Jurnal Fisika Unand (JFU)
Vol. 15, No. 5, September 2026, hal. 553 – 561
ISSN: 2302-8491 (Print); 2686-2433 (Online)
https://doi.org/10.25077/jfu.15.5.553-561.2026

Open Access

Estimasi dan Kontribusi Dosis Radiofarmaka dan *Computed Tomography* pada Pemeriksaan *Bone Scan* dengan *Single Photon Emission Computed Tomography/Computed Tomography*

Fransischa Ramona[1], Afdhal Muttaqin[1*], Yola Despriani[2]
[1]Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Andalas, Kampus Limau Manis, Padang, 25163, Indonesia
[2]Sub Bagian Kedokteran Nuklir, Instalasi Radiologi, Radioterapi dan Kedokteran Nuklir, RSUP Dr. M. Djamil Padang, Jalan Perintis Kemerdekaan, Jati, Padang, 20170, Indonesia

Info Artikel

Histori Artikel:
Diajukan: 20 April 2026
Direvisi: 15 Agusutus 2026
Diterima: 30 September 2026

Kata kunci:
bone scan
CT *scan*
dosis efektif
radiofarmaka
SPECT/CT

Penulis Korespondensi:
Afdhal Muttaqin
Email:afdhalmuttaqin@sci.unand.ac.id

ABSTRAK

Pemeriksaan *bone scan* menggunakan Technetium-99m Methylene diphosphonate (^{99m}Tc-MDP) merupakan salah satu pemeriksaan kedokteran nuklir yang digunakan untuk mendiagnosis berbagai kelainan tulang. Penggunaan sistem hibrid *Single-Photon Emission Computed Tomography/Computed Tomography* (SPECT/CT) memberikan informasi fungsional dan anatomi secara bersamaan, tetapi menghasilkan paparan radiasi dari radiofarmaka dan CT *scan*. Penelitian ini bertujuan untuk mengestimasi dosis efektif dari radiofarmaka dan CT *scan* serta menentukan kontribusi masing-masing terhadap total estimasi dosis efektif pada pemeriksaan *bone scan* dengan SPECT/CT. Penelitian retrospektif dilakukan pada 44 pasien yang menjalani pemeriksaan *bone scan* dengan SPECT/CT di RSUP Dr. M. Djamil Padang selama Maret-Mei 2026. Estimasi dosis efektif radiofarmaka dihitung berdasarkan aktivitas ^{99m}Tc-MDP, sedangkan estimasi dosis efektif CT *scan* dihitung berdasarkan nilai *Dose-Length Product* (DLP). Rata-rata aktivitas radiofarmaka adalah (707,83 ± 106,27) MBq dengan estimasi dosis efektif sebesar (3,47 ± 0,52) mSv. Rata-rata DLP sebesar (642,09 ± 188,54) mGy·cm dengan estimasi dosis efektif CT *scan* sebesar (8,35 ± 2,48) mSv. Total estimasi dosis efektif rata-rata sebesar (11,82 ± 2,74) mSv. CT *scan* memberikan kontribusi rata-rata sebesar 69,72%, sedangkan radiofarmaka sebesar 30,28%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa CT *scan* memberikan kontribusi lebih besar terhadap estimasi total dosis efektif pada pemeriksaan *bone scan* dengan SPECT/CT.

Keywords:
bone scan
CT scan
effective dose
radiopharmaceutical
SPECT/CT

Bone scintigraphy using Technetium-99m methylene diphosphonate (^{99m}Tc-MDP) is a nuclear medicine imaging procedure widely used for the diagnosis of various skeletal disorders. The use of hybrid Single-Photon Emission Computed Tomography/Computed Tomography (SPECT/CT) provides simultaneous functional and anatomical information; however, it also results in radiation exposure from both the administered radiopharmaceutical and the CT component. This study aimed to estimate the effective doses associated with the radiopharmaceutical and CT components and to determine their respective contributions to the total estimated effective dose in bone scan SPECT/CT examinations. A retrospective study was conducted in 44 patients who underwent bone scan SPECT/CT examinations at Dr. M. Djamil Hospital, Padang, Indonesia, between March and May 2026. The radiopharmaceutical effective dose was estimated based on the administered ^{99m}Tc-MDP activity, whereas the CT effective dose was estimated from the Dose-Length Product (DLP). The mean administered radiopharmaceutical activity was (707.83 ± 106.27) MBq, corresponding to an estimated effective dose of (3.47 ± 0.52) mSv. The mean DLP was (642.09 ± 188.54) mGy·cm, corresponding to an estimated CT effective dose of (8.35 ± 2.48) mSv. The mean total estimated effective dose was (11.82 ± 2.74) mSv. The CT component contributed 69.72% of the total estimated effective dose, whereas the radiopharmaceutical component contributed 30.28%. These findings indicate that the CT component contributed a greater proportion of the total estimated effective dose in bone scan SPECT/CT examinations.

