Journal Nasional SAINS dan TEKNIK
Vol. 1, Issue 1, pp. 8–13 (2023)
doi: http:/doi.org/10.25124/jnst.v1i1.6726

RESEARCH ARTICLE

Watermarking Citra Medis Menggunakan Teknik Spread Spectrum Bit Jamak

Siti Aisyah Amini, Gelar Budiman* and Ledya Novamizanti

Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom, Bandung, 40257, Jawa Barat, Indonesia
*Corresponding author: gelarbudiman@telkomuniversity.ac.id
Received on 13 September 2023; accepted on 12 October 2023

Abstrak

Di era perkembangan teknologi yang semakin maju, banyak keuntungan dan kerugian yang bisa didapatkan. Pengunggahan dan distribusi informasi yang mudah mendukung aktivitas sehari-hari. Di sisi lain, muncul berbagai masalah karena banyak pengguna teknologi yang tidak mempertimbangkan hal seperti pemalsuan informasi atau dokumen. Data atau dokumen tersebut harus diberi tanda khusus yang dapat menunjukkan keasliannya. Digital watermarking merupakan salah satu solusi untuk mencegah hal-hal yang tidak diinginkan tersebut terjadi. Dengan digital watermarking, pemilik informasi atau dokumen dapat menyisipkan pesan khusus sebagai tanda keaslian informasi atau dokumen miliknya. Pada penelitian ini, proses digital *watermarking* diimplementasikan. *Watermark* ditambahkan ke sebuah citra medis. Sistem watermarking diterapkan dengan menggunakan teknik Multibit Spread *Spectrum*, dimana bit watermark disebar pada citra medis. Penyebaran bit *watermark* dapat dilakukan dengan menggunakan distribusi. Pada penelitian ini, distribusi *Uniform*, distribusi Gaussian, serta matriks Hadamard dibandingkan untuk menentukan distribusi mana yang dapat menghasilkan citra medis ter-watermark yang tahan terhadap serangan. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa sistem *watermarking* yang menggunakan distribusi Uniform dan distribusi Gaussian secara umum mampu menghasilkan citra ter-watermark yang tahan terhadap serangan dan kualitasnya teruji melalui parameter Peak Signal to Noise Ratio (PSNR) $\geq$ 30 dB, *Structural Similarity Index Measure* (SSIM) $\approx$ 1, *Bit Error Ratio* (BER) = 0 dan *Mean Opinion Square* (MOS) = 5.

Key words: *Digital Watermarking, Image Watermarking, Multibit Spread Spectrum*

Pendahuluan

Penyebaran sebuah citra kini menjadi kian mudah. Hal tersebut menjadi keuntungan sekaligus kerugian tersendiri. Mudahnya penyebaran sebuah citra membuat citra tersebut tidak luput dari risiko *copyright issue*. Pada medical image (citra medis), urgensi pemberian watermark adalah untuk memberikan pengamanan dan perlindungan atas dokumen pasien serta menghindari penyalahgunaan dokumen tersebut [1].

Digital watermarking merupakan sebuah teknologi yang memungkinkan penyematan data atau pesan ke dalam berbagai jenis data digital seperti teks, citra, audio, atau bahkan video. Penyematan data atau pesan tersebut ditujukan sebagai salah satu cara identifikasi pemilik sah dari sebuah data digital [2].

Melalui penelitian ini, pemberian *watermark* pada sebuah citra medis tanpa merusak kualitas dari citra medis itu sendiri diwujudkan dengan menggunakan teknik *Multibit Spread Spectrum*. Dalam teknik *Multibit Spread Spectrum*, PN code disebar ke spektrum sebuah host citra, di mana hal tersebut dapat memberikan ketahanan lebih terhadap serangan [3]. PN code atau kumpulan bit yang disebar ke spektrum sebuah host citra didapatkan secara acak menggunakan distribusi. Pada penelitian ini, distribusi *Uniform*, distribusi *Gaussian*, serta matriks Hadamard dibandingkan guna melihat distribusi mana yang paling baik dan mampu menghasilkan citra ter-*watermark* yang kokoh terhadap serangan.

Di samping mampu memberikan bukti kepemilikan yang sah, pemberian *watermarking* pada citra medis diharapkan tidak mengganggu keaslian dari citra medis tersebut, mengingat terdapat pesan penting yang terkandung dalam citra tersebut. Penelitian ini menganalisa ketahanan citra medis ter-watermark yang menggunakan distribusi Uniform, distribusi Gaussian, serta matriks Hadamard ketika diberi serangan serta kualitas citra medis setelah disisipkan *watermark* dalam PSNR, SSIM, BER, dan MOS.

