

## Rekonstruksi Fantom Toraks menggunakan Nilai Densitas *Hounsfield Unit* sebagai Fantom Alternatif untuk Verifikasi Dosis Radiasi

Fiqi Diyona<sup>1</sup>, Afdhal Muttaqin<sup>1\*</sup>, Rhandyka Rafli<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Andalas, Kampus Unand Limau Manis, Padang, 25163, Indonesia.

<sup>2</sup>Instalasi Onkologi Radiasi, Rumah Sakit Universitas Andalas, Universitas Andalas, Kampus Unand Limau Manis, Padang, 25163, Indonesia.

### Info Artikel

#### **Histori Artikel:**

Diajukan: 15 Juni 2025  
Direvisi: 10 Oktober 2025  
Diterima: 6 November 2025

#### **Kata kunci:**

CT Simulator  
Densitas  
Fantom  
Toraks

#### **Keywords:**

CT Simulator  
Density  
Phantom  
Thorac

#### **Penulis Korespondensi:**

Afdhal Muttaqin  
Email:  
[afdhalmuttaqin@sci.unand.ac.id](mailto:afdhalmuttaqin@sci.unand.ac.id)

### ABSTRAK

Telah dilakukan penelitian mengenai rekonstruksi fantom toraks yang dapat digunakan sebagai alat pengganti toraks manusia dalam melakukan verifikasi dosis radiasi. Penelitian ini bertujuan untuk merekonstruksi fantom replika rongga dada manusia menggunakan bahan sederhana. Rekonstruksi fantom toraks diawali dengan pengujian nilai densitas bahan material fantom yaitu tulang cadaver sebagai material pengganti tulang, styrofoam sebagai pengganti organ paru, dan plastisin sebagai pengganti jaringan lunak seperti otot dan lemak. Hasil penelitian ini didapatkan nilai densitas untuk tulang cadaver berkisar antara +350 HU hingga +1000 HU, selanjutnya nilai densitas untuk styrofoam sebagai pengganti paru adalah -700 HU hingga -950 HU, dan rentang nilai densitas plastisin sebagai pengganti jaringan lunak adalah +39 HU hingga +234 HU. Rekonstruksi fantom replika berbasis skaletal sudah sesuai dengan posisi masing-masing organ dibuktikan dengan hasil citra CT Simulator. Hasil replika fantom toraks ini layak digunakan sebagai pengganti fantom standar yang memiliki harga sangat mahal.

*Phantoms play an essential role in medical physics, particularly for radiation dose verification, yet the high cost of commercial standard phantoms often limits their availability. This study aimed to reconstruct a thoracic phantom as a replica of the human chest cavity using simple and low-cost materials. The reconstruction process began with evaluating the density values of the selected materials: cadaver bone was used as a substitute for human bone, styrofoam for lung tissue, and plasticine for soft tissues such as muscle and fat. Density measurements showed that cadaver bone ranged from +350 HU to +1000 HU, styrofoam from -700 HU to -950 HU, and plasticine from +39 HU to +234 HU. The skeletal-based reconstruction successfully represented the anatomical alignment of thoracic organs, as confirmed by CT simulator imaging. These findings indicate that the reconstructed thoracic phantom provides a feasible and cost-effective alternative to expensive commercial phantoms and can be effectively utilized for radiation dose verification in medical physics applications.*

Copyright © 2025 Author(s). All rights reserved

## I. PENDAHULUAN

Radioterapi merupakan teknologi Kesehatan untuk mengobati kanker menggunakan sinar pengion. Radiasi pada kanker payudara dapat berupa terapi adjuvant kuratif setelah pembedahan ataupun sebagai terapi paliatif untuk stadium lanjut. Tujuan radiasi pada pasien kanker payudara adalah memberikan dosis terapi pada target tumor dan meminimalisir dosis yang diterima pada Organ At Risk (OAR). Teknologi radiasi berkembang dengan pesat seiring dengan meningkatnya regulasi untuk keamanan radiasi, baik secara lokal melalui peraturan institusi, regulasi keamanan radiasi nasional yang ditetapkan oleh BAPETEN, maupun regulasi internasional di bawah IAEA (International Atomic Energy Agency). Upaya untuk meningkatkan kualitas dan keamanan radiasi merupakan suatu mata rantai dari proses radiasi mulai dari asesmen, penentuan target, perencanaan, verifikasi, dan radiasi. Kesalahan dari salah satu dari proses ini dapat berakibat kecelakaan radiasi yang tidak diinginkan.

