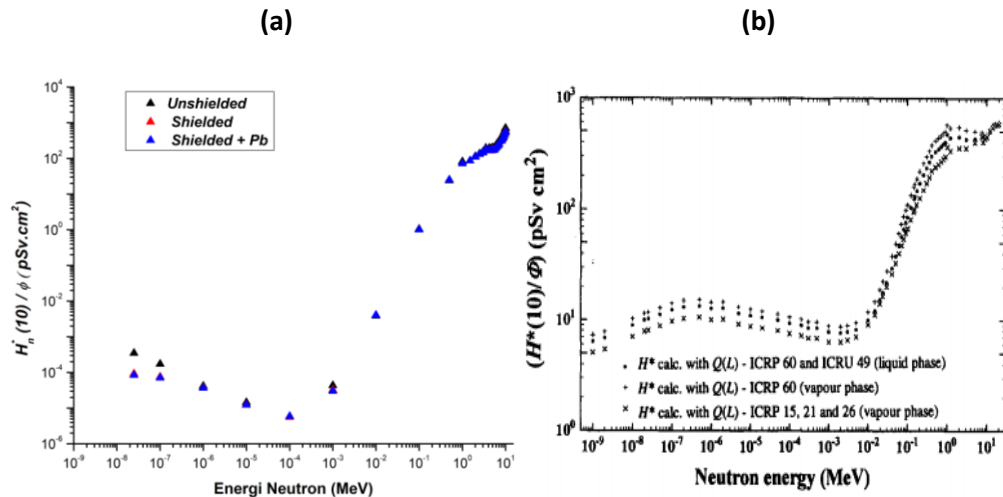
4.4.1 Kinerja Baja sebagai Bodi Kendaraan Taktis 4x4 dalam Menahan Radiasi

Kemampuan material dalam menahan radiasi bergantung pada komposisi material, massa jenis, ketebalan, jarak sumber, energi dan jenis sumber radiasi yang akan menentukan mikroskopis *cross sections* interaksinya. Pada penelitian properti model dan simulasi digunakan seperti pada data yang sudah dijelaskan pada sub bab sebelumnya. Model baja sebagai bodi digunakan istilah *shielded* dan baja yang ditambahkan Pb digunakan istilah *shielded + Pb*.

4.4.1.1 RPF Sumber Radiasi Neutron

Sumber radiasi neutron merupakan sumber radiasi tidak bermuatan yang memiliki daya tembus paling tinggi terhadap material. Suatu neutron insiden yang berinteraksi dengan material dapat terjadi beberapa probabilitas reaksi yang terjadi, yaitu seperti *leakage*, *capture*, *absorption* dan *scattering*. Setiap probabilitas reaksi tersebut memiliki reaksi lainnya. Probabilitas reaksi dari interaksi neutron dengan materi tergantung pada *cross section* reaksi, juga dipengaruhi oleh jenis material dan energi neutron insiden.

Pada simulasi dengan sumber radiasi neutron, telah dilakukan pengujian terhadap material baja dengan model kubus. Simulasi dilakukan menggunakan paket program MCNP 6 dengan pustaka data ENDL yang telah divalidasi untuk jenis material dan neutron yang digunakan. Hasil simulasi diperoleh data dosis serapan, kemudian diolah untuk mendapatkan nilai serapan dosis ekuivalen pada rentang energi 2.5E-8 – 10 MeV. Rentang energi neutron yang digunakan memiliki klasifikasi, yaitu energi neutron < 5E-7 MeV termasuk neutron termal, energi neutron 5E-7 – 5E-5 MeV termasuk neutron epitermal dan energi neutron 1-10 MeV (energi yang digunakan dalam penelitian) termasuk neutron cepat. Hasil pengolahan dapat dilihat dalam bentuk grafik pada Gambar 4.11 berikut.