Copyright © 2026 Author(s)

I. PENDAHULUAN

Kedokteran nuklir telah menjadi salah satu modalitas pencitraan yang berperan penting dalam praktik klinis kesehatan. Perkembangan radiofarmaka dan teknologi pencitraan telah memperluas penerapannya dalam bidang diagnostik (Vaz et al., 2020). Salah satu perkembangan tersebut adalah teknologi hibrida seperti *Single-Photon Emission Computed Tomography/Computed Tomography* (SPECT/CT) yang menggabungkan informasi fungsional dari distribusi radiofarmaka dan informasi anatomi dari *computed tomography* (CT) (Bouchareb et al., 2024). Meskipun memberikan informasi diagnostik yang lebih komprehensif, pemeriksaan dengan SPECT/CT akan meningkatkan paparan radiasi yang diterima pasien karena menerima dua sumber paparan radiasi, yaitu radiasi internal dari radiofarmaka yang diberikan dan radiasi eksternal dari CT *scan* (ICRP 135, 2017).

SPECT/CT telah digunakan dalam berbagai pemeriksaan diagnostik, salah satunya adalah pemeriksaan *bone scan*, untuk mendeteksi berbagai kelainan tulang atau metastasis tulang dengan menggunakan radiofarmaka Technetium-99m dilabel dengan phosphate (Bartel et al., 2018; Wyngaert et al., 2016). Pada pemeriksaan ini, kontribusi paparan radiasi dari radiofarmaka berkaitan dengan aktivitas radiofarmaka yang diberikan kepada pasien. Sementara itu, paparan radiasi dari CT *scan* dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain parameter akuisisi, cakupan pemindaian, panjang area pemindaian, serta karakteristik fisik pasien (Tulik et al., 2020). Perbedaan faktor-faktor tersebut dapat menyebabkan variasi dosis radiasi antar pasien maupun antar fasilitas pelayanan kesehatan. Dengan demikian, penilaian dosis pada pemeriksaan *bone scan* dengan SPECT/CT perlu dilakukan secara komprehensif dengan mempertimbangkan kontribusi radiofarmaka dan CT *scan*.

Salah satu besaran yang dapat digunakan untuk mengestimasi paparan radiasi secara keseluruhan adalah dosis efektif (*effective dose*, ED). Dosis efektif merupakan besaran dosimetri yang digunakan untuk menggambarkan paparan radiasi pengion dengan mempertimbangkan sensitivitas berbagai jaringan dan organ (Seeram, 2016). Dosis efektif dapat digunakan untuk membandingkan paparan radiasi dari berbagai prosedur diagnostik yang menggunakan radiasi pengion. Pada pemeriksaan *bone scan* dengan SPECT/CT, dosis efektif dapat digunakan untuk mengestimasi kontribusi paparan radiasi dari radiofarmaka dan CT *scan* secara terpisah, kemudian menilai kontribusi keduanya terhadap total estimasi dosis efektif suatu prosedur (Alrehily & Alshamrani, 2023; Ben-Rejeb & Ben-Sellem, 2022; Brindhaban, 2020). Pendekatan ini dapat memungkinkan identifikasi komponen pemeriksaan yang memberikan kontribusi lebih besar terhadap total paparan radiasi sehingga dapat menjadi dasar dalam evaluasi dan optimasi protokol pemeriksaan.

Besarnya dosis radiasi yang diterima pada pemeriksaan *bone scan* dengan SPECT/CT dapat bervariasi antar pasien dan antar fasilitas pelayanan kesehatan. Pada radiofarmaka, variasi aktivitas yang diberikan akan mempengaruhi estimasi dosis efektif internal. Sementara itu, pada CT *scan*, variasi parameter eksposi dan panjang area pemindaian dapat menyebabkan perbedaan *Dose Length Product* (DLP) dan dosis efektif CT *scan* (Inoue et al., 2018; Tulik et al., 2020). Selain itu, karakteristik fisik pasien juga dapat memengaruhi parameter eksposi CT *Scan*, terutama pada penggunaan sistem *Automatic Exposure Control* (AEC), sehingga berkontribusi terhadap variasi dosis antar pasien (Inoue et al., 2022). Oleh karena itu, estimasi dosis berdasarkan satu sumber radiasi saja belum dapat menggambarkan keseluruhan paparan radiasi yang terkait dengan pemeriksaan *bone scan* dengan SPECT/CT. Evaluasi kedua sumber paparan radiasi secara bersamaan diperlukan untuk mengetahui besarnya kontribusi masing-masing terhadap total estimasi dosis efektif.