Teknologi verifikasi dosis penyinaran radiasi saat ini secara garis besar menggunakan dua metode yaitu menggunakan fantom dan metode in-situ. Fantom komersial seperti NEMA body phantom maupun Lungman anthropomorphic phantom masih memiliki sejumlah keterbatasan ketika diterapkan pada simulasi klinis. Representasi anatomi yang digunakan bersifat ideal dan seragam, sehingga tidak sepenuhnya mencerminkan variasi individual pasien dalam praktik radioterapi (Khan & Gibbons, 2014; McDermott & Orton, 2018). Nilai Hounsfield Unit (HU) dari material penyusunnya sering kali tidak setara dengan rentang HU jaringan biologis sesungguhnya, baik pada paru, jaringan lunak, maupun tulang (Mowlavi et al., 2017; Guo et al., 2020; Azhari et al., 2022). Namun demikian, fantom antropomorfik komersial yang memiliki geometri lebih menyerupai tubuh manusia umumnya memiliki harga yang sangat tinggi dan hanya tersedia di pusat layanan besar. Kondisi ini menjadi kendala bagi banyak rumah sakit, terutama fasilitas dengan keterbatasan anggaran, sehingga alternatif berupa pengembangan fantom replika toraks berbahan sederhana menjadi solusi yang relevan dan aplikatif di beberapa rumah sakit.

Kemajuan teknologi saat ini menawarkan solusi untuk mengatasi keterbatasan tersebut. Dengan memanfaatkan data CT pasien, anatomi toraks dapat direkonstruksi dengan material yang dapat disesuaikan. Teknologi ini memungkinkan pemilihan material (PLA, ABS, PETG, resin, atau material komposit) serta pengaturan densitas guna menghasilkan variasi HU mendekati jaringan biologis. Pereira et al. (2024) dalam tinjauan sistematis menyebutkan bahwa 3D-printed fantom thoraks mampu mereproduksi anatomi dengan akurat untuk aplikasi Quality Assurance (QA). Fantom standar berbentuk silindris yang dapat mengukur dosis pada berbagai kedalaman yang sering digunakan untuk proses verifikasi masih memiliki kekurangan seperti halnya geometri dari fantom tersedia saat ini kurang menggambarkan geometri tubuh manusia yang lebih kompleks (Ding et al, 2014; ICRU Report 24, 1976)

Merujuk pada permasalahan tersebut, maka penelitian ini diharapkan dapat memunculkan teknologi baru yang lebih menggambarkan keadaan geometri tubuh manusia sebenarnya, namun tetap memberi ruang fleksibilitas pengukuran dosis dan tetap non invasif. Merekonstruksi fantom replika toraks sehingga dapat menjangkau pemantauan dosis pada organ bagian dalam tubuh manusia menjadi sebuah solusi baru dalam verifikasi dosis radiasi. Fantom replika ini selanjutnya bisa menggantikan fantom standar dengan harga yang mahal sekaligus dapat memberikan ruang untuk memverifikasi dosis radiasi hingga pada kedalaman tertentu dari tubuh manusia.

## II. METODE

### 2.1 Persiapan Karakterisasi Material Fantom

Persiapan karakterisasi material fantom dimulai dengan memilih bahan-bahan yang akan digunakan sebagai replika fantom toraks. Bahan yang harus disiapkan adalah tulang cadaver atau 3D *print* kalsium tinggi sebagai pengganti tulang tengkorak dada, *sponge/styrofoam* sebagai pengganti organ paru, dan plastisin sebagai pengganti jaringan lunak seperti otot dan lemak. Bahan-bahan tersebut dibentuk sesuai dengan anatomi fisiologis tubuh manusia.