Gambar 4. 9 Dosis ekuivalen neutron pada pusat pengamatan terhadap paparan radiasi neutron, (a) hasil peneliti, (b) publikasi ICRP

Sumber: diolah peneliti, ICRP(74)

Pada Gambar 4.9 (a) dosis ekuivalen dari neutron untuk model *unshielded*, *shielded* dan *shielded + Pb* yang dihasilkan oleh peneliti. Dosis ekuivalen untuk model *Unshielded*, yaitu antara sumber dan pusat pengamatan tidak terdapat material lain atau penghalang selain udara (¹⁶O, ¹⁴N dan ¹²C), diperoleh pola kurva yang identik dengan data hasil eksperimen dalam publikasi ICRP 74 ditunjukkan pada Gambar 4. 9 (b). Adapun perbedaan nilai yang diperoleh dapat disebabkan oleh perbedaan jarak dan luas area deteksi yang digunakan. Dalam publikasi ICRP 74 area deteksi (voxel) pada kedalaman 10 mm, sedangkan peneliti pada kedalaman 15 mm sehingga akumulasi nilai dosis terdeteksi peneliti relatif lebih kecil. Hal tersebut tidak menjadi permasalahan yang serius karena jika dipertimbangkan secara pola kurva memiliki yang identik maka model untuk pengujian neutron sudah memiliki “karakter” yang tepat.

Pada Gambar 4.9 (a) dosis ekuivalen untuk setiap sampel pada neutron termal dapat dilihat memiliki nilai yang berbeda. Nilai dosis menurun dari energi neutron 2.5E-8 - 1E-4 MeV, pada rentang energi ini reaksi antara neutron dan sampel didominasi oleh *neutron down-scattering* dimana terjadinya hamburan neutron tidak elastis yang menyebabkan

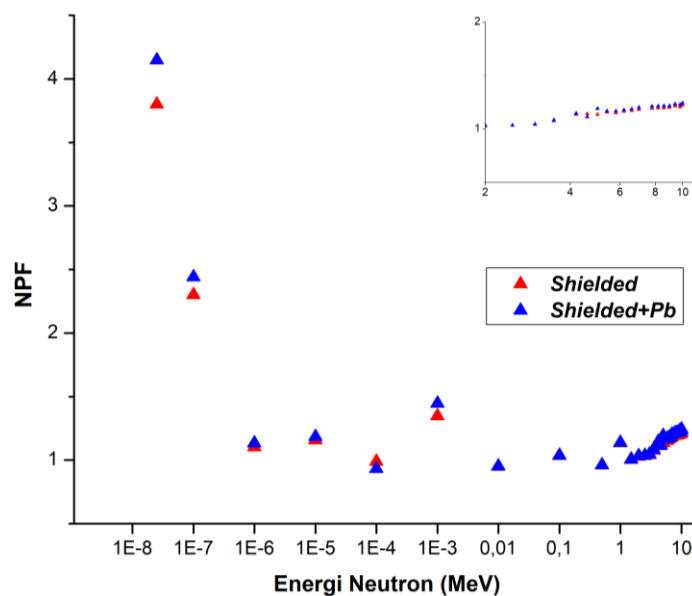
neutron kehilangan energi (R. Kemal, W. Carl, C. Yongqiang *et al.*, 2018) dan neutron terserap sehingga tidak terjadi peluruhan pada inti, kemudian meningkat linear dengan bertambahnya energi neutron. Nilai dosis pada energi neutron 2.5E-8 MeV lebih tinggi hingga 1E-4 MeV untuk setiap sampel meskipun tidak menunjukkan estimasi yang berlebihan ($> 10 \text{ pSv-cm}^2$) namun hasilnya tidak diperoleh secara konsisten pada sampel yang berbeda. Pendekatan kerma dalam MCNP untuk neutron energi rendah hasil yang dapat diterima sejauh ini adalah untuk perhitungan dosis pada organ tumbuh manusia bagian tulang belakang seperti yang dilaporkan oleh ICRP 92, 2003 dan Kellerer *et al.*, 2004

Dosis ekuivalen dari radiasi neutron semakin meningkat secara signifikan mulai dari 24 – 700 pSv-cm^2 dengan rentang energi 0.5 – 10 MeV dan nilai *error* yang relatif kecil berkisar pada 0.9 – 1.21 %. Hasil simulasi pada model *unshielded* menunjukkan nilai dosis terdiksi lebih tinggi secara berurutan daripada *shielded* kemudian *shielded+Pb*. Berkurangnya dosis ekuivalen radiasi neutron antara *unshielded* dan *shielded* yang secara implisit menyatakan terjadinya penurunan deposisi energi rata-rata oleh material bodi baja kendaraan, dan energi radiasi yang dihasilkan dari interaksi antara material baja dengan radiasi neutron tidak menjadikan nilai yang diperoleh lebih besar, bahkan cenderung berkurang.