© The Author 2023. Published by Telkom University.

Tinjauan Pustaka

Novamizanti dkk. [4] mengusulkan reversible watermarking yang robust menggunakan *Stationary Wavelet Transform* dan *Multibit Spread Spectrum* pada citra medis. *Watermarking* dilakukan dengan cara menyisipkan watermark ke dalam subband ke dalam citra medis. Watermark dengan basis kode PN *dimasukkan* ke citra medis dengan menggunakan teknik *Multibit Spread Spectrum*. Hasil dari proses watermarking menggunakan teknik ini adalah imperceptibility yang baik serta citra ter-*watermark* yang memiliki ketahanan terhadap serangan karena kode PN didistribusikan secara acak menggunakan distribusi Gaussian. Penggunaan distribusi Gaussian memberikan ketahanan citra ter-*watermark* yang baik karena Gaussian sulit untuk diserang [4].

Kumar dkk. [5] mengusulkan teknik *watermarking* yang *imperceptibel* berbasis wavelet pada citra medis. Penelitian ini menggunakan algoritma *Spread Spectrum* berbasis *Discrete Wavelet Transform* (DWT) untuk menyisipkan string *watermarks*, dimana *string watermarks* tersebut diubah ke dalam bentuk biner dengan format kode ASCII. Performa sistem watermarking pada penelitian ini dinilai berdasarkan PSNR, BER, dan *robustness*. BCH digunakan guna mengurangi jumlah *error* pada hasil *watermarking*. Kendati demikian, tetap ditemukan beberapa error, sehingga dari sini terbuka ide penilitan baru menggunakan alternatif lain seperti turbo codes untuk mengurangi jumlah error pada citra yang sudah dibubuhi watermark [5].

Yunawan dkk [6] mengusulkan compressive sensing pada teknik *watermarking* citra berbasis *Discrete Wavelet Transform* dan *Spread Spectrum*". Metode *Compressive Sampling* atau *Compressed Sensing* (CS), *Discrete Wavelet Transform* (DWT), serta *Spread Spectrum*. *Compressed Sensing* digunakan dengan LS *Regularized* L1 sebagai metode rekonstruksi untuk *watermarking* pada citra. Penelitian ini menghasilkan nilai PSNR 52,35 dB, nilai MSE 0,38 untuk file host D dengan serangan kompresi JPEG, nilai SSIM 0,67722 untuk file host C dengan serangan kompresi JPEG, nilai BER 0.26377 untuk host file E dengan serangan kompresi JPEG [7].

Metodologi Penelitian

Multibit Spread Spectrum

Pada Multibit Spread Spectrum, PN code disisipkan ke dalam satu spektrum sebuah citra host. PN code didapatkan melalui proses distribusi acak menggunakan distribusi Uniform, distribusi Gaussian, ataupun matriks Hadamard. Distribusi Uniform merupakan distribusi yang paling sederhana. Disebut Uniform atau seragam karena setiap variable randomnya memiliki nilai peluang yang sama. Adapun rumus distribusi Uniform adalah sebagai berikut:

$$f(x) = b - a, \text{untuk } a \leq x \leq b \tag{1}$$

$$f(x) = 0, \text{untuk } x < a \text{ atau } x > b \tag{2}$$

Distribusi Gaussian, disebut juga distribusi Normal. Menurut penelitian [16], distribusi Gaussian diketahui dapat menghasilkan citra ter-watermark yang memiliki ketahanan lebih terhadap serangan dibandingkan dengan distribusi Uniform. Hal tersebut disebabkan salah satunya karena range kode acak yang dihasilkan melalui distribusi Gaussian lebih banyak. Semakin banyak kode yang disebar ke spektrum citra host, maka semakin kokoh pula citra terwatermark terhadap serangan. Adapun rumus dari distribusi Gaussian adalah sebagai berikut:

$$p(w) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{w^2}{2\sigma^2}\right) \tag{3}$$

Selain diperoleh melalui distribusi Uniform dan distribusi Gaussian, PN code yang akan disisipkan ke spektrum citra host pada penelitian ini juga diperoleh menggunakan matriks Hadamard. Matriks Hadamard memiliki panjang kolom serta baris matriks yang sama. Adapun matriks Hadamard adalah sebagai berikut:

$$H_r = \begin{bmatrix} H_{r/2} & H_{r/2} \\ H_{r/2} & -H_{r/2} \end{bmatrix} \tag{4}$$