Beberapa penelitian sebelumnya telah melaporkan estimasi dosis efektif pada pemeriksaan *bone scan* menggunakan SPECT/CT. Dosis efektif yang berasal dari radiofarmaka berada pada rentang rata-rata 2 mSv - 6 mSv, sedangkan dosis efektif dari CT *scan* berada pada rentang rata-rata 3 mSv - 5 mSv (Alrehily & Alshamrani, 2023; Aye, 2024; Ben-Rejeb & Ben-Sellem, 2022). Meskipun estimasi dosis dari radiofarmaka dan CT *scan* pada pemeriksaan *bone scan* dengan SPECT/CT telah dilaporkan pada beberapa penelitian sebelumnya, informasi mengenai kontribusi relatif kedua sumber paparan radiasi terhadap total estimasi dosis efektif pada protokol klinis lokal masih terbatas. Perbedaan aktivitas radiofarmaka, parameter akuisisi CT *scan*, cakupan anatomi, dan karakteristik pasien dapat menyebabkan variasi estimasi dosis antar fasilitas. Oleh karena itu, evaluasi pada tingkat fasilitas diperlukan untuk memperoleh gambaran dosis pada protokol yang diterapkan dan mengidentifikasi kontribusi relatif masing-masing sumber paparan. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengestimasi dosis efektif yang berasal dari ^{99m}Tc-MDP dan CT *scan* pada pemeriksaan *bone*

scan, menentukan kontribusi relatif masing-masing sumber radiasi terhadap total dosis efektif yang diestimasi, serta mengevaluasi hubungan antara indeks massa tubuh (IMT) dan parameter dosis radiasi. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan informasi dasar untuk mendukung evaluasi dan optimisasi dosis pada pemeriksaan *bone scan* dengan SPECT/CT dengan tetap mempertahankan kualitas citra diagnostik.

II. METODE

Penelitian menggunakan data retrospektif pada pasien yang menjalani pemeriksaan *bone scan* SPECT/CT di Instalasi Kedokteran Nuklir RSUP Dr. M. Djamil Padang selama periode Maret–Mei 2026. Pemeriksan *bone scan* dilakukan menggunakan modalitas SPECT/CT Siemens Symbia Intevo Bold dengan pemberian radiofarmaka ^{99m}Tc-MDP sebelum akuisisi SPECT/CT. Data penelitian merupakan pasien yang menjalani pemeriksaan *bone scan* dengan cakupan area pemindaian kepala hingga pertengahan paha. Pada CT *scan* digunakan tegangan tabung tetap sebesar 130 kVp, sedangkan arus tabung disesuaikan secara otomatis menggunakan sistem AEC. Kriteria inklusi meliputi pasien berusia ≥15 tahun yang menjalani pemeriksaan *bone scan* dengan SPECT/CT selama periode penelitian, dengan cakupan pemindaian dari kepala-pertenngahan paha, serta memiliki data demografi dan data dosis radiasi yang lengkap. Data demografi meliputi usia, jenis kelamin, berat badan, dan tinggi badan. Data dosis radiasi meliputi aktivitas radiofarmaka yang diberikan, CTDIvol, dan DLP. Kriteria ekslusi meliputi pasien yang menjalani pemeriksaan selain cakupan pemindaian area kepala-pertengahan paha serta pasien dengan data demografi atau data dosis radiasi yang tidak lengkap. Penelitian ini telah memperoleh persetujuan etik dari komite etik penelitian kesehatan RSUP Dr. M. Djamil Padang dengan nomor DP.04.03/D/XVI.10.1/152/2026.

2.1 Estimasi Dosis Efektif Radiofarmaka

Estimasi dosis efektif dari radiofarmaka dihitung berdasarkan aktivitas ^{99m}Tc-MDP yang diberikan kepada pasien dengan menggunakan persamaan (1) (Ben-Rejeb & Ben-Sellem, 2022; Salvatori et al., 2019):

$$ED_{RF} = A \cdot k \tag{1}$$

dengan ED_{RF} adalah estimasi dosis efektif radiofarmaka (mSv), A adalah dosis radiofarmaka yang diberikan kepada pasien, dan k adalah koefisien dosis efektif (mSv/MBq). Koefisien dosis efektif yang digunakan adalah 0,0049 mSv/MBq untuk kelompok dewasa berdasarkan ICRP 128 (ICRP 128, 2015).

2.2 Estimasi Dosis Efektif CT *Scan*

Estimasi dosis efektif dari CT *scan* dihitung berdasarkan nilai *Dose Length Product* (DLP) dengan menggunakan persamaan (2) (Seeram, 2016):

$$ED_{CT} = DLP \cdot k \tag{2}$$

dengan ED_{CT} adalah estimasi dosis efektif dari CT *Scan* (mSv), DLP merupakan hasil perkalian antara *volume CT dose index* (CTDIvol) dan panjang area pemindaian (mGy.cm), dan k adalah koefisien konversi dosis efektif berdasarkan area anatomi yang dipindai (mSv/mGy.cm). Koefisien konversi untuk area pemindaian dari kepala sampai pertengahan paha menggunakan nilai 0,013 mSv/(mGy·cm) yang mengacu pada penelitian Inoue et al. (2022). Pemindaian dilakukan dari kepala hingga pertengahan paha menggunakan tiga posisi meja (*bed positions*). Rentang pemindaian tersebut diklasifikasikan sebagai pemindaian seluruh tubuh (*whole-body scan*), sesuai dengan definisi yang digunakan dalam penelitian sebelumnya (Alqahtani, 2024; Inoue et al., 2022; Löfgren et al., 2017; Sabri & Wong, 2019).