Penurunan dosis ekuivalen pada *shielded*, untuk neutron cepat moderasi yang terjadi tidak signifikan atau minor sehingga komponen dosis neutron akibat *gamma capture* tidak signifikan karena foton yang dihasilkan dari *capture* neutron termal terserap (absorbed) oleh *shielded*. Dosis ekuivalen untuk neutron cepat sebagian besar dihasilkan akibat *recoil* proton atau ion berat yang dihasilkan dari tumbukan neutron (neutron collisions) dan disebabkan dari reaksi nuklir oleh *neutron-induced* yang terprediksi dengan baik MCNP. Ketika energi neutron berkurang, yang berkontribusi terhadap dosis neutron adalah peningkatan reaksi *capture gamma-rays*, karena foton dihasilkan dari reaksi nuklir, dimana peluruhan

inti tereksitasi dari reaksi *neutron-induced* yang terjadi dengan probabilitas paling tinggi bersamaan dengan penurunan energi neutron. Setiap unsur yang terkandung dalam komposisi baja memberikan dampak penurunan dosis yang berbeda. Penurunan dosis lebih signifikan terjadi pada unsur-unsur dengan nomor atom rendah seperti ${}^6\text{C}$ 0.32% dan ${}^5\text{B}$ 0.002% namun kandungannya yang kecil sehingga tidak terlihat penurunan yang signifikan.

Dosis ekuivalen pada *shielded+Pb* memiliki nilai yang lebih kecil daripada *shielded*, selisih rata-rata sebesar 1.4%. Untuk neutron cepat dengan *shielded+Pb* tercatat lebih kecil karena pada sampel bodi ini dipadukan unsur Pb, dimana Pb memiliki nomor atom dan kerapatan yang besar ($Z=82$, 11.32 g/cc) yang memiliki kemampuan untuk mengurangi dosis gamma dari interaksi *neutron capture*. Penurunan dosis neutron pada sampel ini tidak signifikan untuk neutron karena unsur dengan nomor atom tinggi tidak memiliki *scattering cross sections* yang tinggi agar terjadinya moderasi atau termalisasi yang efektif terhadap sumber radiasi neutron. Secara sederhana, neutron yang melewati unsur dengan nomor atom yang besar tidak mengakibatkan penurunan *fluks* yang signifikan.



Gambar 4. 10 NPF terhadap paparan radiasi neutron

Sumber: diolah peneliti

Pada Gambar 4.10 kemampuan proteksi dari sampel bodi kendaraan baja dengan penambahan unsur Pb 5% relatif lebih tinggi daripada bodi kendaraan baja. Perbedaan tersebut karena kemampuan penyerapan dosis radiasi yang dihasilkan reaksi radiasi neutron untuk setelah penambahan Pb lebih besar, meskipun perbandingannya tidak signifikan yaitu 1,4% mengingat ketebalan yang digunakan hasil tersebut menunjukkan kinerja yang efektif sebagai perisai radiasi neutron. Nilai NPF diperoleh 1 - 4.15 di setiap energi dengan nilai *error* yang relatif rendah yaitu 0.98 - 1.17%. Nilai tertinggi diperoleh dari neutron energi 2.5E-8 MeV, menurun pada rentang energi 1E-7 - 1E-2 MeV dan NPF berisolasi pada energi neutron yang lebih tinggi. Hal tersebut dapat dikolerasikan dengan *cross section* bagian terbesar dari unsur penyusun bodi baja (^{26}Fe , 92.1% - 96.7%). Pada rentang energi 10E-9 sampai 10E-2 MeV, mikroskopis *cross sections* menunjukkan probabilitas yang mirip dengan nilai NPF, demikian untuk rentang energi 1E-7 - 1E-2 MeV menunjukkan perilaku osilasi atau fluktuatif (M. Herman, et al., 2018).