Embedding

Dalam proses watermarking, terdapat tahap penyisipan informasi ke dalam seluruh piksel citra host, yang disebut dengan istilah *embedding* [8]. Citra host yang sudah disisipi watermark akan menghasilkan citra yang sudah ter-watermark. Proses penyisipan melibatkan langkah-langkah berikut:

1. Baca citra host X_n berukuran $N \times M$ piksel.
2. Tentukan jumlah bit watermark dalam setiap segmen atau blok (L_{ws}).
3. Tentukan panjang PN code (L_k) dengan ketentuan nilai minimal $2L_{ws}$, nilai L_{ws} 2/4/6/8, dan seterusnya. Panjang PN code menentukan banyaknya bit yang digunakan dalam sebuah watermark. Semakin panjang PN code, semakin banyak bit yang dapat disisipkan ke dalam sebuah citra, sehingga semakin kuat watermark yang dihasilkan.
4. Petakan PN code melalui teknik Multibit Spread Spectrum dan menggunakan distribusi Uniform/Gaussian/matriks Hadamard hingga menghasilkan W_c.
5. Lanjutkan proses penyisipan sampai sistem watermarking menghasilkan citra ter-watermark $X_w = X_n + \alpha \cdot W_c$.

Extraction

Melalui proses ekstraksi, citra yang sudah ter-watermark dapat diambil atau dilihat kembali watermark-nya. Proses ekstraksi melibatkan langkah-langkah berikut:

1. Deteksi citra host X_n dan citra ter-watermark X_w.
2. Lakukan *substract* dari citra ter-watermark pada citra host.
3. Rekonstruksi segmen atau blok citra host dan citra watermark.
4. Lanjutkan proses ekstraksi sampai mendapatkan kembali watermark atau W.

Extraction

Melalui proses ekstraksi, citra yang sudah ter-watermark dapat diambil atau dilihat kembali watermark-nya. Hal ini penting guna membuktikan bahwa citra tersebut telah disisipi watermark. Proses ekstraksi melibatkan langkah-langkah berikut:

1. Deteksi citra host X_n dan citra ter-watermark X_w.
2. Lakukan *substract* dari citra ter-watermark pada citra host.
3. Rekonstruksi segmen atau blok citra host dan citra watermark.
4. Lanjutkan proses ekstraksi sampai mendapatkan kembali watermark atau W_c.

Attacks

Menurut [1], terdapat 2 klasifikasi serangan terhadap watermarking. Klasifikasi pertama meliputi Signal Processing Attacks serta Geometric Distortion, sedangkan klasifikasi kedua meliputi Simple Attacks, Detection-Disabling Attacks, Ambiguity Attacks, serta Removal Attacks. Pada Tugas Akhir ini, serangan yang digunakan adalah dari jenis Signal Processing Attacks, yaitu serangan Salt and Pepper Noise, Speckle Noise, dan serangan kompresi (jpeg), serta dari jenis Geometric Distortion, yaitu serangan rotasi, serangan rescaling atau resize, dan serangan cropping.

1. ***Salt and Pepper Noise***: Salt and Pepper Noise merupakan salah satu jenis noise yang wujudnya mirip dengan garam (salt) dan merica (pepper) pada sebuah citra. Parameter Salt and Pepper Noise adalah 0.001, 0.01, dan seterusnya.
2. ***Speckle Noise***: Serangan Speckle Noise merupakan noise berwujud bintik-bintik hitam. Parameter untuk serangan Speckle Noise adalah 0.001, 0.01, dan seterusnya.
3. *Kompresi (jpeg)*: Kompresi citra merupakan solusi untuk mengurangi ukuran file citra yang terlalu besar, namun dapat menyebabkan penurunan kualitas citra. Parameter serangan kompresi (jpeg) adalah 50, 70, 90, dan seterusnya.
4. **Rotasi**: Serangan Rotasi merupakan serangan di mana citra yang sudah ter-watermark dirotasi dengan sudut putar tertentu seperti 90°, 270°, dan seterusnya.
5. ***Rescaling* atau *Resize***: *Resize* ditujukan untuk mengubah ukuran sebuah citra dari yang besar menjadi lebih kecil. Faktor resize dapat berupa 1/4, 1/2, 3/2, hingga 2.
6. ***Cropping***: Serangan Cropping merupakan serangan di mana area tertentu pada citra yang sudah ter-watermark di-crop atau dipotong, dapat mengakibatkan hilangnya watermark. Parameter serangan ini berupa frame yang dapat bernilai 1, 2, 3, dan seterusnya.

