

# OPTIMASI NILAI *IMPERCEPTIBILITY* PADA *WATERMARKING* CITRA WARNA BERBASIS DCT-DWT

Anna Baita<sup>\*1)</sup>, Rohmatullah Batik Firmansyah<sup>2)</sup>, Sharazita Dyah Anggita<sup>3)</sup>

1. Informatika, Fakultas Ilmu Komputer, Universitas Amikom Yogyakarta, Indonesia
2. Teknologi Informasi, Fakultas Ilmu Komputer, Universitas Amikom Yogyakarta, Indonesia
3. Sistem Informasi, Fakultas Ilmu Komputer, Universitas Amikom Yogyakarta, Indonesia

## Article Info

**Kata Kunci:** DCT; DWT; Imperceptibility; Watermarking

## Article history:

Received 11 October 2024  
Revised 16 November 2024  
Accepted 20 December 2024  
Available online 1 March 2025

## DOI :

<https://doi.org/10.29100/jipi.v10i1.6878>

\* Corresponding author.

Corresponding Author

E-mail address:

[anna@amikom.ac.id](mailto:anna@amikom.ac.id)

## ABSTRAK

Teknik penyisipan *watermark* telah banyak digunakan untuk melindungi hak cipta, proses autentikasi maupun *tamper detection*. Terdapat dua jenis *watermark* berdasarkan tingkat persepsi visualnya, yakni *visible watermark* dan *invisible watermark*. Tantangan terbesar dari *invisible watermark* adalah mempertahankan tingkat *imperceptibility* namun tetap menjamin keamanan *watermark* dari berbagai serangan. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menghasilkan skema *watermarking* citra warna yang memiliki *imperceptibility* yang tinggi pada basis DCT DWT. Metode DWT dikenal memiliki performa yang baik dalam *invisible watermark*. Untuk itu *Chanel blue* dipilih sebagai area penyisipan *watermark* karena mata manusia kurang sensitive terhadap warna ini. Untuk meningkatkan keamanan, skema yang diusulkan menggunakan transformasi Arnold untuk mengacak watermark. Skema *watermark* yang diusulkan dapat menghasilkan *imperceptibility* yang cukup tinggi, yakni dengan nilai PSNR sebesar 43.786 dB. Nilai NC yang dihasilkan dalam skema ini sebesar 0.985 menunjukkan bahwa skema watermark mampu bertahan dari beberapa serangan. Akan tetapi skema ini kurang tahan terhadap serangan *salt & pepper* serta *cropping*.

## ABSTRACT

*Watermark insertion techniques have been widely used to protect copyright, facilitate authentication processes, and detect tampering. There are two types of watermarks based on the level of visual perception: visible watermarks and invisible watermarks. The biggest challenge with invisible watermarks is maintaining a high level of imperceptibility while ensuring the watermark's security against various attacks. The aim of this research is to develop a colour image watermarking scheme that achieves high imperceptibility based on DCT and DWT methods. The DWT method is known for its strong performance in creating invisible watermarks. For this reason, Chanel blue was chosen as the watermark insertion area, as the human eye is less sensitive to this colour. To enhance security, the proposed scheme uses Arnold transformation to randomize the watermarks. The scheme can achieve a high level of imperceptibility, with a PSNR value of 43.786 dB. The NC value produced by this scheme is 0.985, indicating that the watermarking technique can withstand several attacks. However, this scheme is less resistant to salt-and-pepper attacks and cropping.*

## I. PENDAHULUAN

**P**ERKEMBANGAN teknologi digital dan internet yang begitu pesat di beberapa tahun terakhir ini, turut meningkatkan jumlah ketersediaan konten yang berbasis digital multimedia. Salah satu keuntungan dari data digital adalah kemudahan dalam memproduksi ulang (menggandakan) konten digital dengan kualitas data yang serupa dengan aslinya. Akan tetapi, kemudahan tersebut juga membawa dampak negatif, yakni mudahnya memodifikasi konten digital. Sehingga terkadang sulit untuk mengenali konten asli dengan konten yang sudah dimodifikasi. Hal ini mendorong adanya kebutuhan terhadap otentikasi terhadap data digital. Watermarking merupakan salah satu teknik yang dapat menyelesaikan masalah otentikasi data.