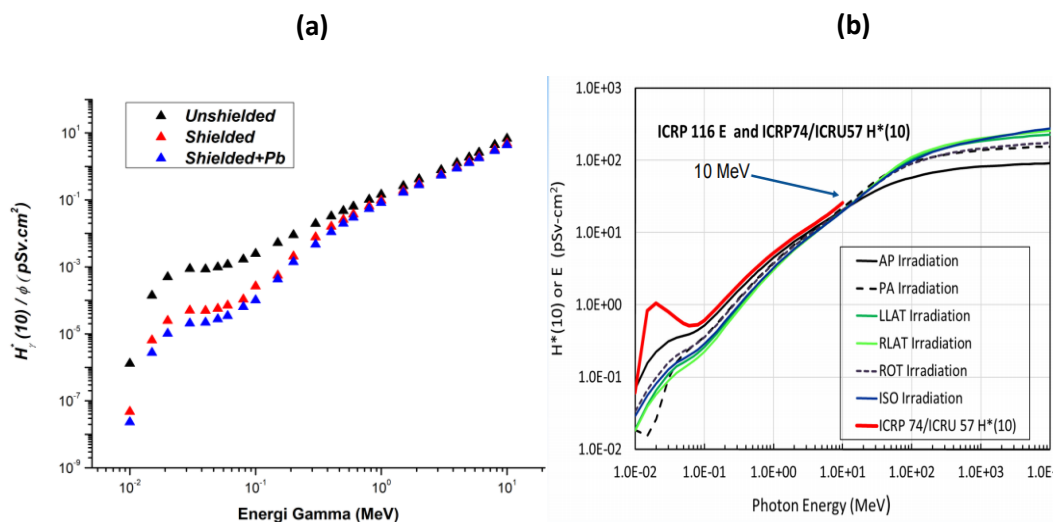
Nilai rata-rata NPF untuk *shielded* 1.25 dengan relatif *error* 1.09%, artinya potensi dosis radiasi neutron yang diterima dalam bodi kendaraan sekitar 80%. Kemampuan proteksi ditunjukkan relatif lebih baik untuk NPF *shielded+Pb* 1.28 dengan relatif *error* 1.1%, dosis radiasi neutron yang diterima dalam bodi kendaraan sekitar 78%.

Jika dikorelasikan dengan ilustrasi detonasi senjata nuklir pada subab sebelumnya, paparan dosis rate dalam waktu satu jam kendaraan taktis dengan bodi baja yang ditambahkan Pb akan tertembus dosis dari efek *fallout* pada rentang terendah hingga tertinggi 0.78 – 780 rem/h. Pada paparan terendah yang akan diterima kru dalam kendaraan dapat bertahan hingga 5.5 jam berdasarkan paparan maksimal yang diizinkan oleh BAPETEN.

4.4.1.2 RPF Sumber Radiasi Gamma

Radiasi gamma memiliki daya tembus yang lebih tinggi daripada jenis radiasi alfa dan beta, daya tembus yang tinggi disebabkan radiasi gamma tidak bermuatan sehingga meminimalkan interaksi dengan materi yang dilalui. Secara alami radiasi gamma tidak berinteraksi dengan partikel bermuatan suatu atom melalui gaya elektrostatik yang menyebabkan ionisasi atau eksitasi suatu atom, meskipun demikian radiasi gamma dapat melakukan ionisasi tidak langsung (indirect ionizing radiation). Probabilitas kejadian interaksi radiasi gamma dengan materi yaitu efek fotolistrik, hamburan Compton dan produksi pasangan. Setiap probabilitas tersebut bergantung pada energi gamma dan nomor atom material.

Pada simulasi dengan sumber radiasi gamma telah dilakukan pengujian dengan model yang sama dengan model yang digunakan pada pengujian neutron dan pustaka ENDF. Gambar 4. 11 merupakan data hasil pengolahan dosis ekuivalen untuk radiasi gamma dengan rentang energi 0.01 - 10 MeV.