Parameter Kinerja Image Watermarking

Kinerja sistem watermarking citra dapat dinilai secara objektif ataupun subjektif. Di antaranya adalah dengan parameter sebagai berikut.

***Peak Signal to Noise Ratio* (PSNR)**

PSNR merupakan rasio antara nilai maksimum dari sebuah sinyal dan kekuatan noise. Menurut [1], nilai PSNR minimum adalah setidaknya 30 dB. PSNR dirumuskan sebagai berikut:

$$PSNR = 10 \cdot \log_{10} \frac{MAX^2}{MSE} \tag{5}$$

di mana MAX merupakan nilai maksimum yang dapat diwakili oleh piksel pada citra (misalkan, 255 untuk citra 8-bit grayscale atau RGB) dengan $MSE = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} (X_w(i,j) - \hat{X}_w(i,j))^2$, dimana X_w adalah citra ter-watermark asli, $\hat{X}_w$ adalah citra ter-watermark ekstraksi, M adalah jumlah baris citra, dan N adalah jumlah kolom citra.

***Structural Similarity Index Measure* (SSIM)**

SSIM merupakan parameter untuk mengukur indeks kesamaan struktural antar citra. SSIM memiliki nilai kisaran dari -1 hingga 1 di mana nilai 1 berarti bahwa citra asli dan citra ter-watermark sangat serupa. SSIM dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$SSIM = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)} \tag{6}$$

di mana C_1 dan C_2 adalah konstanta $<< 1$, μ_x adalah nilai rata-rata citra X, μ_y adalah nilai rata-rata citra Y. Nilai μ diperoleh melalui rumus $\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} x_i$ dengan N adalah jumlah nilai piksel. Sedangkan, σ_{xy} adalah kovariansi citra X terhadap Y, σ_x^2 adalah variansi citra X, dan σ_y^2 adalah variansi citra Y. Nilai σ diperoleh melalui rumus:

$$\sigma = \left(\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N} (x_i - \mu_x)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \tag{7}$$

Bit Error Rate (BER)

Semakin kecil nilai BER maka semakin bagus kualitas watermarking. Apabila nilai BER mencapai 0, itu artinya tidak terdapat error pada citra hasil watermarking. BER dirumuskan sebagai berikut:

$$BER = \frac{Totalbiterror}{Totalbit} \times 100\% \tag{8}$$

Table 1. Skala Rating MOS

Rating	Label
5	Excellent
4	Good
3	Fair
2	Poor
1	Bad

***Mean Opinion Score* (MOS)**

MOS merupakan penilaian terhadap kinerja watermarking yang bersifat subjektif. Disebut demikian karena hasil dari watermarking citra akan dinilai berdasarkan bagaimana hal tersebut nampak pada indera pengelihatan pada tabel 1.

Semakin citra tersebut terlihat sama dengan aslinya, maka nilainya semakin tinggi. Kemudian, rata-rata dari penilaian tersebut dihitung dengan rumus MOS dimana R adalah Rating dan N adalah jumlah subjek., yaitu sebagai berikut:

$$MOS = \frac{\sum_{n=1}^{N} R_n}{N} \tag{9}$$

Hasil dan Pembahasan

Parameter Terbaik Sistem Watermarking

Berdasarkan pengujian yang dilakukan, didapatkan bahwa parameter terbaik pada distribusi Uniform adalah ketika nilai $\alpha = 8$, $Lk = 2500$, serta $Lws = 2$. Pada tabel 2 distribusi Gaussian, parameter optimal adalah ketika nilai $\alpha = 8$, $Lk = 2500$, serta $Lws = 2$, dan pada matriks Hadamard parameter optimal adalah ketika nilai $\alpha = 8$, $Lk = 225$, serta $Lws = 12$.

Uji Serangan pada Sistem Watermarking

Hasil dari pengujian seperti pada tabel 3 dan tabel 4 adalah sistem watermarking yang menggunakan distribusi Uniform cenderung tahan terhadap serangan rotasi, serangan crop dengan parameter [1][1], serangan resize dengan parameter [2], serangan salt and pepper dengan parameter [0.01], serangan speckle dengan parameter [0.01], serta serangan kompresi (jpeg) dengan parameter [90].

