

SIMULASI KINERJA BAJA ARMOR DALAM MENAHAN RADIASI GAMMA DAN NEUTRON SEBAGAI MATERIAL KENDARAAN TEMPUR

SIMULATION OF ARMOR STEEL PERFORMANCE TOWARDS GAMMA AND NEUTRON RADIATION AS COMBAT VEHICLE MATERIAL

Ulfa Dwi Prastiwi¹, Gita Amperiawan², Maykel Manawan³, Sovian Aritonang⁴

UNIVERSITAS PERTAHANAN RI

¹ dwiprastiwiulfa@gmail.com, ² gitaamperiawan@yahoo.com,

³ maykel.manawan@idu.ac.id, ⁴ soviaan.aritonang@idu.ac.id

Abstrak – Ancaman radiasi akibat pengembangan senjata nuklir dan penyalahgunaan bahan radioaktif telah meningkat dan semakin nyata. TNI yang bertugas menjaga pertahanan dan keamanan negara menjadi garda terdepan yang berhadapan langsung dengan ancaman tersebut. Kendaraan tempur memiliki peran vital dalam menjaga personil TNI dari ancaman radiasi di area operasi, maka dari itu perlu diketahui bagaimana kemampuan material kendaraan tempur dalam menghadapi ancaman tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik material baja armor dalam menahan radiasi gamma dan neutron. Penelitian dilakukan dengan simulasi menggunakan *software* berbasis Monte Carlo. Simulasi dilakukan menggunakan dua sumber radiasi pengion yaitu gamma dan neutron dalam rentang energi 0,01-100 MeV. Hasil penelitian menunjukkan bahwa baja armor memiliki nilai koefisien atenuasi massa terhadap paparan radiasi gamma yang lebih besar dibandingkan radiasi neutron. Pada rentang energi 1-10 MeV, nilai koefisien atenuasi massa (μ_m) baja armor terhadap paparan radiasi gamma dan neutron menunjukkan hasil yang fluktuatif dan berada pada rentang 0.3-0.023 cm²/g untuk radiasi gamma dan 0.020-0.014 cm²/g untuk radiasi neutron. Pada rentang energi 20-100 MeV, nilai μ_m radiasi gamma berada pada rentang 0.025-0.020 cm²/g dan nilai μ_m untuk radiasi neutron adalah 0.014-0.005 cm²/g.

Kata Kunci: Kendaraan tempur, material penahan radiasi, radiasi gamma, radiasi neutron

Abstract – The radiation threat due to the development of nuclear weapons and the misuse of radioactive materials has increased and is becoming increasingly real. The TNI, which is tasked with maintaining national defense and security, is at the forefront of dealing directly with these threats. Combat vehicles have a vital role in protecting TNI personnel from radiation threats in the operational area, therefore it is necessary to know how the combat vehicle's material capabilities are in dealing with these threats. This study aims to analyze the characteristics of the armor steel material in resisting gamma and neutron radiation. The research was conducted by simulation using Monte Carlo-based software. Simulations were carried out using two sources of ionizing radiation, namely gamma and neutrons in the energy range 0.01-100 MeV. The results showed that armor steel has a mass attenuation coefficient value of exposure to gamma radiation that is greater than neutron radiation. In the energy range 1-10 MeV, the value of the mass attenuation coefficient (μ_m) of armor against gamma and neutron radiation exposure shows fluctuating results and is in the range of 0.3-0.023 cm²/g for gamma radiation and 0.020-0.014 cm²/g for neutron radiation. In the energy range 20-100 MeV, the μ_m value of gamma radiation is in the range 0.025-0.020 cm²/g and the μ_m value for neutron radiation is 0.014-0.005 cm²/g.

Keywords: gamma radiation, military combat vehicle, neutron radiation, shielding material

Pendahuluan

Kemajuan teknologi global, kondisi diplomatis, serta interaksi antar negara mempengaruhi dinamika ancaman yang terus berkembang. Buku Putih Pertahanan Indonesia (2015) menyatakan bahwa bentuk atau pola perang di masa depan, pada akhirnya akan dipengaruhi oleh perkembangan ilmu pengetahuan. Saat ini, peluru kendali, rekayasa genetik, pengembangan material radioaktif, dan rekayasa teknologi lainnya telah banyak digunakan sebagai alat untuk mempertahankan kedaulatan serta keamanan negara.