## 2.2 Uji Coba Material Fantom Menggunakan CT Simulator

Uji coba material dilakukan menggunakan CT Simulator merk Toshiba Alexion milik Instalasi Onkologi Radiasi RS Universitas Andalas. Uji coba dilakukan terhadap semua material yang akan digunakan untuk fantom replika toraks. Uji yang akan dilakukan meliputi uji nilai densitas bahan (HU) dan uji kelayakan sebagai replika toraks manusia. Material tulang kadaver dan hasil cetak 3D berbasis kalsium tinggi ditargetkan memiliki nilai densitas sekitar +300 HU atau lebih agar menyerupai jaringan tulang kortikal. Material *sponge* atau *styrofoam* digunakan untuk merepresentasikan organ paru dengan capaian nilai densitas sekitar -500 HU atau lebih, sedangkan material plastisin yang berperan sebagai pengganti jaringan lunak dan otot diharapkan memiliki nilai densitas sekitar +40 HU atau lebih. Rentang nilai HU tersebut sesuai dengan karakteristik jaringan biologis yang diuji oleh *White et al.* (1987) dan juga diterapkan dalam pengembangan *heterogeneity-corrected thorax phantom* untuk verifikasi dosis radioterapi oleh *Saito* (2018).

Rekontruksi fantom replika dilakukan dengan menggunakan material yang sudah dipilih, seperti *sponge/stayrofoam* untuk organ paru, plastisin untuk otot dan lemak. Material tulang disusun dan dibentuk menurut susunan anatomi tengkorak dada manusia. *Sponge/stayrofoam* dipotong dan dibentuk menyerupai organ paru manusia dan selanjutnya plastisin dibentuk menyerupai jaringan lunak seperti otot dan lapisan lemak manusi. Setelah proses pembentukan material menyerupai bagian organ tubuh manuaasi, selanjutnya material tersebut disusun satu persatu hingga menyerupai struktur anatomi rongga dada manusia. Materila fantom yang telah direkonstruksi menjadi fantom replika rongga dada manusia kembali dilakukan uji nilai densitas dan uji kelayakan secara keseluruhan menggunakan CT Simulator.

## III. HASIL DAN DISKUSI

### 3.1 Karakterisasi Material Fantom

Material penyusun fantom berbasis skaletal dipilih berdasarkan nilai densitas masing-masing materialnya. Material dipilih sesuai dengan replika fantom tubuh manuasia bagian *thorac*. Berikut beberapa material fantom yang dipilih sebagai bahan penyusun fantom replika:

1. Material plastisin memiliki densitas berkisar antara 1.1–1.3 g/cm<sup>3</sup> yang sesuai untuk mewakili jaringan lunak seperti otot dan jantung *Matsubara et al.* (2019).
2. *Sponge/styrofoam* memiliki densitas sekitar 0.3–0.4 g/cm<sup>3</sup> dan digunakan untuk merepresentasikan jaringan paru-paru *Ramos et al.* (2015).
3. Tulang kadaver atau 3D print berbahan kalsium imitasi menunjukkan densitas mendekati tulang asli berkisar antara 1.5–1.8 g/cm<sup>3</sup> *Tamiya & Nakagawa* (2014).

Material penyusun fantom berbasis skaletal diatas telah diuji menggunakan CT Simulator dengan parameter uji saat pengambilan data menggunakan kVp 120 kV, *exposure time* 0.75 s, *focal spot* 1,4 mm, dan *slice thickness* 3 mm. Pengujian dilakukan untuk mengetahui densitas masing-masing komponen pengganti jaringan tubuh manusia. Pengujian nilai densitas fantom replika toraks memperoleh hasil pada tabel 1:

**Tabel 1** Hasil pengujian densitas fantom replika toraks

| Organ             | Densitas                   |                     |
|-------------------|----------------------------|---------------------|
|                   | Densitas Fantom (Material) | Densitas Standar    |
| Tulang kortikal   | +966 HU                    | +1000 HU            |
| Tulang trabekular | +350 HU s/d +750 HU        | +300 HU s/d +800 HU |
| Jaringan lunak    | +39 HU s/d +234 HU         | -100 HU s/d +225 HU |
| Paru              | -700 HU s/d -950 HU        | -500 HU s/d -950 HU |

Hasil pengujian pada material fantom mendapatkan rentang nilai densitas yang sesuai dengan nilai densitas standar untuk masing-masing organ. Hasil ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Congyang Xue, et al (2024). Hasil uji diatas menunjukkan bahwa struktur fantom sudah menyerupai tubuh manusia secara anatomi dan fisik untuk bagian toraks manusia.