Beberapa metode yang telah digunakan dalam teknik watermarking. Metode DWT (*Discrete Wavelete Transform*) merupakan teknik untuk menghasilkan *invisible watermark* [1]. Isu utama dalam *invisible watermark* adalah, mempertahankan *imperceptibility* dengan tetap memastikan keamanan *watermark* terhadap berbagai serangan [2]. *Watermark* yang tahan terhadap serangan biasanya digunakan untuk melindungi hak cipta, sedangkan *fragile watermark* biasanya digunakan untuk proses autentikasi maupun untuk *tamper detection*.

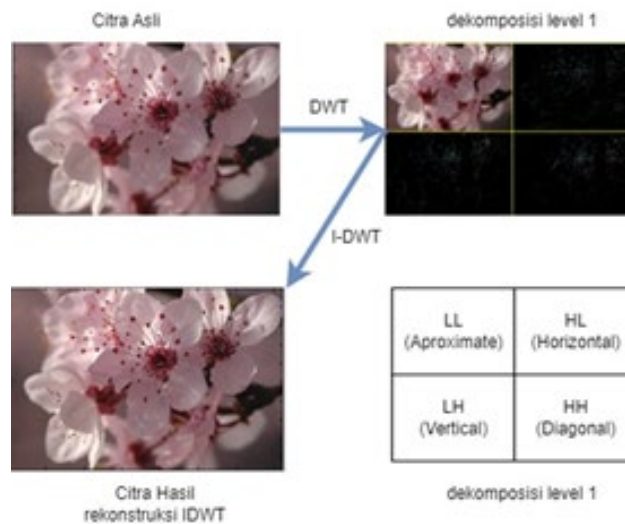
Penggunaan level dekomposisi metode DWT pada saat penyematan *watermark* juga mempengaruhi kualitas *watermark*. Semakin banyak proses dekomposisi maka semakin tinggi nilai *imperceptibility watermark* [3], [4]. Metode DCT (*Discrete Cosine Transform*) banyak diaplikasikan untuk meningkatkan kualitas *watermarking* yang dihasilkan oleh metode DWT [5], [6], [7]. Metode DCT memiliki ketahanan yang cukup baik dalam serangan-serangan *watermark* akan tetapi tidak tahan terhadap serangan geometri seperti *cropping*, *scalling*, dll [3]. Upaya lain yang telah diterapkan dalam teknik *watermarking* untuk meningkatkan ketahanan *watermark*, adalah menambahkan skema SVD dalam proses penyematan *watermark* [8]. *Singular Value Decomposition* (SVD) merupakan metode dalam dekomposisi atau memfaktorkan sebuah matriks.

Untuk meningkatkan keamanan *watermark*, beberapa penelitian sebelumnya menambahkan teknik pengacakan seperti *Chaotic system* [9], [10], *Arnold Transform*[1]. Meski telah ada beberapa penelitian sebelumnya mengembangkan skema DCT maupun DWT baik secara terpisah maupun hybrid, namun sebagian besar masih focus pada aspek ketahanan terhadap berbagai serangan [1], [9], [11], [12]. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menghasilkan skema *watermarking* citra warna yang memiliki *imperceptibility* yang tinggi namun tetap berupaya mempertahankan *watermark* dari berbagai serangan dalam domain DCT-DWT. Skema yang kami usulkan dengan mengkombinasikan teknik DWT-DCT, serta menambahkan menggunakan SVD dan Transformasi Arnold untuk meningkatkan ketahanan dan keamanan *watermark*.