Ancaman sejatinya merupakan acuan dasar dalam pembuatan dan penyusunan konsep pertahanan negara. Ancaman dapat mengganggu stabilitas

negara jika tidak diantisipasi dan ditangani dengan baik sesuai dengan situasi dan kondisi yang ada. Berdasarkan prediksi dan prioritas lima tahun kedepan, ancaman dibagi menjadi ancaman nyata dan potensial. Salah satu ancaman potensial di Indonesia adalah CBRNE (*chemical, biological, radiological, nuclear, explosive*) yang juga termasuk dalam *weapon of mass destructive*. Ancaman CBRNE terutama nuklir dapat berasal dari luar maupun dalam negeri, baik berupa serangan, bencana alam, maupun kecelakaan. Meski masih menjadi ancaman potensial di Indonesia, hal ini perlu untuk diantisipasi mengingat besarnya dampak yang dapat ditimbulkan.

Tabel 1 Estimasi jumlah hulu ledak nuklir di seluruh dunia

Country	Deployed Strategic	Deployed Nonstrategic	Reserve/ Nondeployed	Military Stockpile	Total Inventory
Russia	1572	0	2740	4312	6372
United States	1600	150	2050	3800	5800
France	280	n.a	10	290	290
China	0	?	320	320	320
United Kingdom	120	n.a	75	195	195
Israel	0	n.a	90	90	90
Pakistan	0	n.a	160	160	160
India	0	n.a	150	150	150
North Korea	0	n.a	35	35	35
Total	3720	150	5630	9320	13410

Sumber: Hans M. Kritensen dan Matt Korda, 2020

Keterangan:

- *Deployed strategic warhead*: seluruh senjata yang termasuk ke dalam kelompok misil antar benua dan *heavy bomber*.
- *Deployed nonstrategic warhead*: senjata dengan sistem jangkauan jarak pendek.
- *Reserve/nondeployed*: senjata yang tidak dikerahkan dan berada pada penyimpanan
- *Military stockpile*: senjata yang aktif maupun tidak aktif yang berada di satuan militer.
- *Total inventory*: seluruh senjata atau hulu ledak yang tersedia di satuan militer termasuk yang sudah tidak digunakan namun masih lengkap dan menunggu pembongkaran (*dismantlement*).

Data terkini yang dihimpun *Federation of American Scientist* pada awal September 2020 menunjukkan bahwa jumlah senjata atau hulu ledak nuklir yang tersebar di seluruh dunia diperkirakan mencapai 13.410 buah (Tabel 1). Lebih dari setengah hulu ledak tersebut atau sekitar 9.320 buah merupakan persediaan (*stockpiled*) persenjataan militer dan sisanya merupakan hulu ledak aktif yang akan dibongkar (*dismantlement*). Dari jumlah *stockpiled* yang ada, sekitar 3.720 hulu ledak tersebar (*deployed*) di satuan-satuan operasional dimana 1.800 dari senjata tersebut, yang tersebar di US, Rusia, Inggris, dan Perancis, berada dalam status *high alert* dan dapat langsung digunakan dalam waktu yang singkat.

Berakhirnya perang dingin hampir tiga dekade lalu menghasilkan beberapa perjanjian bagi negara bersenjata nuklir untuk mengurangi dan memusnahkan hulu ledak yang dimiliki. Meski telah

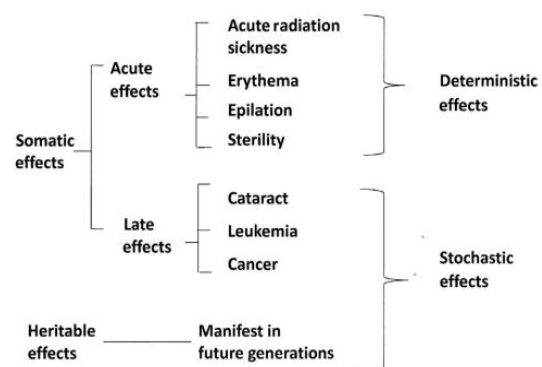
mengalami penurunan yang besar (puncak tertinggi sekitar 70.000 hulu ledak pada tahun 1986), jumlah 13.410 masih sangat tinggi untuk keberadaan senjata nuklir di dunia. Dilihat dari laju penurunannya (Gambar 1.1), hulu ledak nuklir milik Amerika Serikat, Rusia, maupun gabungan seluruh dunia memiliki grafik yang cenderung melandai dalam beberapa tahun terakhir. Negara-negara dengan senjata nuklir terlihat menahan pembongkaran persenjataan dan di sisi lain menambah senjata baru untuk kembali meningkatkan peran senjata nuklir dalam strategi pertahanan mereka.