### 3.2 Hasil Rekonstruksi Fantom Toraks

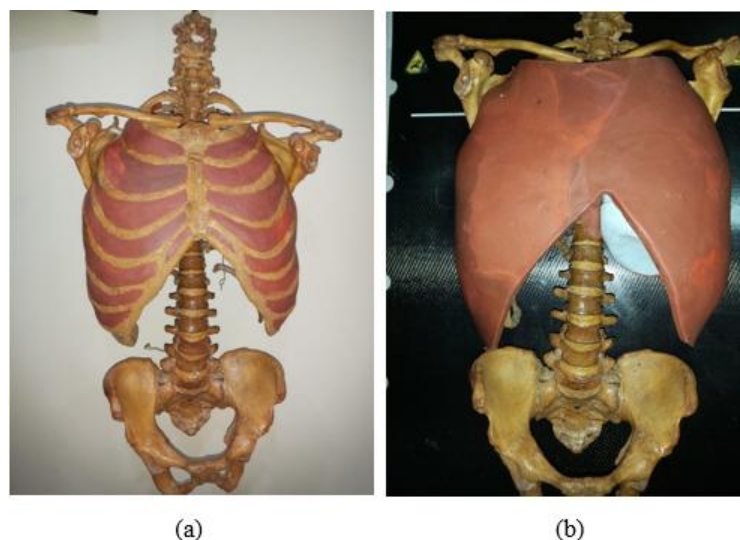
Rekonstruksi fantom toraks dilakukan dengan menyusun material berdasarkan bentuk anatomi tubuh manusia. Organ paru direkonstruksi menggunakan *sponge/styrofoam*. Rekonstruksi organ paru ditunjukkan pada Gambar 1.



**Gambar 1** Rekonstruksi organ paru

Hasil pengukuran densitas material *sponge/styrofoam* sebagai pengganti organ paru berkisar antara -700 HU hingga -950 HU, hal ini sejalan dengan nilai densitas standar yaitu -900 hingga -700 HU (Saito, M, 2018; Radiopaedia, 2023). Selain itu, studi lainnya juga menunjukkan bahwa variasi HU dapat diminimalkan melalui standarisasi antar scanner CT (Boone et al., 2011; Schmidt et al., 2024), sehingga hasil yang diperoleh diyakini cukup konsisten berada dalam rentang -700 HU hingga -950 HU.

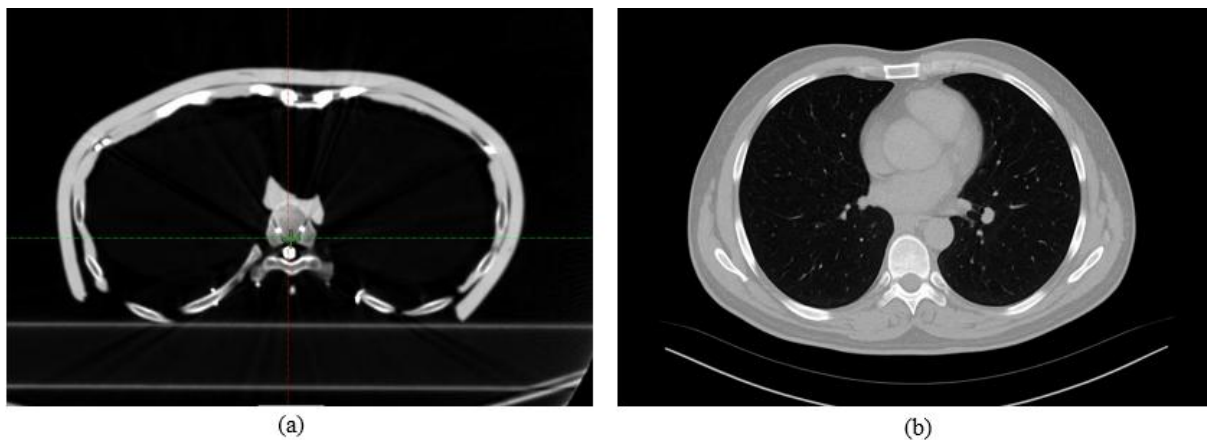
Tulang tengkorak dada atau toraks direkonstruksi menggunakan kalsium imitasi yang sudah dibentuk sedemikian rupa sehingga secara fisik dan material terlihat sangat mirip dengan tengkorak manusia sungguhan. Tulang pada bagian toraks pada umumnya terbagi 2 yaitu tulang kortikal dan tulang trabekular. Hasil penelitian ini memperlihatkan bahwa densitas tulang kortikal lebih tinggi dibandingkan tulang trabekular, sesuai dengan laporan literatur bahwa kortikal umumnya memiliki nilai HU di atas 1000 sedangkan trabekular berkisar 300 HU–800 HU (Radiopaedia.org, 2023). Studi kuantitatif juga menunjukkan hal serupa, di mana Mizutani et al. (2020) menemukan rata-rata densitas kortikal sebesar  $286,7 \pm 120,8$  HU dibandingkan trabekular  $165,6 \pm 92,4$  HU, sementara Zhou et al. (2023) melaporkan nilai HU kortikal sekitar 175–189 HU dan trabekular 98–102 HU.