## II. METODE

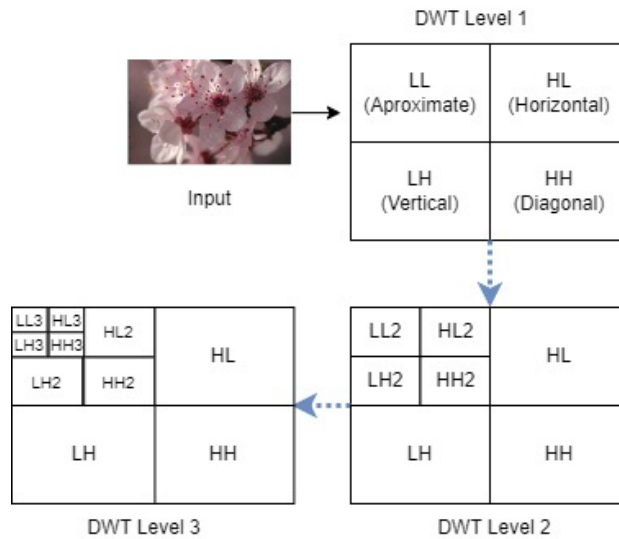
### A. Discrete Wavelet Transform

*Discrete Wavelet Transform* merupakan dekomposisi frekuensi *subband* citra dengan cara penurunan level dekomposisi. Dalam pemrosesan citra 2-dimensi, *Discrete Wavelet Transform* akan membagi citra menjadi 4 bagian: LL, HL, LH, dan HH [7]. Proses dekomposisi dan rekonstruksi dari *Discrete Wavelet Transform* diperlihatkan oleh gambar 1 berikut:



Gambar. 1. Dekomposisi & Rekonstruksi DWT Level 1

LL merepresentasikan sinyal yang memiliki frekuensi yang lemah yang disebut juga sebagai Koefisien aproksimasi (*Aproximate Coefficient*). LH dan HL merepresentasikan sinyal yang memiliki nilai frekuensi sedang. Sedangkan HH merepresentasikan sinyal yang memiliki frekuensi tinggi. Untuk merekonstruksi citra hasil dekomposisi DWT, dapat dilakukan menggunakan fungsi *invers* DWT(IDWT). Proses dekomposisi DWT dapat dijalankan hingga beberapa level kedalaman. Ilustrasi dekomposisi DWT dalam 3 level kedalaman diperlihatkan oleh gambar 2 berikut:



Gambar. 2. Dekomposisi DWT Level 3

### B. Discrete Cosine Transform (DCT)

*Discrete Cosine Transform* dapat mengkonversi sinyal dari domain spasial ke domain frekuensi. yang selanjutnya dapat dibagi menjadi frekuensi rendah, frekuensi sedang frekuensi tinggi dari kiri atas ke kanan bawah dalam blok koefisien DCT [13]. DCT memiliki kinerja de-korelasi yang lebih baik [14].

### C. Singular Value Decomposition (SVD)

*Singular Value Decomposition* pada citra merupakan operasi matematika yang mendekomposisi citra  $H$  yang berukuran  $N \times N$  menjadi 3 matriks, yakni matrik  $U$ ,  $S$ , dan  $V$ , sedemikian hingga  $H = USV^T$ . Disini  $S$  merupakan matriks diagonal, sedangkan  $U$  dan  $V$  merupakan matriks *orthogonal* [15]. Dalam SVD, matrik  $S$  berisi nilai singular yang disusun dalam urutan menurun.  $V^T$  merupakan *transpose* dari matriks  $V$  [5].