Selain dalam bentuk senjata, ancaman nuklir juga datang dari tindakan kriminal seperti penyalahgunaan material radioaktif dan terorisme. Pada tahun 2019, *International Atomic Energy Agency* atau IAEA mendapat 189 laporan dari 36 negara mengenai adanya indikasi kejahatan atau aktivitas ilegal yang berkaitan dengan material nuklir dan

bahan radioaktif. Sejak tahun 1993 hingga akhir 2019, total laporan yang diterima mencapai 3686 kasus dari seluruh negara anggota IAEA. Dari data tersebut, 290 laporan di antaranya terkonfirmasi berkaitan dengan adanya aktivitas perdagangan ilegal dan penyalahgunaan bahan radioaktif, 2373 laporan terkonfirmasi tidak berkaitan dengan aktivitas perdagangan maupun penyalahgunaan bahan radioaktif, dan 1023 lainnya tidak memiliki informasi yang cukup untuk dapat disimpulkan ada atau tidaknya tindak kejahatan dan aktivitas ilegal yang terjadi (ITDB 2020).

Ledakan senjata nuklir atau bahan radioaktif menghasilkan empat bentuk pelepasan energi yang besar yaitu energi panas (*thermal energy*), gelombang ledakan (*blast wave*), radiasi pengion (*ionizing radiation*), dan elemen radioaktif (*radioactive element*). Elemen radioaktif akan terangkat mengikuti *blast wave* ataupun terbawa angin menjauhi titik ledakan. Elemen radioaktif ini nantinya akan kembali ke tanah setelah selang waktu tertentu dengan radiasi pengion yang menyertainya, yang kemudian disebut *radiation fallout*. Total radiasi hasil dari ledakan material radioaktif diperkirakan mencapai 15% dari total energi yang dilepaskan (FAS 2015).

Interaksi berkas radiasi dengan makhluk hidup dapat menyebabkan kerusakan sel, jaringan, hingga organ. Roger O. McClellan (2020) pada Gambar 1 mengklasifikasikan efek radiasi berdasarkan waktu yang dibutuhkan sampai dirasakannya suatu gejala. Dalam waktu yang relatif singkat, individu yang terpapar radiasi dapat merasakan bercak kemerahan akibat sensitivitas berlebih pada kulit, epilepsi, kemandulan, dan gangguan kesehatan lain. Dalam kurun waktu yang cukup lama, radiasi dapat menyebabkan katarak, leukimia, kanker, dan penyakit lainnya. Selain dirasakan individu yang terpapar, efek jangka panjang paparan radiasi juga dapat menyebabkan masalah kesehatan atau efek biologis yang muncul di generasi selanjutnya.



Gambar 1. Efek radiasi pengion pada kesehatan

Sumber: Roger O. McClellan, 2020

Bahaya radiasi dapat diminimalisir dengan upaya proteksi eksternal. Tiga prinsip proteksi radiasi yang dapat

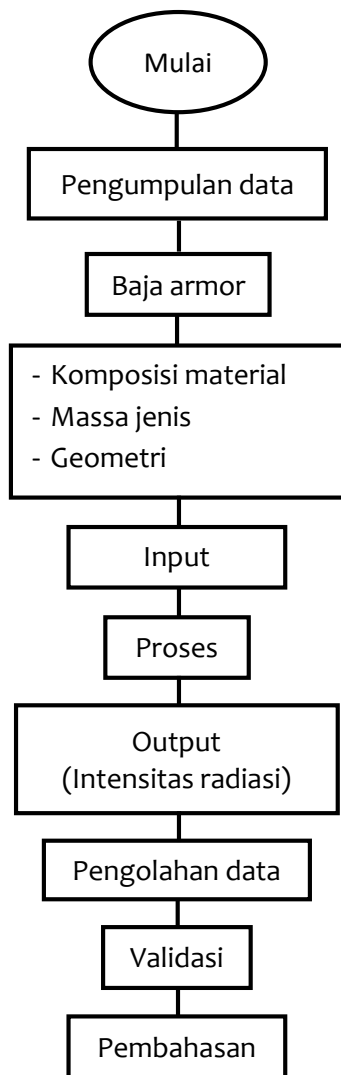
dilakukan yaitu dengan mengurangi waktu paparan, menjauhi sumber radiasi, dan menggunakan penahan radiasi (Mulyati, Mohammad, Yeti 2016). Jenis radiasi pengion yang dihasilkan dari reaksi nuklir memiliki karakteri stik yang berbeda, maka dari itu setiap jenis radiasi akan membutuhkan material penahan dengan karakteristik yang berbeda pula. Material penahan radiasi dinilai mampu menahan radiasi jika memiliki koefisien atenuasi yang tinggi, atau perbandingan intensitas fluks akhir jauh lebih kecil dibandingkan fluks berkas radiasi mula-mula. Ditinjau dari sisi pertahanan dan keamanan, material penahan radiasi sangat penting untuk dikembangkan terutama pada material kendaraan militer guna mendukung kinerja TNI sebagai komponen utama dalam menghadapi beragam bentuk ancaman di berbagai kondisi lingkungan operasi.