Hal yang sama ditunjukkan pada hasil uji serangan pada sistem watermarking yang menggunakan distribusi Gaussian. Distribusi Gaussian cenderung mampu menghasilkan sistem watermarking yang tahan terhadap serangan rotasi, serangan cropping dengan parameter [1], serangan resize dengan parameter [2], serangan salt and pepper noise dengan parameter [0.01], serangan speckle noise dengan parameter [0.01], serta serangan jpeg dengan parameter [90].

Pada beberapa pengujian seperti serangan cropping dengan parameter [2], serangan resize dengan parameter [3/2], serangan salt and pepper noise dengan parameter [0.1], serangan speckle noise dengan parameter [0.1], serta serangan kompresi (jpeg) dengan parameter [70], citra ter-watermark yang dihasilkan baik dengan sistem watermarking yang menggunakan distribusi Uniform ataupun distribusi Gaussian mengalami error, yang dapat diartikan bahwa dengan parameter yang disebutkan, sistem watermarking sudah tidak lagi tahan terhadap serangan.

Berbeda dengan kedua distribusi tersebut, matriks Hadamard tidak melalui proses pengujian serangan karena sistem watermarking yang

Table 2. Parameter Terbaik Distribusi Uniform dan Gaussian pada Citra Berwatermark

Host	Uniform				Gaussian			
	PSNR (dB)	SSIM	BER	MOS Citra berwatermark	PSNR (dB)	SSIM	BER	MOS Citra berwatermark
(a)	30.407	0.996	0	5	30.412	0.996	0	5
(b)	30.066	0.981	0	5	30.066	0.981	0	5
(c)	30.772	0.995	0	5	30.775	0.995	0	5
(d)	31.221	0.995	0	5	31.225	0.995	0	5
(e)	30.692	0.996	0	5	30.702	0.996	0	5

Table 3. Uji Serangan Distribusi Uniform

Citra Host				
Serangan	Citra Diserang	Watermark Ekstraksi	PSNR	BER
Rotasi [90]			30.417	0
Rotasi [180]			30.416	0
Cropping [1]			30.418	0
Cropping [2]			30.427	0.800
Resize [3/2]			30.409	0.004
Resize [2]			30.413	0
Salt and Pepper [0.01]			30.410	0
Salt and Pepper [0.1]			30.422	0.123
Speckle [0.01]			30.416	0
Speckle [0.1]			30.411	0.124
JPEG [70]			30.407	0.065
JPEG [90]			30.413	0

menggunakan matriks Hadamard bersifat anomali. Hasil uji pada 5 citra host dengan menggunakan matriks Hadamard pun tidak dapat mencapai nilai BER = 0, meskipun parameter yang digunakan adalah parameter optimal, dan sistem watermarking tersebut mampu menghasilkan MOS ter-watermark serta MOS watermark (serangan jpeg) dengan nilai masing-masing 5 dan 4.

Perbandingan dengan Penelitian Terkait

Perbandingan pada Tabel 5 menunjukkan bahwa metode yang diusulkan memiliki PSNR yang lebih kecil. Namun, nilai SSIM yang didapat dari metode yang diusulkan lebih besar. Selain itu, metode yang diusulkan mampu menghasilkan BER $= 0$.

Table 4. Uji Serangan Distribusi Uniform

Citra Host				
Serangan	**Citra Diserang**	**Watermark Ekstraksi**	**PSNR**	**BER**
Rotasi [90]			30.411	0
Rotasi [180]			30.412	0
Cropping [1]			30.413	0
Cropping [2]			30.414	0.201
Resize [3/2]			30.416	0
Resize [2]			30.418	0
Salt and Pepper [0.01]			30.414	0
Salt and Pepper [0.1]			30.424	0.277
Speckle [0.01]			30.410	0
Speckle [0.1]			30.419	0.220
JPEG [70]			30.421	0.374
JPEG [90]			30.414	0

Table 5. Uji Serangan Distribusi Gaussian

Ref	**PSNR (dB)**	**SSIM**	**BER**					
			RT	**CR**	**RS**	**SNP**	**SN**	**JPEG**
[4]	41.000	NA	NA	NA	0.059	0.002	0	0
[5]	52.716	NA	NA	NA	0.510	8.163	NA	0
[9]	52.350	0.677	NA	NA	0.359	0.350	NA	0.316
Uniform	**30.416**	**0.996**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**
Gaussian	**30.414**	**0.996**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**