### D. Transformasi Arnold

Transformasi Arnold merupakan salah satu teknik kriptografi yang dilakukan dengan mengacak data untuk mengamankan informasi. Proses pengacakan informasi menggunakan persamaan 1 berikut [14]:

$$\begin{bmatrix} u' \\ v' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \text{ mod } P \quad (1)$$

Dimana  $u, v, u', v' \in \{0, 1, 2, \dots, p-1\}$ ,  $p$  merupakan ukuran dari citra watermark yang akan diacak.  $(u, v)$  merupakan posisi pixel sebelum di acak. Sedangkan  $(u', v')$  merupakan posisi pixel setelah di acak. Dengan menggunakan transformasi Arnold, periode pengacakan dapat digunakan sebagai kunci private. Untuk memulihkan watermark ke citra asli, dapat dilakukan dengan mencari *inverse* dari transformasi Arnold seperti yang diperlihatkan oleh persamaan 2 berikut [14]:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \left( \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u' \\ v' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p \\ p \end{bmatrix} \right) \text{ mod } P \quad (2)$$

### E. Pengukuran Tingkat Imperceptibility

*Imperceptibility watermark* menggambarkan tingkat visibilitas/ketampakan *watermark* yang terlihat oleh mata manusia pada citra yang telah dibubuhi *watermark*. Pada *invisible watermarking*, nilai *imperceptibility* dihitung dengan menggunakan persamaan PSNR (*Peak Signal to Noise Ratio*). PSNR akan membandingkan antara citra host dan citra ber*watermark* dengan mencari nilai persamaan perceptualnya. Nilai PSNR direpresentasikan dalam satuan decibel (dB). Citra ber*watermark* dikatakan memiliki *imperceptibility* yang bagus, jika nilai minimum PSNRnya mencapai 38 dB [16]. Semakin tinggi nilai PSNR suatu citra ber*watermark*, maka semakin bagus nilai kualitas perceptualnya [17]. Nilai PSNR dihitung dengan persamaan 3 berikut ini:

$$PSNR = 10 \times \log_{10} \frac{255^2 \times 3}{MSE(R) + MSE(G) + MSE(B)} \quad (3)$$

Dimana MSE (*Mean Square Error*) antara *channel* warna *Red (R)*, *Green (G)*, dan *Blue (B)*, di hitung dengan persamaan berikut:

$$MSE = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (x_{ij} - \bar{x}_{ij})^2 \quad (4)$$

Dimana  $M$  dan  $N$  merepresentasikan lebar dan tinggi dari citra. Sedangkan,  $x_{ij}$  merupakan intensitas nilai pixel dari koordinat  $i, j$  di komponen warna *red/green/blue* dari citra host. Nilai  $\bar{x}_{ij}$  merupakan nilai pixel dari komponen warna *red/green/blue* dari citra berwatermark.

#### F. Pengukuran Tingkat Ketahanan Watermark

Nilai ketahanan (*robustness*) *watermark* menunjukkan bahwa objek yang diberi *watermark* harus tahan terhadap upaya serangan penghapusan *watermark* baik secara langsung maupun tidak langsung. Untuk menghitung nilai ketahanan *watermark* digunakan metrik *Normalized Correlation (NC)* antara citra *watermark* dan citra *watermark* hasil ekstraksi. Nilai *Normalized Correlation* dihitung dengan persamaan berikut ini:

$$NC = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [w_{(i,j)} - \mu_w] \times [\bar{w}_{(i,j)} - \mu_{\bar{w}}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [w_{(i,j)} - \mu_w]^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [\bar{w}_{(i,j)} - \mu_{\bar{w}}]^2}} \quad (5)$$

Dimana nilai  $M$  dan  $N$  merepresentasikan lebar dan tinggi dari citra *watermark*.  $w_{(i,j)}$  merupakan nilai piksel dari citra *watermark* asli, sedangkan  $\bar{w}_{(i,j)}$  merupakan nilai piksel dari citra *watermark* hasil ekstraksi.  $\mu_w$  adalah nilai rata-rata (mean) dari citra *watermark* asli, sedangkan  $\mu_{\bar{w}}$  adalah nilai rata-rata (mean) dari citra *watermark* hasil ekstraksi.