Meski Indonesia merupakan anggota negara-negara di ASEAN yang merupakan Kawasan Bebas Senjata Nuklir Asia Tenggara (SEANWFZ),

ancaman paparan radiasi nuklir akan tetap ada dan perlu untuk diantisipasi. Saat ini, kinerja penahan radiasi nuklir belum termasuk dalam pertimbangan pengembangan material militer khususnya untuk kendaraan tempur. Maka dari itu pada penelitian ini akan dilakukan perhitungan komputasi untuk mengetahui koefisien atenuasi baja armor dalam menahan radiasi gamma dan neutron sebagai potensi material yang dapat digunakan pada kendaraan tempur.

Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan numerik dengan *software* berbasis *Monte Carlo*. Sampel dibuat setebal 15 mm, berjarak 5 m dari sumber radiasi dan diuji ketahanannya menggunakan gamma dan neutron dengan variasi energi radiasi 0.01-100 MeV. Data awal seperti komposisi, massa jenis, dan geometri didapat berdasarkan hasil studi literatur dan pengujian langsung. Diagram penelitian dapat dilihat sebagai berikut.



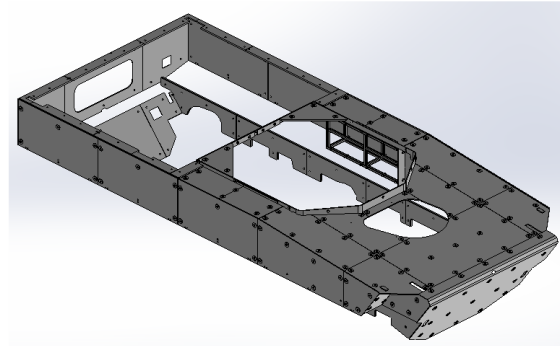
Gambar 2. Diagram alir penelitian
Sumber: diolah peneliti, 2020

Hasil dan Pembahasan

Hasil

Kendaraan tempur diharuskan memiliki kemampuan pengejaran, penyerangan, maupun pertahanan yang baik. Salah satu komponen utama dalam mendukung performa ranpur adalah material yang digunakan. Baja armor merupakan salah satu material yang biasanya dihususkan untuk aplikasi di bidang militer, seperti pada kendaraan tempur. Plat baja armor yang digunakan

pada kendaraan tempur diharuskan memiliki dua fungsi yaitu fungsi proteksi maupun konstruksi.



Gambar 3. Desain rangka kendaraan tempur
Sumber: PT. Pindad

Material baja armor yang digunakan pada penelitian ini dipilih berdasarkan penggunaannya pada kendaraan tempur, yaitu melingkupi sebagian besar lapisan luar kendaraan seperti yang dapat dilihat pada Gambar 3. Material tersebut memiliki ketebalan 15 mm dengan *mechanical properties* yang ditunjukkan pada Tabel 2. Material yang digunakan pada lapisan terluar kendaraan tempur merupakan material terkuat dengan fungsi utama sebagai penahan laju balistik.

Pelat baja yang armor yang digunakan pada penelitian ini memiliki massa jenis sebesar 7850 kg/m^3 atau 7.850 g/cm^3 dengan komposisi material yang dapat dilihat pada Tabel 4.2. Berdasarkan data pada Tabel 4.2, baja armor tersebut termasuk ke dalam

kategori *low alloy steel* karena memiliki persentase paduan kurang dari 8%, yaitu sebesar 5.47%.