2.3 Estimasi Total Dosis Efektif dan Kontribusi Dosis

Total dosis efektif pada pemeriksaan SPECT/CT dihitung dengan menjumlahkan dosis efektif dari radiofarmaka dan CT *scan* menggunakan persamaan (3) (Ben-Rejeb & Ben-Sellem, 2022; Salvatori et al., 2019):

$$ED_{total} = ED_{RF} + ED_{CT} \quad (3)$$

Kontribusi masing-masing komponen dosis terhadap total dosis efektif dihitung dengan menggunakan persamaan (4) untuk kontribusi dosis radiofarma dan persamaan (5) untuk kontribusi CT scan (Ben-Rejeb & Ben-Sellem, 2022):

$$C_{RF} = \frac{ED_{RF}}{ED_{total}} \times 100 \quad (4)$$

$$C_{CT} = \frac{ED_{CT}}{ED_{total}} \times 100 \quad (5)$$

2.4 Analisis Statistik

Analisis statistik deskriptik dilakukan untuk menggambarkan karakteristik demografi pasien dan parameter dosis radiasi. Deskripsi statistik disajikan dalam bentuk nilai minimum, maksimum, rata-rata, dan standar deviasi. Analisis korelasi Pearson digunakan untuk mengevaluasi hubungan antara IMT dengan aktivitas radiofarmaka ^{99m}Tc-MDP yang diberikan, CTDIvol, dan DLP. Kekuatan dan arah hubungan dinilai berdasarkan koefisien korelasi Pearson (r), sedangkan signifikansi statistik ditentukan berdasarkan nilai p. Nilai $p < 0,05$ sebagai batas signifikansi statistik.

III. HASIL DAN DISKUSI

Sebanyak 44 pasien menjalani pemeriksaan *bone scan* SPECT/CT dengan area pemindaian kepala-pertengahan paha yang memenuhi kriteria inklusi. Berdasarkan karakteristik demografi, pasien terdiri atas 31 pasien laki-laki (70,45%) dan 13 pasien perempuan (29,55%). Rerata usia pasien yang menjalani pemeriksaan *bone scan* di RSUP Dr. M. Djamil Padang adalah (62,89 ± 12,73) tahun dengan rentang usia (35 – 84) tahun. Sementara itu, rerata IMT pasien adalah (22,45 ± 4,01) kg/m² dengan rentang IMT pasien (13,67 - 34,23) kg/m². Distribusi pasien pada penelitian ini didominasi oleh pasien laki-laki dan kelompok usia lanjut. Pada cakupan area pemindaian yang sama, variasi IMT menunjukkan adanya perbedaan karakteristik fisik pasien yang dapat memengaruhi AEC dalam menentukan arus tabung dan selanjutnya memengaruhi parameter dosis radiasi.

3.1 Estimasi Dosis Efektif Radiofarmaka

Dosis radiofarmaka dan estimasi dosis efektif radiofarmaka ^{99m}Tc-MDP untuk pemeriksaan *bone scan* berupa nilai minimal, maksimal, dan rata-rata dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Dosis radiofarmaka ^{99m}Tc-MDP dan Estimasi dosis efektif radiofarmaka

Parameter Statistik	Dosis Radiofarmaka (MBq)	Dosis Efektif Radiofarmaka (mSv)
Minimal	451,40	2,21
Maksimal	920,19	4,51
Rata-rata ± SD	707,83 ± 106,27	3,47 ± 0,52

Berdasarkan Tabel 1, aktivitas radiofarmaka ^{99m}Tc-MDP diberikan kepada pasien berada pada rentang (451,40 - 920,19) MBq, dengan rata-rata aktivitas sebesar (707,83 ± 106,27) MBq. Dari aktivitas tersebut, diperoleh estimasi dosis efektif yang berada pada rentang (2,21 - 4,51) mSv, dengan nilai rata-rata sebesar (3,47 ± 0,52) mSv. Variasi dosis efektif tersebut berkaitan dengan variasi aktivitas radiofarmaka yang diberikan karena estimasi dosis efekif dihitung berdasarkan aktivitas yang diberikan dan koefisien dosis efektif radiofarmaka. Hasil uji korelasi Pearson menunjukkan korelasi positif yang signifikan secara statistik antara IMT dan aktivitas ^{99m}Tc-MDP yang diberikan ($r = 0,462$; $p = 0,002$). Hasil tersebut menunjukkan bahwa IMT yang tinggi cenderung menerima aktivitas ^{99m}Tc-MDP yang lebih tinggi. Namun, kekuatan korelasi sedang ini kemungkinan dipengaruhi oleh faktor lain seperti ketepatan waktu kedatangan pasien terhadap jadwal injeksi radiofarmaka. Keterlambatan kedatangan

