

Біلالодін^{1,*}, Ф. Абдуллатіф¹, П. Лестарі², С. Нурхаяті²,
Зусфахаір², Ю. Сарджоно³, Р. Турсінах⁴

¹Кафедра фізики, факультет математики та природничих наук, Університет Джендерела Судірмана, Пурвокерто, Індонезія

²Кафедра хімії, факультет математики та природничих наук, Університет Джендерела Судірмана, Пурвокерто, Індонезія

³Дослідницький центр технологій прискорювачів, Національне агентство досліджень та інновацій, Джакарта, Індонезія

⁴Дослідницька організація з ядерної енергетики, Національне агентство досліджень та інновацій,
Науково-технологічний парк ім. Б. Дж. Хабібі, Сету, Південний Тангеранг, Бантен, Індонезія

*Відповідальний автор: bilalodin@unsoed.ac.id

ЕФЕКТИВНІСТЬ ДВОШАРОВОЇ СИСТЕМИ ФОРМУВАННЯ НЕЙТРОННОГО ПУЧКА ДЛЯ БОР-НЕЙТРОН-ЗАХОПЛЮВАЛЬНОЇ ТЕРАПІЇ: МІКРОДОЗИМЕТРИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕНОСУ ЧАСТИНОК І ВАЖКИХ ІОНІВ

Бор-нейтрон-захоплювальна терапія (BNCT) – це метод лікування раку, що наразі перебуває на стадії розробки. Успіх BNCT залежить від здатності ізотопу ^{10}B розподілятися всередині клітин та від якості використовуваних нейтронів. Метою дослідження є оцінка ефективності нейтронного пучка, сформованого двошаровою системою (DLBSA), у взаємодії з ^{10}B для утворення α -частинок та ^7Li за участю двох сполук бору: р-боронофенілаланіну (BPA) та натрію борокаптату (BSH). Ефективність пучка оцінювали за допомогою мікродозиметричних параметрів: аналізу пробігу частинок, значень лінійної передачі енергії (ЛПЕ) та розподілу дози на клітинному рівні. Оцінку проводили з використанням двох геометричних моделей клітин: одноклітинної та багатоклітинної. Джерелом нейтронів була система DLBSA з потоком нейтронів $1,1 \cdot 10^9$ н/(см²·с). Моделювання та розрахунок мікродозиметричних параметрів здійснювали за допомогою програмного комплексу PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System). Результати дослідження свідчать, що внаслідок взаємодії нейтронів із ^{10}B утворюються α -частинки та ^7Li з пробігом 10 і 4 мкм та значеннями ЛПЕ 251,19 і 363,08 кеВ/мкм відповідно. Розподіл дози від α -частинок та ^7Li , утворених зі сполук BPA, характеризується накопиченням у ядрі клітини, тоді як у випадку сполук BSH – у клітинній мембрані. Мікродозиметричне дослідження підтвердило, що нейтрони від системи DLBSA можуть взаємодіяти з ^{10}B (у складі сполук BPA або BSH) з утворенням α -частинок та ^7Li . Характеристики отриманих α -частинок та ^7Li відповідають вимогам до якості випромінювання, необхідним для BNCT.

Ключові слова: бор-нейтрон-захоплювальна терапія, двошарова система формування пучка (DLBSA), мікродозиметрія, α -частинки, літій, лінійна передача енергії, доза.

Bilalodin^{1,*}, F. Abdullatif¹, P. Lestari², S. Nurhayati²,
Zusfahair², Y. Sarjono³, R. Tursinah⁴

¹Department of Physics, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Jenderal Soedirman University, Purwokerto, Indonesia

²Department of Chemistry, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Jenderal Soedirman University, Purwokerto, Indonesia

³Research Centre for Accelerator Technology, National Research and Innovation Agency, Jakarta, Indonesia

⁴Research Organization for Nuclear Energy, National Research and Innovation Agency,
B. J. Habibie Science and Technology Park, Setu, Tangerang Selatan, Banten, Indonesia