Tabel 2. *Mechanical properties* baja armor

Hardness (HBW)	Charpy-V, 10x10 mm test specimen Min.	Yield Strength $R_{p0.2}$ (min MPa)	Tensile Strength R_m (MPa)	Elongation A_5 (min %)	Elongation A_{50} (min %)
480-540	32 J/40°C	1250	1450-1750	8	10

Sumber: PT. Pindad

Tabel 3. Komposisi kimia baja armor

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

Pembahasan

Pengembangan material penahan radiasi untuk aplikasi kendaraan tempur masih belum banyak dikembangkan, setidaknya berdasarkan fakta bahwa sulitnya mencari referensi material penahan radiasi untuk kendaraan tempur di berbagai jurnal. Bahaya radiasi memang belum terlihat sebagai suatu ancaman nyata, namun tren penggunaan bahan radioaktif saat ini semakin meningkat. Hal ini ditunjukkan dengan

peningkatan produksi dan penggunaan bahan radioaktif untuk aplikasi senjata nuklir di berbagai negara, probabilitas ancaman radiasi dari reaktor nuklir, maupun tindakan kriminalitas atas penyalahgunaan bahan radioaktif. Maka dari itu, antisipasi tetap diperlukan demi pertahanan dan keamanan negara.

PT. Pindad selaku Badan Usaha Milik Negara (BUMN) yang bergerak di bidang industri dan manufaktur produk militer

dan komersial sedang mengembangkan sistem untuk proteksi *nuclear, biological, and chemical* (NBC) pada kendaraan tempur. Proteksi NBC yang ada sejauh ini berupa kontrol sirkulasi dan tekanan udara pada kendaraan tempur serta alat pelindung pribadi masing-masing personil di dalam kendaraan. Peningkatan proteksi nuklir khususnya ancaman radiasi dapat dilakukan dengan meningkatkan performa material yang bukan hanya tahan terhadap serangan balistik, namun juga mampu menahan radiasi.

Material penahan radiasi sebetulnya telah banyak dikembangkan, khususnya untuk aplikasi di bidang reaktor nuklir. Maka dari itu penelitian ini mengacu pada hasil riset material penahan radiasi untuk reaktor nuklir, dengan bahan utama yaitu baja armor yang merupakan material untuk kendaraan tempur. Baja armor kemudian ditambahkan dengan campuran boron karbida dan serat fiber yang mampu meningkatkan kemampuan material dalam menahan radiasi neutron.

Hasil simulasi dan pengolahan data ditunjukkan dengan koefisien atenuasi massa (μ_m). Atenuasi merupakan pengurangan intensitas berkas radiasi yang melewati suatu bahan. Pengurangan intensitas ini disebabkan

adanya interaksi baik penyerapan maupun penghamburan berkas radiasi terhadap material. Koefisien atenuasi massa atau koefisien serapan massa didefinisikan sebagai koefisien serapan pada suatu ketebalan 1 gram bahan dengan luas permukaan 1 cm².

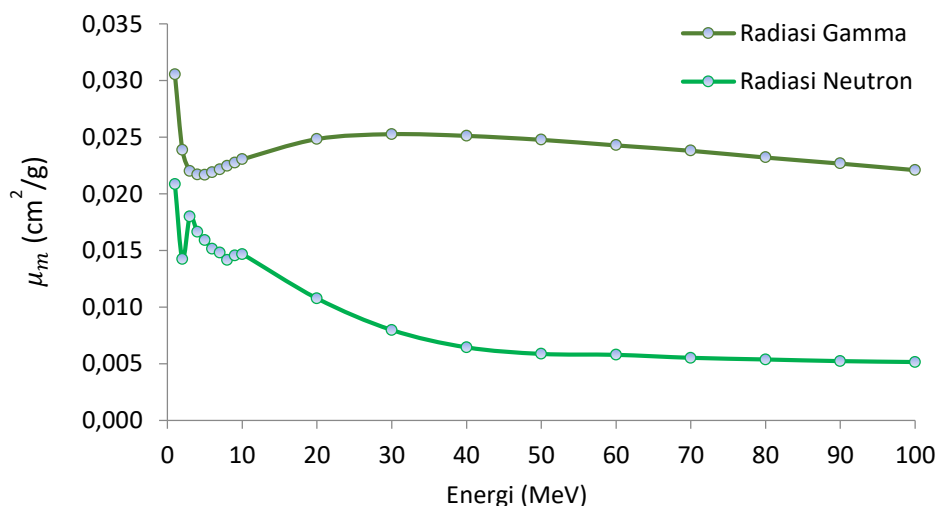
Baja armor yang digunakan PT. Pindad untuk kendaraan tempur telah disimulasi dan dijadikan referensi untuk baja komposit dalam menahan radiasi gamma dan neutron. Seperti yang diperlihatkan pada Tabel 4.2 sebelumnya, baja armor memiliki beberapa unsur paduan yang masing-masing memberikan pengaruh terhadap *mechanical properties* baja armor. Meski memiliki persentase yang kecil, unsur-unsur seperti *Silicon* (Si) dapat meningkatkan *strength* dan *hardenability* material, *Chromium* (Cr) meningkatkan *hardenability* dan ketahanan terhadap korosi, serta *Nickel* (Ni) mampu meningkatkan *toughness*, ketahanan terhadap korosi, serta stabilitas termal (Nesbitt 2007).