Gambar 4. 11 Dosis ekuivalen gamma pada pusat pengamatan terhadap paparan radiasi gamma, (a) hasil peneliti, (b) publikasi ICRP

Sumber: diolah peneliti, ICRP(74)

Pada Gambar 4. 11 (a) dosis ekuivalen radiasi gamma untuk model *unshielded*, *shielded* dan *shielded + Pb* meningkat secara linear dengan kenaikan energi sumber. Dosis ekuivalen terdeteksi mulai dari $2.5E-3 - 6.8$ pSv/cm² untuk rentang energi 0.1 – 10 MeV dengan nilai *error* 0.4 – 3.1 %, nilai *error* tersebut termasuk masih dalam batas ambang wajar dalam simulasi MCNP.

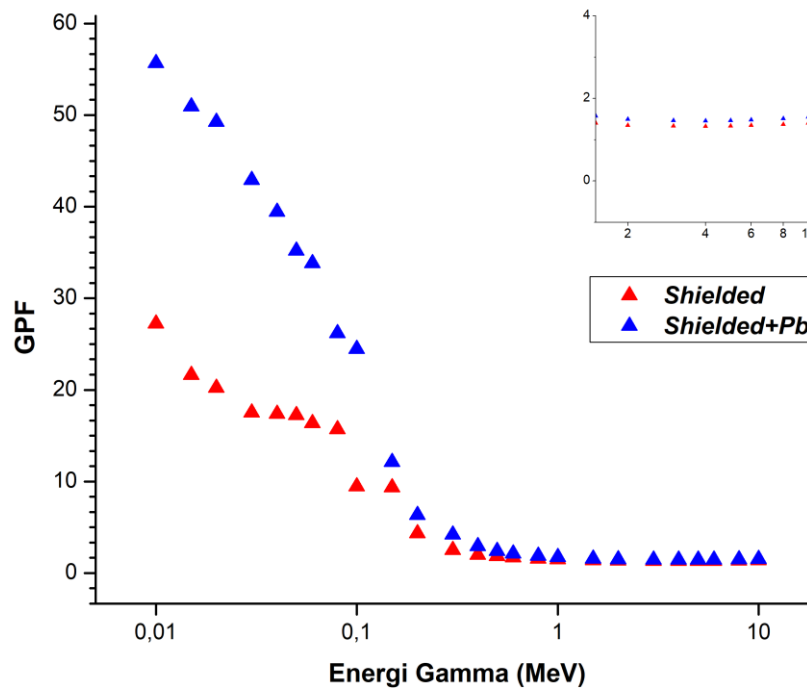
Pada pengujian sumber radiasi gamma, penurunan dosis terjadi diantara model yang diujikan, secara berurutan pada *unshielded* ke *shielded* dan *shielded+Pb* lebih kecil untuk setiap energi yang terlihat lebih jelas ditampilkan pada Gambar 4.11 (a). Pada model *Unshielded* dosis ekuivalen gamma terdeteksi lebih besar karena model yang digunakan sama dengan model untuk radiasi neutron, yaitu tidak ada material lain selain udara. Pada rentang 0.1 – 10 MeV dosis model *unshielded* berkisar $2.5E-3 - 6.8$ pSv/cm², nilai tersebut sama dengan publikasi ICRP 74 untuk radiasi gamma *free field* ditunjukkan pada Gambar 4.11 (b).

Pada rentang energi 0.01 – 0.8 MeV nilai dosis radiasi gamma terdeteksi untuk *shielded* dan *shielded+Pb* hampir mendekati nol atau nilainya dapat diabaikan. Pengabaian ini karena berdasarkan attenuasi eksponensial sederhana, probabilitas radiasi gamma untuk bertahan atau melewati lapisan bodi baja kendaraan dengan ketebalan 3 cm $1E-9$ untuk energi kurang dari 0.1 MeV. Selain itu, secara mikroskopis unsur dengan nomor masa tinggi akan memiliki energi ikat elektron pada kulit terluar kisaran puluhan kilo elektron volt (KeV) sehingga energi radiasi gamma kurang yang dari 0.1 MeV akan mentransferkan seluruh energinya pada orbital elektron terluar, dengan demikian menjadi beralasan dosis ekuivalen radiasi gamma yang terdeteksi pada energi ini mendekati nol.