beberapa pasien dapat menyebabkan aktivitas radiofarmaka yang telah disiapkan mengalami peluruhan, sehingga aktivitas radiofarmaka pada saat pemberian dapat lebih rendah dari aktivitas yang direncanakan. Hubungan positif antar IMT dan aktivitas ^{99m}Tc-MDP yang diberikan menunjukkan bahwa karakteristik tubuh pasien telah dipertimbangkan dalam menentukan aktivitas radiofarmaka yang diberikan pada praktik klinis pemeriksaan *bone scan*.

3.2 Estimasi Dosis Efektif CT Scan

Nilai CTDIvol, DLP dan estimasi dosis efektif dari CT *scan* untuk pemeriksaan *bone scan* area pemindaian kepala-pertengahan paha dapat dilihat pada Tabel 2. Nilai rata-rata CTDIvol (5,59 ± 1,61) mGy, DLP (642,09 ± 188,54) mGy.cm, dengan estimasi dosis efektif CT sebesar (8,35 ± 2,48) mSv.

Tabel 2 DLP dan estimasi dosis efektif CT *Scan*

Parameter Statistik	CTDIvol (mGy)	DLP (mGy.cm)	Dosis Efektif CT *scan* (mSv)
Minimal	2,70	316	4,11
Maksimal	9,43	1.091	14,18
Rata-rata ± SD	5,59 ± 1,61	642,09 ± 188,54	8,35 ± 2,48

Terdapat variasi nilai CTDIvol, DLP, dan estimasi dosis efektif antar pasien. Variasi CTDIvol menunjukkan adanya perbedaan keluaran radiasi CT *scan* antar pasien. Pada pemeriksaan dengan sistem AEC, arus tabung dapat disesuaikan berdasarkan karakteristik atenuasi pasien untuk menghasilkan jumlah foton sinar-X yang memadai dalam memperoleh kualitas citra yang diperlukan (Sulayman et al., 2025). Perbedaan karakteristik tubuh pasien dapat menyebabkan perbedaan penyesuaian arus tabung-waktu (mAs) dan yang dapat menghasilkan variasi nilai CTDIvol. Pasien dengan ukuran tubuh yang lebih besar umumnya memiliki ketebalan jaringan yang lebih tebal sehingga memerlukan peningkatan arus tabung untuk mempertahankan kualitas citra, sehingga menghasilkan nilai CTDIvol yang lebih tinggi (Inoue et al., 2022). Hasil uji korelasi Pearson menunjukkan bahwa IMT memiliki hubungan positif kuat dan signifikan dengan CTDIvol ($r = 0,664$; $p < 0,001$). Hasil uji tersebut menunjukkan bahwa pasien dengan IMT yang lebih tinggi cenderung memiliki CTDIvol yang lebih tinggi.

Variasi nilai DLP dapat dipengaruhi oleh variasi nilai CTDIvol maupun panjang area pemindaian (*scan length*). Hasil uji korelasi Pearson menunjukkan adanya hubungan positif kuat dan signifikan antara IMT dan DLP ($r = 0,652$; $p < 0,001$). Hasil tersebut menunjukkan bahwa adanya peningkatan DLP pada pasien dengan IMT yang lebih tinggi. DLP merupakan hasil perkalian antara CTDIvol dengan panjang pemindaian (Seeram, 2016). Dengan demikian, pasien dengan CTDIvol lebih tinggi atau area pemindaian yang lebih panjang dapat menghasilkan nilai DLP yang lebih tinggi. DLP digunakan sebagai perhitungan estimasi dosis efektif CT *scan*. Hasil tersebut menunjukkan bahwa variasi keluaran radiasi CT *scan* dan panjang pemindaian berkontribusi terhadap variasi DLP yang kemudian juga berpengaruh dalam variasi estimasi dosis efektif pada pemeriksaan CT *scan*. Dengan demikian, penggunaan CTDIvol dan DLP bersama estimasi dosis efektif dapat memberikan gambaran mengenai variasi paparan radiasi CT *scan* pada pemeriksaan *bone scan* dengan SPECT/CT.

3.3 Estimasi Total Dosis Efektif SPECT/CT dan Kontribusi

Estimasi total dosis efektif pasien pada pemeriksaan *bone scan* dengan SPECT/CT merupakan akumulasi dari dosis radiofarmaka ^{99m}Tc-MDP dan dari CT *scan*. Berdasarkan Tabel 3, total estimasi dosis efektif berada pada rentang (6,66–17,74) mSv dengan rata-rata (11,82 ± 2,74 mSv). Estimasi dosis efektif radiofarmaka berada pada rentang (2,21–4,51) mSv dengan rata-rata (3,47 ± 0,52) mSv, sedangkan CT *scan* berada pada rentang (4,11–14,18) mSv dengan rata-rata (8,35 ± 2,48) mSv.