Dari sisi ketahanan terhadap radiasi, unsur-unsur tersebut berperan pada interaksi berkas foton dan neutron terhadap elektron dan inti atom. Unsur dengan nomor atom besar seperti Mo, Fe, Ni, Mn, dan lainnya mampu

meningkatkan ketahanan terhadap radiasi gamma karena berkas foton tersebut berinteraksi dengan elektron yang jumlahnya sama dengan nomor atom unsur tersebut. Semakin banyak foton yang berinteraksi dengan elektron, maka pengurangan energi akibat serapan atau hamburan juga semakin besar. Persentase Fe yang tinggi pada baja armor (94.53%) membuat baja armor memiliki ketahanan terhadap berkas foton (gamma) yang tinggi.

Hasil simulasi ketahanan baja armor terhadap paparan radiasi gamma dan neutron pada rentang energi 1-100 MeV

dapat dilihat pada Gambar 4.4. Pada Gambar 4.4, koefisien atenuasi massa baja armor berada pada rentang 0.02-0.03 (cm^2/g) untuk rentang energi 0-100 MeV. Hasil tersebut tidak jauh berbeda dengan data koefisien atenuasi massa dari Fe murni yang dihimpun Jarekt pada tahun 2008 dimana koefisien atenuasi massa bekisar antara 10^{-2} sampai 10^{-1} dengan energi foton yang berada pada rentang 10^0 - 10^2 MeV (1-100 MeV). Data tersebut dapat dibandingkan dengan Fe murni karena lebih dari 90% kandungan pada baja armor adalah Fe dan sebagian besar unsur paduannya memiliki nomor atom yang tidak jauh berbeda.



Gambar 4.4 Koefisien atenuasi massa baja armor terhadap paparan radiasi gamma dan neutron

Sumber: diolah peneliti

Koefisien atenuasi massa baja armor terhadap paparan radiasi neutron memiliki nilai yang lebih kecil dibanding paparan radiasi gamma. Unsur paduan

yang memiliki koefisien atenuasi massa yang besar untuk paparan neutron hanya memiliki persentase yang kecil pada kandungan baja armor, yaitu boron

0.005% dan karbon 0.32%. Hal ini ditambah dengan adanya kandungan unsur lain yang memiliki nomor atom lebih besar dari Fe seperti Ni ($Z=28$, 1.81%) dan Mo ($Z=42$, 0.7%) yang membuat nilai μ_m radiasi neutron menjadi lebih kecil. Hal ini sesuai dengan data yang dihimpun Bucherl T et. Al. pada tahun 2004 yang menunjukkan bahwa boron dan karbon memiliki nilai koefisien atenuasi massa yang rendah untuk gamma namun memiliki koefisien atenuasi massa yang tinggi untuk neutron berenergi rendah dan tinggi.

Kesimpulan dan saran

Kesimpulan

Berdasarkan analisis data dan pembahasan terkait kinerja material baja armor dan baja komposit untuk kendaraan tempur, maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut.