Model bodi baja kendaraan atau *shielded* mampu menurunkan dosis radiasi gamma dengan signifikan, yaitu 28.8% - 89.4% untuk rentang energi 0.1 – 10 MeV, semakin kecil energi radiasi gamma maka penurunan dosis

semakin besar. Berkurangnya dosis disebabkan oleh terjadinya interaksi radiasi gamma dengan material bodi baja yang terdiri dari unsur ^{12}C 0.32%, ^{15}P 0.025%, ^{25}Mn 0.4%, ^{14}Si 0.35%, ^{16}S 0.08%, ^{28}Ni 0.35%, ^{24}Cr 1.2%, ^{42}Mo 0.4%, ^{10}B 0.002% dan ^{56}Fe 97%. Komposisi unsur-unsur tersebut mampu menjadi penyerap yang efektif untuk radiasi gamma, penyerapan didominasi oleh unsur-unsur dengan nomor atom besar karena memiliki massa jenis yang lebih besar. Dimana pada komposisi tersebut didominasi oleh unsur ^{56}Fe . Secara mikroskopis, radiasi gamma yang melewati material bodi baja kendaraan menyerahkan setengah dari energinya, sehingga dosis ekuivalen gamma yang terdeteksi pada area pengamatan berkurang. Selain itu pada energi radiasi gamma diatas 1 MeV, dosis ekuivalen juga berkurang karena radiasi gamma yang menembus medan listrik di dekat inti akan lenyap atau beralih menjadi elektron dan positron, kemudian terjadi proses anihilasi yang menjadi komponen dosis ekuivalen gamma terdeteksi (menembus).

Model *shielded+Pb* memiliki nilai dosis ekuivalen yang lebih kecil daripada *shielded*, selisih rata-rata sebesar 6.8%. Unsur Pb yang ditambahkan meningkatkan kemampuan penurunan dosis ekuivalen radiasi gamma. Radiasi gamma menjadi lebih sulit untuk menembus bodi baja dengan penambahan unsur Pb karena memiliki nomor masa dan kerapatan yang tinggi sehingga memiliki tingkat penyerapan radiasi gamma yang lebih baik, dimana proses mikroskopis yang menyebabkan penurunan dosis ekuivalen radiasi gamma pada *shielded+Pb* lebih dominan.



Gambar 4. 12 GPF bodi baja kendaraan taktis 4x4 terhadap paparan radiasi gamma

Sumber: diolah peneliti

Dari Gambar 4. 12 dapat dilihat GFP jauh lebih besar untuk energi kurang dari 1 MeV dengan nilai berada pada rentang 1.58 – 55.7 dan untuk energi lebih dari 1 MeV berada pada rentang 1.4 – 1.5, dengan nilai faktor proteksi terkecil 1.4 artinya dosis ekuivalen radiasi gamma yang akan diterima dalam kendaraan tidak akan lebih dari 70%. Kinerja bodi kendaraan taktis 4x4 dengan paduan Pb lebih baik dalam memproteksi radiasi gamma daripada bodi kendaraan baja tanpa Pb, dimana GFP pada setiap energi radiasi gamma memiliki nilai yang lebih tinggi. Nilai GFP untuk bodi baja dengan paduan Pb pada setiap energi gamma berada pada rentang 1.55 – 55.7 dengan nilai *error* 0.85 – 3.31 % sedangkan untuk bodi baja tanpa Pb 1.4 – 27.2 dengan nilai *error* 1.3 – 3.09 %, peningkatan terjadi sekitar 6.8% dan. Dari data tersebut, penambahan Pb pada bodi baja

meningkatkan *cross sections capture* radiasi gamma menjadi signifikan dengan faktor terkecil 1.55 artinya dosis ekuivalen yang akan diterima dalam kendaraan tidak lebih dari 64.5%. Pada pengujian ini nilai *error* tercatat relatif lebih besar, karena pada energi radiasi gamma yang rendah sulit untuk mendeteksi nilai dosis ekuivalen di dalam bodi baja kendaraan TKT 4x4 (*shielded*). Nilai rata-rata GPF pada rentang energi ≥ 0.1 MeV untuk *shielded* 2.66 dengan relatif *error* 1.79%. Hasil yang relatif lebih baik untuk GPF *shielded*+Pb 4.13 dengan relatif *error* 1.47%.