Tabel 3 Estimasi dosis efektif radiofarmaka, CT *scan*, total dosis efektif, dan persentasi kontribusi

Parameter Statistik	Dosis efektif radiofarmaka (mSv)	Dosis efektif CT s*can* (mSv)	Total dosis efektif (mSv)	Persentase radiofarmaka (%)	Persentase dosis CT (%)
Minimal	2,21	4,11	6,66	20,04	58,01
Maksimal	4,51	14,18	17,74	41,99	79,96
Rata-rata ± SD	3,47 ± 0,52	8,35 ± 2,48	11,82 ± 2,74	30,28	69,72

Kontribusi CT *scan* terhadap total estimasi dosis efektif berada pada rentang (58,01–79,96) % dengan rata-rata 69,72%, sedangkan kontribusi radiofarmaka berada pada rentang (20,04–41,99) % dengan rata-rata 30,28%. Hasil ini menunjukkan bahwa CT *scan* merupakan kontributor dominan terhadap total estimasi dosis efektif pada protokol *bone scan* dengan SPECT/CT yang digunakan dalam penelitian ini. Dominannya kontribusi CT *scan* dapat berkaitan dengan cakupan pemindaian dari kepala hingga pertengahan paha serta variasi parameter eksposi CT *scan*. Cakupan pemindaian yang relatif panjang berkontribusi terhadap nilai DLP, sedangkan variasi CTDIvol yang dipengaruhi oleh penyesuaian parameter eksposi menggunakan sistem AEC juga dapat menyebabkan variasi DLP dan estimasi dosis efektif CT. Pemahaman terhadap kontribusi dosis efektif dari radiofarmaka dan CT *scan* terhadap total dosis efektif merupakan hal penting dasar untuk pengembangan strategi optimasi paparan radiasi lebih lanjut (Aye, 2024). Temuan ini dapat menjadi data dasar untuk evaluasi lebih lanjut terhadap upaya optimasi dosis CT dengan tetap mempertahankan kualitas citra yang memadai secara diagnostik sesuai prinsip *As Low As Reasonably Achievable* (ALARA).

Perbandingan dosis efektif pemeriksaan *bone scan* dengan SPECT/CT dengan beberapa penelitian sebelumnya dapat dilihat pada Tabel 4. Hasil penelitian ini menunjukkan estimasi total dosis efektif sebesar 11,82 mSv, dengan kontribusi dosis radiofarmaka sebesar 3,47 mSv dan dosis CT *scan* sebesar 8,35 mSv. Nilai estimasi total tersebut lebih tinggi dibandingkan penelitian sebelumnya, yaitu Aye (2024) di Thailand dan Myanmar sebesar 6,80 mSv dan 5,70 mSv, Alrehily & Alshamrani (2023) di Madinah sebesar 7,68 mSv, serta Ben-Rejeb & Ben-Sellem (2022) di Tunisia sebesar 7,10 mSv. Estimasi dosis efektif dari radiofarmaka pada penelitian ini sebesar 3,47 mSv berada pada kisaran yang relatif sebanding dengan beberapa penelitian sebelumnya. Variasi nilai dosis efektif dari radiofarmaka antar penelitian dapat dipengaruhi oleh variasi aktivitas ^{99m}Tc-MDP yang diberikan, karakteristik pasien. Perbedaan penggunaan faktor konversi dosis yang berbeda seperti pada penelitian Ben-Rejeb & Ben-Sellem (2022) juga dapat memberikan variasi estimasi dosis efektif. Walaupun demikian, nilai yang diperoleh oleh Ben-Rejeb & Ben-Sellem (2022) tidak jauh berbeda dengan penelitian lainnya yang menggunakan ICRP 128. Perbedaan sistem teknologi SPECT/CT yang digunakan antar fasilitas turut mempengaruhi pemberian aktivitas radiofarmaka. Peralatan dengan sensivitas detektor yang tinggi memungkinkan penggunaan aktivitas radiofarmaka yang lebih rendah tanpa mengurangi kualitas citra yang dihasilkan (ICRP 135, 2017; Wyngaert et al., 2016).