**Gambar 2** (a) Rekonstruksi tulang tengkorak dada atau toraks (b) Rekonstruksi fantom toraks

Rekonstruksi selanjutnya adalah jaringan lemak dan otot yang terbuat dari plastisin. Nilai densitas plastisin berkisar antara +39 HU hingga +234 HU. Nilai densitas plastisin ini mampu

menggantikan jaringan lunak tubuh manusia seperti jaringan otot dan jaringan lemak, diman nilai densitas standar untuk jaringan tersebut adalah berkisar -100 HU hingga +225 HU. Rekonstruksi tulang tengkorak dada dan hasil rekonstruksi fantom toraks dapat dilihat pada Gambar 2.



**Gambar 3** (a) Hasil citra replica fantom toraks (b) Hasil citra toraks manusia

Untuk membuktikan kelayakan fantom toraks yang telah direkonstruksi maka dilakukan uji kelayakan menggunakan CT Simulator. Hasil CT simulasi fantom toraks ini dapat dinilai layak sebagai media verifikasi dosis, karena menyediakan geometri realistis, mendukung pembacaan dosis internal (tidak hanya permukaan), non-invasif dan dapat diulang. Hasil uji kelayakan replika fantom toraks dan hasil pencitraan toraks manusia dapat dilihat pada Gambar 3.

#### IV. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa material yang dipilih untuk merekonstruksi fantom toraks sudah sesuai dengan nilai densitas standar organ tubuh manusia, yaitu plastisin sebagai pengganti jaringan otot dan lemak, *stayrofoam* sebagai pengganti organ paru, dan tulang kadaver sebagai pengganti tulang. Rekonstruksi fantom replika berbasis skaletal sudah sesuai dengan posisi masing-masing organ dibuktikan dengan hasil citra CT Simulator. Replika fantom toraks ini layak digunakan sebagai pengganti fantom standar yang memiliki harga sangat mahal.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Azhari, A., et al. (2022). Development of low-cost thorax phantom for radiotherapy QA based on HU calibration. *Radiation Physics and Chemistry*, 194, 110026.
- Boone, J. M., Strauss, K. J., Cody, D. D., McCollough, C. H., McNitt-Gray, M. F., & Toth, T. L. (2011). Size-specific dose estimates (SSDE) in pediatric and adult body CT examinations (AAPM Report No. 204). College Park, MD: American Association of Physicists in Medicine.
- Globocan, 2020, Global Burden of Cancer Study: Cancer in Indonesia, Global Cancer Observatory.
- Guo, J., et al. (2020). Assessment of CT number accuracy in anthropomorphic phantoms. *Physica Medica*, 76, 35–42.
- KEMENKES, 2018, Pedoman Nasional Pelayanan Kedokteran (PNPK) Tata Laksana Kanker Payudara, In DJPK Kementerian Kesehatan Republik Indonesia (Vol. 6, Issue 1).
- Khan, F. M., & Gibbons, J. P. (2014). *Khan's the physics of radiation therapy* (5th ed.). Lippincott Williams & Wilkins.
- Kwon, J. Y., Han, J. H., & Kim, S. H. (2025). Development of a 3D-printed chest phantom with pulmonary nodules for low-dose CT optimization. *Applied Sciences*, 15(1), 309. <https://doi.org/10.3390/app15010309>.
- Matsubara, K., et al. (2019). Measurement of CT number accuracy and uniformity in soft tissues. *Radiological Physics and Technology*, 12(3), 295–302.
- McDermott, L. N., & Orton, C. G. (2018). Anthropomorphic phantoms are essential for realistic radiotherapy dosimetry. *Medical Physics*, 45(7), 3093–3095.