*Corresponding author: bilalodin@unsoed.ac.id

EFFECTIVENESS OF DOUBLE-LAYER BEAM SHAPING ASSEMBLY NEUTRON BEAM FOR BORON NEUTRON CAPTURE THERAPY: A MICRODOSIMETRIC STUDY USING PARTICLE AND HEAVY ION TRANSPORT CODE SYSTEM

Boron neutron capture therapy (BNCT) is a cancer therapy currently under development. The key to successful BNCT therapy depends on the ability of ^{10}B to be distributed within cells and the quality of the neutrons being used. The research aims to study the effectiveness of the neutron beam from Double-Layer Beam Shaping Assembly (DLBSA) in interacting with ^{10}B in producing α and ^7Li particles carried by two boron compounds: p-boronophenylalanine (BPA) and sodium borocaptate (BSH). The effectiveness of the neutron beam is evaluated using microdosimetric parameters by analyzing its range, linear energy transfer (LET) values, and dose distribution at the cellular level. The assessment was carried out using two cell geometry models, namely: single- and multi-cell. The neutron source comes from DLBSA with a neutron flux of $1.1 \cdot 10^9$ n/cm²·s. The modeling, simulation, and calculation of microdosimetry parameters were carried out using the Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) program. The study shows that the interaction between neutrons and ^{10}B produces α and ^7Li particles with ranges of 10 and 4 μm and LET values of 251.19 and 363.08 keV/ μm . The dose distribution of α and ^7Li particles from the BPA compounds accumulates in the nucleus, and those from the BSH compounds in the cell membrane. Based on the microdosimetry

study, neutron interactions from DLBSA can interact with ^{10}B using both the BPA and BSH compounds to produce α and ^7Li particles. The quality of the resulting α and ^7Li particles has met the therapeutic quality required in BNCT.

Keywords: boron neutron capture therapy, Double-Layer Beam Shaping Assembly, microdosimetry, alpha, lithium, linear energy transfer, dose.