Kesimpulan

Melalui penelitian ini, didapatkan bahwa dari segi ketahanan, dibandingkan sistem *watermarking* yang menggunakan matriks Hadamard, sistem watermarking yang menggunakan distribusi *Uniform* ataupun distribusi Gaussian dapat bertahan atas beberapa serangan, yaitu serangan rotasi, serangan cropping dengan parameter [1], serangan *resize* dengan parameter [2], serangan *salt and pepper noise* dengan parameter [0.01], serangan *speckle noise* dengan parameter [0.01], serta serangan kompresi (jpeg) dengan parameter [90]. Dari segi kualitas, sistem watermarking yang menggunakan distribusi *Uniform* serta distribusi Gaussian mampu menghasilkan citra terwatermark yang mencapai target kriteria seperti PSNR $\geq$ 30 dB, SSIM $\approx$ 1, BER = 0, serta MOS ter-*watermark* maupun MOS *watermark* = 5 dibandingkan dengan sistem watermarking yang menggunakan matriks Hadamard. Hal tersebut disebabkan salah satunya karena distribusi

Uniform dan distribusi Gaussian memiliki range PN code yang lebih besar serta fleksibel jika dibandingkan dengan matriks Hadamard yang harus memiliki nilai panjang serta lebar matriks yang sama.

Daftar Pustaka

1. Mousavi SM, Naghsh A, Abu-Bakar SAR. Watermarking Techniques used in Medical Images: a Survey. J Digit Imaging. 2014;27(6):714–729. Doi: 10.1007/s10278-014-9700-5.
2. Eze PU, Udaya P, Evans RJ. Medical Image Watermark and Tamper Detection Using Constant Correlation Spread Spectrum Watermarking. 2018. Doi: 10.1999/1307-6892/10008924.
3. Harahap H, Budiman G, Novamizanti L. Implementasi Teknik Watermarking menggunakan FFT dan Spread Spectrum Watermark pada Data Audio Digital. ELKOMIKA J Tek Energi Elektr Tek Telekomun Tek Elektron. 2018;4(1):98. Doi: 10.26760/elkomika.v4i1.98.
4. Novamizanti L, Suksmono AB, Danudirdjo D, Budiman G. Robust Reversible Watermarking using Stationary Wavelet Transform and Multibit Spread Spectrum in Medical Images. Int J Intell Eng Syst. 2022;15(3):343–354. Doi: 10.22266/ijies2022.0630.29.
5. Kumar B, Kumar SB, Chauhan DS. Wavelet based imperceptible medical image watermarking using spread-spectrum. 2015. Doi: 10.1109/TSP.2015.7296412.
6. Yunawan Y, Safitri I, Novamizanti L. Compressive Sensing for Image Watermarking Discrete Wavelet Transform and Spread Spectrum. 2018:99–103. Doi: 10.1109/ICCEREC.2018.8712090.
7. Munir. Image Watermarking untuk Memproteksi Citra Digital dan Aplikasinya pada Citra Medis. Inst. Teknol. Bandung; 2005.
8. Munir R. IF4020 Kriptografi: Digital Watermarking; 2016.
9. dr S Agustin. Mengenal Cara Kerja Pemeriksaan X-Ray dan Efek Sampingnya; 2022. Available from: https://www.alodokter.com/mengetahui-kondisi-tubuh-dengan-bantuan-x-ray.
10. Häggström M. Posteroanterior Chest Radiograph; 2017. Available from: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Chest_Xray_PA_3-8-2010.png.
11. Imaging O. XRAY Imaging; 2016. Available from: https://www.oghimaging.com/xray-imaging.
12. Prepodiatrystudy. Xray Readings;. Available from: https://prepodiatrystudy.com/interviews/xray-readings/.
13. Centeno MC. Hip Arthritis X-Ray Not Associated with Pain?; 2017. Available from: https://regenexx.com/blog/hip-arthritis-x-ray-not-associated-pain/.
14. Novamizanti L, Suksmono A, Danudirdjo D, Budiman G. Robust and Imperceptible Watermarking on Medical Images using Coefficient Pair Modification. IIUM Engineering Journal. 2023;24(1):88–105.
15. Budiman G, Novamizanti L. White Space Steganography On Text By Using LZW-Huffman Double Compression. International Journal of Computer Networks & Communications. 2015;7(2):136A.
16. Sugiharto A, Wibawa HA. Ketahanan Watermarking Terhadap Serangan Kompresi JPEG. 2016;15(2):1–23. Available from: http://eprints.undip.ac.id/2323/.