- Mizutani, J., Suzuki, T., Matsumoto, H., Yamashita, K., & Hasegawa, T. (2020). Cortical bone trajectory and traditional trajectory: A radiological evaluation of screw fixation in the lumbar spine. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*, 15(1), 302. <https://doi.org/10.1186/s13018-020-01821-0>.
- Mowlavi, A. A., et al. (2017). Evaluation of HU values in commercial anthropomorphic phantoms compared to human tissues. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 18(5), 210–218.
- Radiopaedia.org. (2023). Hounsfield unit – Radiology Reference Article. Retrieved August 27, 2025, from <https://radiopaedia.org/articles/hounsfield-unit>
- Radiopaedia.org. (2023). Hounsfield unit – Radiology Reference Article. Retrieved August 27, 2025, from <https://radiopaedia.org/articles/hounsfield-unit>.
- Ramos, R., et al. (2015). Development of an anthropomorphic thorax phantom for radiotherapy dosimetry using cost-effective materials. *Physica Medica*, 31(8), 965–972. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2015.06.001>.
- Schmidt, B., Flohr, T. G., Heismann, B., Raupach, R., Fuchs, T., Nielsen, T., & Padole, A. (2024). Comparison of Hounsfield Unit variability between two photon-counting CT systems: A phantom study applied to lung CT. *Physica Medica*, 118, 103845. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2024.103845>.
- Saito, M. (2018). Development of a heterogeneity-corrected thorax phantom for dose verification in radiotherapy. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 19(3), 123–131. <https://doi.org/10.1002/acm2.12356>.
- Smith, B. D., Bentzen, S. M., Correa, C. R., et al., (2011). Fractionation for whole breast irradiation: An American society for radiation oncology (ASTRO) evidence-based guideline. *International Journal of Radiation Oncology Biology Physics*, 81(1), 59–68. <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2010.04.042>.
- Tamiya, T., & Nakagawa, K. (2014). Evaluation of 3D-printed tissue-equivalent materials for radiotherapy phantom development. *Medical Physics*, 41(11), 112101. <https://doi.org/10.1118/1.4897574>.
- Wang, M., Chen, Y., Zhang, H., Li, J., & Xu, X. (2024). Bone density of the cervical, thoracic and lumbar spine measured using Hounsfield units of computed tomography: Results of 4350 vertebrae. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 25(1), 178. <https://doi.org/10.1186/s12891-024-07324-1>.
- White, D. R., Woodard, H. Q., & Hammond, S. M. (1987). Average soft-tissue and bone models for use in radiation dosimetry. *British Journal of Radiology*, 60(717), 907–913. <https://doi.org/10.1259/0007-1285-60-717-907>.
- Wikipedia. (2024). Hounsfield scale. Retrieved August 27, 2025, from [https://en.wikipedia.org/wiki/Hounsfield\\_scale](https://en.wikipedia.org/wiki/Hounsfield_scale).
- Xue, C., Sun, G., Wang, N., Liu, X., He, G., Wei, Y., & Xi, Z. (2024). Value of Hounsfield units measured by chest computed tomography for assessing bone density in the thoracolumbar segment of the thoracic spine. *Asian Spine Journal*, 18(3), 336–345. <https://doi.org/10.31616/asj.2023.0438>.
- Zhou, W., Li, Y., Wang, Y., & Sun, Z. (2023). CT and MR for bone mineral density and trabecular bone score assessment in osteoporosis evaluation. *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*, 13(10), 6361–6372. <https://doi.org/10.21037/qims-23-389>.