Pada energi tinggi untuk gamma memiliki nilai proteksi dengan bodi kendaraan yang ditambahkan Pb adalah 1.5, jika dikorelasikan dengan ilustrasi detonasi senjata, paparan dosis rate dalam waktu satu jam kendaraan taktis dengan bodi baja yang ditambahkan Pb akan tertembus dosis dari efek *fallout* pada rentang terendah hingga tertinggi 0.64 – 640 rem/h. Pada paparan terendah yang akan diterima kru dalam kendaraan dapat bertahan hingga 6.8 jam berdasarkan paparan maksimal yang diizinkan oleh BAPETEN.

4.4.2 Validasi Data

4.4.2.1 Simulasi MCNP

Batasan yang dikategorikan valid untuk menilai data yang dihasilkan dari simulasi ditetapkan pada rentang 2% - 5% atau ± 0.02 - ± 0.05 (Pelowits, Denise B. 2008). Seluruh pengujian yang telah dilakukan secara simulasi menggunakan MCNP memiliki nilai relatif *error* yang kurang dari ± 0.05 , tercatat dari hasil simulasi paling tinggi ± 0.03 .

Data dosis ekuivalen untuk sumber radiasi neutron dan gamma hasil pengolahan data dosis yang terdeteksi pada pusat dengan energi, jarak, geometri dan area pengamatan yang sama. Hal ini dilakukan untuk menguji kebenaran data yang dihasilkan, baik dosis ekuivalen radiasi terhadap radiasi neutron maupun radiasi gamma.

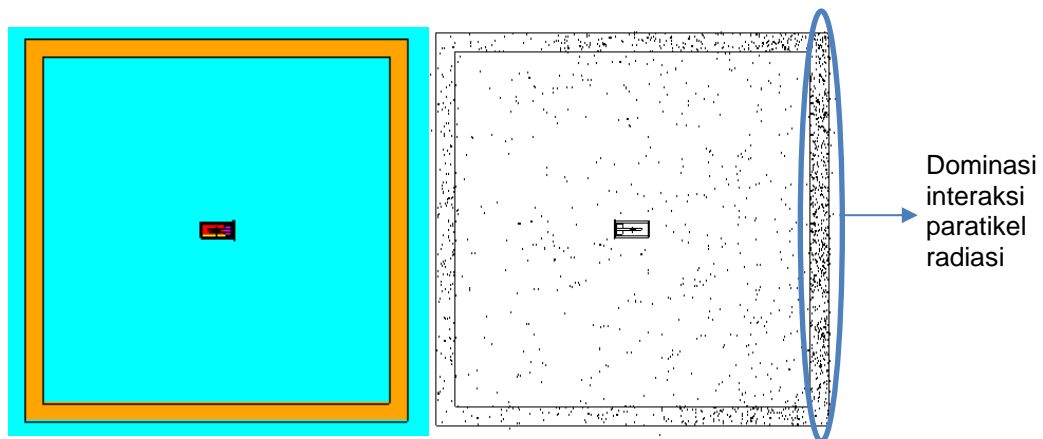
Secara teori daya tembus radiasi neutron lebih tinggi daripada radiasi gamma, seharusnya berdampak pada nilai dosis ekuivalen radiasi yang terdeteksi (Guoqing Zhang. 2011). Sedangkan data hasil deteksi dosis serap untuk radiasi neutron lebih rendah daripada radiasi gamma. Hal ini terjadi karena perhitungan dosis serap belum mempertimbangkan faktor kualitas bergantung energi, setelah faktor ini diperhitungkan maka diperoleh hasil dosis ekuivalen radiasi neutron lebih besar dibandingkan dosis ekuivalen radiasi gamma sesuai dengan data publikasi ICRP 60, 74, 93.