- a. Pada rentang energi 1-10 MeV, nilai koefisien atenuasi massa (μ_m) baja armor terhadap paparan radiasi gamma dan neutron menunjukkan hasil yang fluktuatif dan berada pada rentang 0.3-0.023 cm^2/g untuk radiasi gamma dan 0.020-0.014 cm^2/g untuk radiasi neutron. Pada rentang energi 20-100 MeV, nilai μ_m radiasi gamma berada pada rentang 0.025-0.020 cm^2/g

dan nilai μ_m untuk radiasi neutron adalah 0.014-0.005 cm^2/g .

- b. Baja armor memiliki nilai koefisien atenuasi massa yang besar untuk radiasi gamma, menunjukkan bahwa kendaraan tempur mampu menahan radiasi gamma lebih baik dibandingkan radiasi neutron.

Saran

Penelitian terkait material penahan radiasi pada kendaraan tempur ini merupakan langkah awal untuk pengembangan material kendaraan tempur selanjutnya. Beberapa saran yang dapat diberikan untuk keberlanjutan pengembangan material penahan radiasi pada kendaraan tempur ke depannya adalah sebagai berikut.

- a. Hasil penelitian material kendaraan tempur ini hanya terbatas pada koefisien atenuasi massa. Maka dari itu diperlukan perhitungan lebih lanjut untuk mengetahui dosis radiasi yang dapat menembus material di suatu titik tertentu dimana terdapat personel di dalam kendaraan. Perhitungan dosis radiasi juga diperlukan untuk mengetahui posisi kemampuan material dengan acuan dosis minimum

- radiasi yang diizinkan untuk terpapar pada manusia.
- b. Pengembangan material penahan radiasi pada akhirnya juga harus memperhitungkan *mechanical properties* agar fungsi konstruksi kendaraan tempur juga dapat terpenuhi.
 - c. Selain berpotensi untuk digunakan sebagai material kendaraan tempur, selanjutnya material penahan radiasi ini dapat dikembangkan untuk aplikasi *military platform* lain maupun *military building*. Material yang dihasilkan harus memenuhi standar minimum yang diperlukan, baik dari segi proteksi maupun konstruksi. Lembaga penelitian, universitas, *stakeholder* dan *user* diharapkan dapat terus berkoordinasi terkait kebutuhan-kebutuhan yang ada.

Daftar Pustaka

- Bucherl, T.; et al. (2004): Radiography and Tomography with Fast Neutrons At The FRM-II - A Status Report. *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 61(4), pp. 537-540.
- Federation of American Scientist. "Effects of Nuclear Explosions". Retrieved from fas.org/nuke/guide/usa/doctrine/fm8-9/1ch3.htm#, diakses pada 10 Februari 2021
- IAEA Incident and Trafficking Database (ITDB). "Incidents of Nuclear and Other Radioactive Material Out of Regulatory Control 2020 Fact Sheet". Retrieved from <https://www.iaea.org/sites/default/files/20/02/itdb-factsheet-2020.pdf>, diakses pada 25 September 2020.
- Kementerian Pertahanan. (2015). *Buku Putih Pertahanan Indonesia 2015*. Jakarta: Kementerian Pertahanan Republik Indonesia.
- Kristensen, Hans M. and Matt korda. "Status of World Nuclear Forces". Retrieved from <https://fas.org/issues/nuclear-weapons/status-world-nuclear-forces/>, diakses pada 24 September 2020.
- McClellan, Roger O. (2020). *Handbook of Toxicology of Chemical Warfare Agents (Third Edition)*. Cambridge: Academic Press.
- Mulyati Sri, Mohammad Irwan Kaliti, Yeti Kartikasari. (2016). "Penerapan Keselamatan Kerja Radiasi Pada Sistem Pelayanan Fluoroskopi Bagasi di Bandara Internasional
- Simulasi Kinerja Baja Armor Dalam Menahan Radiasi Gamma Dan Neutron Sebagai Material Kendaraan Tempur | Prastiwi, Amperiawan, Manawan, Aritonang | 31

Ahmad Yani Semarang”. *Jurnal LINK*,
vol. 12 (1), pp. 8-11.

Nesbitt, Brian. (2007). *Handbook of Valves
and Actuators*. Amsterdam: Elsevier.

Tuszynski, Jarekt. *Attenuation Coefficient
of Iron*. Retrieved from
[https://commons.wikimedia.org/wi
ki/File:Attenuation_Coefficient_Iron
.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Attenuation_Coefficient_Iron.svg), diakses pada 31 Januari 2021.