REFERENCES

1. K. Nedunchezian et al. Boron neutron capture therapy – A literature review. *J. Clin. Diagn. Res.* 10(12) (2016) ZE01.
2. A.M. Dymova et al. Boron neutron capture therapy: Current status and future perspectives. *Cancer Commun.* 40(9) (2020) 406.
3. I.S. Anderson et al. Research opportunities with compact accelerator-driven neutron sources. *Phys. Rep.* 654 (2016) 1.
4. Yi-Nan Zhu et al. Study on the optimal incident proton energy of $^7\text{Li}(p, n)^7\text{Be}$ neutron source for boron neutron capture therapy. *Nucl. Sci. Tech.* 35(3) (2024) 60.
5. Y. Matsumoto et al. A critical review of radiation therapy: From particle beam therapy (proton, carbon, and BNCT) to beyond. *J. Pers. Med.* 11(8) (2021) 825.
6. X. Zhang, Y. Lin. Developments in neutron sources for boron neutron capture therapy. In: Y. Zhu (Ed.). *Frontiers in Boron-Based Medicinal Chemistry*. Chapter 5 (Singapore: World Scientific, 2023) p. 115.
7. G. Li et al. Design of beam shaping assemblies for accelerator-based BNCT with multi-terminals. *Front. Public Health* 9 (2021) 642561.
8. Bilalodin et al. Optimization and verification of double layer beam shaping assembly (DLBSA) for epithermal neutron generation. *J. Teknol.* 84(4) (2022) 103.
9. Bilalodin et al. The testing of epithermal neutron beams produced by the double layer beam shaping assembly (DLBSA) on a water phantom using particle heavy ion transport system (PHITS). *Proceeding ICMA-SURE* 3(1) (2024) 209.
10. Bilalodin et al. Dosimetry analysis of boron neutron capture therapy (BNCT) on thyroid cancer using PHITS code with neutron from 30 MeV cyclotron. *J. Teknol.* 85(5) (2023) 21.
11. F.R. Barth, P. Mi, W. Yang. Boron delivery agents for neutron capture therapy of cancer. *Cancer Commun.* 38 (2018) 35.
12. J. Vohradsky et al. Evaluation of silicon based microdosimetry for Boron Neutron Capture Therapy Quality Assurance. *Phys. Med.: Eur. J. Med. Phys.* 66 (2019) 8.
13. P. Shamshiri, G. Forozani, A. Zabihi. An investigation of the physics mechanism based on DNA damage produced by protons and alpha particles in a realistic DNA model. *Nucl. Instrum. Methods B* 454 (2019) 40.
14. T. Furuta, T. Sato. Medical application of particle and heavy ion transport code system PHITS. *Radiol. Phys. Technol.* 14(3) (2021) 215.
15. A. Karaoglu et al. Calculation by GAMOS/Geant4 simulation of cellular energy distributions from alpha and lithium-7 particles created by BNCT. *Appl. Radiat. Isot.* 132 (2018) 206.
16. P. Qi et al. The potential role of borophene as a radiosensitizer in boron neutron capture therapy (BNCT) and particle therapy (PT). *Biomater. Sci.* 8(10) (2020) 2778.
17. B. Marcaccio et al. Unraveling the role of boron microdistribution in BNCT dosimetry of glioblastoma multiforme: combined theoretical and experimental insights. *Phys. Med. Biol.* 71(8) (2026) 085004.
18. Bilalodin et al. Microdosimetry test on double layer beam shaping assembly neutron beam as a boron neutron capture therapy neutron source using PHITS code. *Nucl. Phys. At. Energy* 25(4) (2024) 388.
19. T. Sato et al. Features of particle and heavy ion transport code system (PHITS) version 3.02. *J. Nucl. Sci. Technol.* 55(6) (2018) 684.
20. L. Moghaddasi, E. Bezak. Geant4 beam model for boron neutron capture therapy: investigation of neutron dose components. *Australas. Phys. Eng. Sci. Med.* 41(1) (2018) 129.
21. A. Pitto-Barry. Polymers and boron neutron capture therapy (BNCT): a potent combination. *Polym. Chem.* 12(14) (2021) 2035.
22. S.-I. Miyatake et al. Boron neutron capture therapy for malignant brain tumors. *Neurol. Med. Chir.* 56(7) 2016) 361.
23. H. Fukunaga. Implications of radiation microdosimetry for accelerator-based boron neutron capture therapy: a radiobiological perspective. *Br. J. Radiol.* 93(1111) (2020) 20200311.
24. N. Hu et al. Evaluation of PHITS for microdosimetry in BNCT to support radiobiological research. *Appl. Radiat. Isot.* 161 (2020) 109148.
25. T. Mukawa, T. Matsumoto, K. Niita. Study on microdosimetry for boron neutron capture therapy. *Prog. Nucl. Sci. Technol.* 2 (2011) 242.
26. V. Conte, A. Bianchi, A. Selva. Boron neutron capture therapy: Microdosimetry at different boron concentrations. *Appl. Sci.* 14(1) (2024) 216.
27. Y.-C. Teng et al. Correcting for the heterogeneous boron distribution in a tumor for BNCT dose calculation. *Sci. Rep.* 13(1) (2023) 15741.

28. M. Lamba, A. Goswami, A. Bandyopadhyay. A periodic development of BPA and BSH based derivatives in boron neutron capture therapy (BNCT). [Chem. Commun. 57\(7\) \(2021\) 827](#).
29. H. Xu et al. Novel promising boron agents for boronneutron capture therapy: Current status and outlook on the future. [Coord. Chem. Rev. 511 \(2024\) 215795](#).
30. T. Tani et al. Advanced boron neutron capture therapy targeting cancer stem cells by selective induction of LAT1 overexpression. [Radiat. Res. 200\(1\) \(2023\) 21](#).
31. D.S. Seneviratne et al. Next-generation boron drugs and rational translational studies driving the revival of BNCT. [Cells 12\(10\) \(2023\) 1398](#).
32. B. Zhao et al. Research on hybrid methods for variance reduction in Monte Carlo dose calculation of BNCT. [Nucl. Eng. Technol. 58 \(2026\) 104254](#).

Надійшла / Received 05.08.2025