Tabel 4 Perbandingan dosis efektif pemeriksaan *bone scan* dengan penelitian sejenis

Penelitian	Tempat penelitian	Dosis efektif radiofarmaka (mSv)	Dosis efektif CT scan (mSv)	Total dosis efektif (mSv)
Penelitian ini	Indonesia	3,47	8,35	11,82
Aye (2024)	Thailand	3,10	3,70	6,80
	Myanmar	3,20	2,50	5,70
Alrehily & Alshamrani (2023)	Madinah	2,78	4,90	7,68
Ben-Rejeb & Ben-Sellem (2022)	Tunisia	3,80	3,30	7,10

Nilai estimasi dosis efektif CT *scan* pada penelitian ini lebih tinggi dibandingkan dengan beberapa penelitian sebelumnya. Perbedaan tersebut dapat berkaitan dengan cakupan area anatomi yang dipindai dan parameter akuisisi CT *scan* yang digunakan pada masing-masing protokol. Pada penelitian ini, pemindaian dilakukan dari kepala hingga pertengahan paha sehingga mencakup area anatomi yang relatif panjang. Cakupan anatomi yang lebih luas dapat berkontribusi terhadap peningkatan nilai DLP. Dalam praktik klinis, cakupan area pemindaian skeletal yang lebih luas dapat dipilih ketika pemeriksaan diperlukan untuk mengevaluasi dugaan metastatis tulang pada wilayah anatomi yang lebih luas (Alrehily & Alshamrani, 2023). Penelitian Ben-Rejeb & Ben-Sellem (2022) cakupan area pemidaian meliputi pada thorax dan abdomen-pelvis, sedangkan penelitian lain tidak menyebutkan cakupan anatomi area pemindaian. Oleh karena itu, perbedaan nilai dosis CT *scan* antar penelitian perlu diinterpretasikan dengan mempertimbangkan perbedaan cakupan anatomi, parameter akuisisi CT *scan*, karakteristik pasien, serta metode konversi DLP menjadi estimasi dosis efektif. Hasil ini dapat menjadi gambaran bagi kedokteran nuklir RSUP Dr. M Djamil Padang bahwa dosis efektif yang berasal dari CT scan masih memiliki peluang untuk dilakukan optimalisasi dengan tetap mempertahankan kualitas citra yang memadai. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa nilai estimasi dosis efektif tidak hanya ditentukan oleh jenis pemeriksaan, tetapi juga oleh protokol pemeriksaan yang diterapkan pada masing-masing fasilitas pelayanan kesehatan. Perbedaan juga dapat disebabkan oleh perbedaan teknologi *scanner* CT, indikasi pemeriksaan, dan praktik atau teknik yang digunakan oleh radiografer (Selvam et al., 2025).

IV. KESIMPULAN

Pada pemeriksaan *bone scan* dengan SPECT/CT di RSUP Dr. M. Djamil Padang, estimasi total dosis efektif rata-rata sebesar (11,82 ± 2,74) mSv. CT *scan* memberikan kontribusi dominan terhadap dosis total dengan rata-rata 69,72%, sedangkan radiofarmaka ^{99m}Tc-MDP memberikan kontribusi sebesar 30,28%. IMT menunjukkan hubungan positif dan signifikan dengan aktivitas ^{99m}Tc-MDP, CTDIvol, dan DLP, yang menunjukkan bahwa karakteristik pasien berkaitan dengan parameter dosis radiasi. Hasil penelitian ini menjukkan pentingnya evaluasi protokol pemeriksaan, khususnya pada CT scan, sebagai dasar optimasi paparan radiasi dengan tetap mendapatkan citra yang dibutuhkan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada bagian kedokteran nuklir di Instalasi Radiologi, Radioterapi, dan Kedokteran Nuklir di RSUP Dr. M. Djamil yang telah memfasilitasi penelitian ini.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan tidak terdapat konflik kepentingan.

PERNYATAAN PENDANAAN

Penelitian ini didanai oleh Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP), Kementerian Keuangan Republik Indonesia.

PERNYATAAN PENGGUNAAN AI GEERATIF DAN TEKNOLOGI BERBASIS AI

Selama proses penyusunan manuskrip ini, penulis menggunakan ChatGPT untuk penyuntingan bahasa. Penulis telah meninjau dan memverifikasi keluaran yang dihasilkan serta bertanggung jawab penuh atas isi dan integritas publikasi.

DAFTAR PUSTAKA

Alqahtani, M. M. (2024). Whole-Body SPECT/CT : Protocol Variation and Technical Consideration-A Narrative Review. *Diagnostics*, *14*, 1–16. https://doi.org/10.3390/diagnostics14161827

Alrehily, F., & Alshamrani, A. F. (2023). Estimation of radiation dose associated with bone SPECT/CT and establishing local diagnostic reference levels using size-specific dose estimate. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, *16*. https://doi.org/10.1016/j.jrras.2023.100527

Aye, Y. M. (2024). *Local diagnostic reference level at Nuclear Medicine Centers in Thailand and Myanmar* [Chulalongkorn University]. https://digital.car.chula.ac.th/chulaetd/74591

Bartel, T. B., Kuruva, M., Gnanasegaran, G., Beheshti, M., Cohen, E. J., Weissman, A. F., & Yarbrough, T. L. (2018). SNMMI Procedure Standard for Bone Scintigraphy 4.0. *Journal of Nuclear Medicine Technology*, *46*(4), 398–404.