4.4.2.2 RPF Radiasi Neutron dan Gamma

Perhitungan dosis ekuivalen radisi neutron hasil pengujian pada model *shielded* dan *shielde+Pb* nilainya fluktuatif, untuk rentang energi 1E-8 - 1E-2 MeV. Hal ini terjadi karena secara *cross sections* mikroskopis interaksi Fe dengan radiasi neutron pada rentang energi tersebut cenderung untuk mulai terjadinya osilasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.20.

ENDF merupakan pustaka data nuklir atau neutron yang digunakan dalam penelitian ini memiliki *cross sectios* seperti Pada Gambar 4. 20, dengan demikian hasil yang diperoleh untuk dosis ekuivalen neutron pada rentang energi tersebut telah sesuai dengan *cross section*.

Sumber radiasi gamma dan neuron yang digunakan berada pada koordinat kartesius tiga dimensi $x = 0$, $y = 0$ dan $z = - 80$, dapat dipastikan agar radiasi dapat menembus masuk ke dalam *shielded* (bagian dalam kendaraan taktis 4x4) maka radiasi harus berinteraksi dengan material *shielded*. Ilustrasi yang dimaksud ditunjukkan pada Gambar 4. 13.



Gambar 4. 13 Interaksi partikel radiasi pada bodi baja kendaraan taktis 4x4 pada sumbu x-z

Sumber: diolah peneliti

Pada Gambar 4. 13, bagian kotak yang berwarna oranye (sebelah kiri pembaca) merupakan area pengamatan model *shielded* sebelum sumber radiasi berinteraksi dan bagian kotak tanpa warna/dominasi putih (sebelah kanan pembaca) area pengamatan model *shielded* setelah sumber radiasi berinteraksi, hasil tampilan model 2D ini ditampilkan pada aplikasi VISED. Tampilan setelah sumber radiasi berinteraksi atau simulasi dijalankan, terlihat radiasi yang ditandakan dengan titik hitam (black spot) lebih dominan menumpuk pada salah satu sisi *shield* sebelum radiasi menembus ke dalam area *shield* dengan demikian simulasi model yang diuji telah sesuai dengan skenario eksak.

Neutron fisi dalam percobaan menyerupai distribusi Watt, dengan puncak mendekati 1 MeV dan sekitar 95% spektrum ternormalisasi antara 0,1 dan 10 MeV, dan NPF yang diperoleh adalah 1.14 ± 0.08 (Decker *et al.*, 2017), pada rentang energi ini nilai NPF yang peneliti peroleh untuk *shielded* 1.13 ± 0.011 dan hasil *shielded+Pb* lebih sesuai 1.14 ± 0.011 . Kemudian nilai NPF yang diukur secara eksperimental untuk kubus baja dengan mempertimbangkan melalui dosis ekuivalen diperoleh 1.22 ± 0.068 dan hasil perhitungan komputasi MCNP 1.18 ± 0.02 , hasil ini dinilai sangat mendukung untuk pengembangan penelitian RPF dengan menggunakan MCNP (Decker *et al.*, 2018) sedangkan hasil rata-rata nilai NPF yang

diperoleh peneliti untuk *shielded* 1.25 ± 0.0109 dan *shielded+Pb* 1.28 ± 0.011 .

Eksperimen faktor proteksi radiasi gamma telah dilakukan dengan menggunakan energi 0.1 sampai 6 MeV dari radioaktif Plutonium-Beryllium, nilai GPF diperoleh 1.202 ± 0.001 dan hasil perhitungan komputasi dengan MCNP nilai GPF 1.223 ± 0.007 (W.J. Erwin, *et al.*, 2018), sedangkan nilai GPF yang diperoleh peneliti melalui MCNP untuk model *shielded* 2.831 ± 0.015 dan *shielded+Pb* 4.478 ± 0.0104 . Perbedaan yang signifikan dari hasil GPF karena pada eksperimen tersebut tidak secara rinci menjelaskan material yang digunakan, hanya disampaikan baja. Sedangkan dalam penelitian ini material yang digunakan didominasi oleh material dengan nomor atom besar (Fe dan Pb) sehingga menyebabkan perbedaan yang signifikan.