Ben-Rejeb, N., & Ben-Sellem, D. (2022). Estimation of additional dosimetry from low-dose CT scan to 99mTc-HMDP SPECT/CT. *Journal of Medical Imaging and Radiation Sciences*, *53*(1), 87–92. https://doi.org/10.1016/j.jmir.2021.10.008

Bouchareb, Y., Alsaadi, A., Zabah, J., Jain, A., Al-jabri, A., Phiri, P., Shi, J. Q., Delanerolle, G., & Sirasanagandla, S. R. (2024). Technological Advances in SPECT and SPECT/CT Imaging. *diagnostics*, *14*. https://doi.org/10.3390/diagnostics14131431

Brindhaban, A. (2020). Effective Dose to Patients from SPECT and CT During Myocardial Perfusion Imaging. *J Nucl Med Technol*, *48*, 143–147. https://doi.org/10.2967/jnmt.119.233874

ICRP 128. (2015). *Radiation Dose to Patients from Radiopharmaceuticals: A Compendium of Current Information Related to Frequently Used Substances* (Vol. 44, Nomor 2). Sage.

ICRP 135. (2017). *Diagnostic Reference Levels in Medical Imaging* (Vol. 46, Nomor 1).

Inoue, Y., Nagahara, K., Inoki, Y., Hara, T., & Miyatake, H. (2018). Clinical evaluation of CT radiation dose in whole-body 18 F-FDG PET / CT in relation to scout imaging direction and arm position. *Annals of Nuclear Medicine*, *33*, 169–176. https://doi.org/10.1007/s12149-018-1318-0

Inoue, Y., Ohkubo, Y., Nagahara, K., Uehara, A., Takano, M., & Dlp, E. D. C. (2022). Conversion from dose length product to effective dose for the CT component of whole - body PET/CT. *Annals of Nuclear Medicine*, *36*(4), 411–419. https://doi.org/10.1007/s12149-022-01720-0

Löfgren, J., Mortensen, J., Rasmussen, S. H., Madsen, C., Loft, A., Hansen, A. E., Oturai, P., Jensen, K. E., Mørk, M. L., Reichkendler, M., Højgaard, L., & Fischer, B. M. (2017). A Prospective Study Comparing 99mTc-Hydroxyethylene- Diphosphonate Planar Bone Scintigraphy and Whole-Body SPECT/CT with 18F-Fluoride PET/CT and 18F-Fluoride PET/MRI for Diagnosing Bone Metastases. *THE JOURNAL OF NUCLEAR MEDICINE*, *58*(11), 1778–1785. https://doi.org/10.2967/jnumed.116.189183

Sabri, A. S. A., & Wong, J. H. D. (2019). Estimation of effective dose for whole body 18 F- FDG PET/CT examination. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*, *1248*. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1248/1/012006

Salvatori, M., Rizzo, A., Rovera, G., Indovina, L., & Schillaci, O. (2019). Radiation Dose in Nuclear Medicine : The Hybrid Imaging. *La radiologia medica*, *0123456789*. https://doi.org/10.1007/s11547-019-00989-y

Seeram, E. (2016). *Computed Tomography: Physical Principles, Clinical Applications, and Quality Control* (Keempat). Elsevier.

Selvam, H. S. S., Yusof, A. K. M., Nazri, M. A., Omar, N., Harizan, A. H. J., Mois, N., & Rahman, M. Z. A. (2025). Diagnostic reference level, achievable dose, and effective dose estimation in adult hybrid SPECT myocardial perfusion imaging in Institut Jantung Negara. *Scientific Reports*, *15*(1), 1–13. https://doi.org/10.1038/s41598-025-96838-2

Sulayman, M. K., U, F. K., Bashiru, L., Khalis, M., Abdul, K., M, N. A., Kamal, I., C, C. A., R, J. M., & Mazliana, A. K. (2025). Radiation Dose of Abdominal and Lung Computed Tomography Based on Body Mass Index as an Indicator. *Malays J Med Sci*, *32*(4), 156–169. https://doi.org/10.21315/mjms-04-2025-280

Tulik, M., Tulik, P., & Kowalska, T. (2020). On the optimization of bone SPECT / CT in terms of image quality and radiation dose. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, *21*(11), 237–246. https://doi.org/10.1002/acm2.13069

Vaz, S. C., Oliveira, F., & Herrmann, K. (2020). Nuclear medicine and molecular imaging advances in the 21st century. *British Journal of Radiology*, *93*(1110). https://doi.org/10. 1259/ bjr. 20200095

Wyngaert, T. Van Den, Strobel, K., Kampen, W. U., & Kuwert, T. (2016). The EANM practice guidelines for bone scintigraphy. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, 1723–1738. https://doi.org/10.1007/s00259-016-3415-4