Nilai  $NC$  berkisar antara -1 sampai dengan 1. Jika *watermark* hasil ekstraksi memiliki Tingkat kemiripan yang sempurna dengan *watermark* asli, maka nilai  $NC$ nya adalah 1. Secara umum *watermark* dikatakan memiliki ketahanan yang baik dengan nilai minimum  $NC$ nya adalah 0.75[16].

#### G. Skema Usulan

Proses penyisipan *watermark* yang diusulkan dalam penelitian ini ditunjukkan oleh gambar 3 berikut:

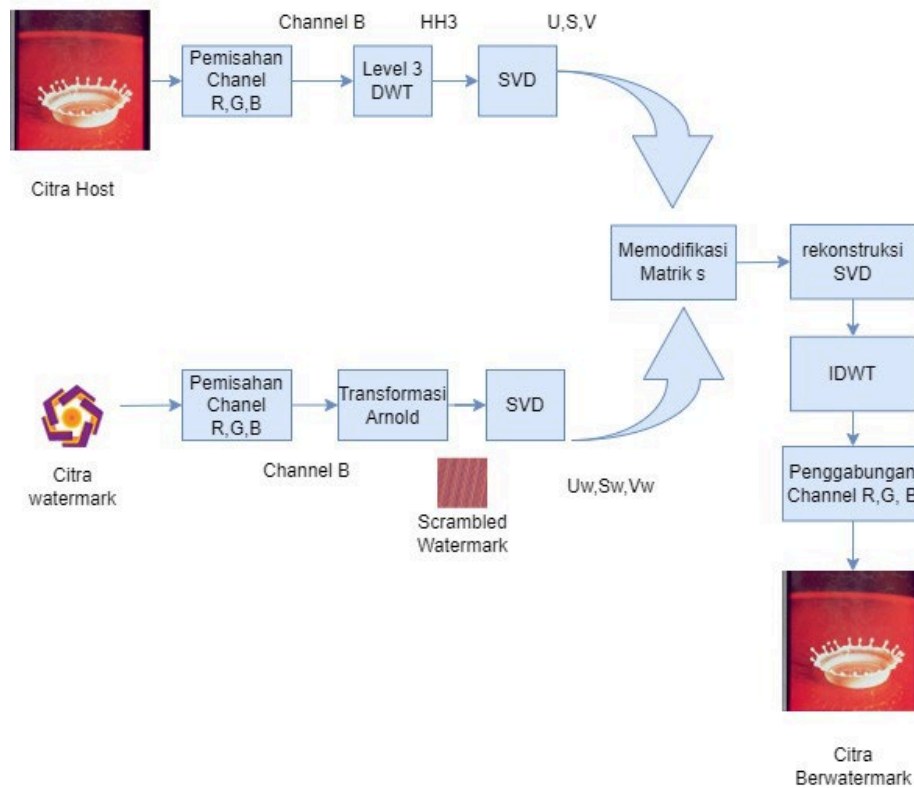
Langkah-langkah penyisipan *watermark*, seperti yang tergambar oleh ilustrasi di atas, dapat diuraikan sebagai berikut:

- 1) Pisahkan *Channel* Warna *red*, *green* dan *blue* dari citra host
- 2) Lakukan dekomposisi DWT level 3 dari *channel blue* citra host
- 3) Ambil matriks SVD dari *coefficient diagonal* (HH3). Matriks SVD akan memberikan nilai *singular S* dan *vector orthogonal U* dan *V*.
- 4) Pisahkan *channel* warna *red*, *green*, dan *blue* dari citra *watermark*.
- 5) Jalankan transformasi Arnold pada *channel blue*. Pilih secara acak salah satu output yang dibangkitkan oleh *Arnold Chaotic Map*, yang akan menjadi kunci rahasia (*secret key*).
- 6) Jalankan SVD pada matriks hasil transformasi Arnold. SVD akan menghasilkan vector *Sw*, *Uw* dan *Vw*
- 7) Lakukan modifikasi matriks *singular* dari citra host, dengan operasi matematis berikut ini:

$$S' = \alpha * Sw \quad (6)$$

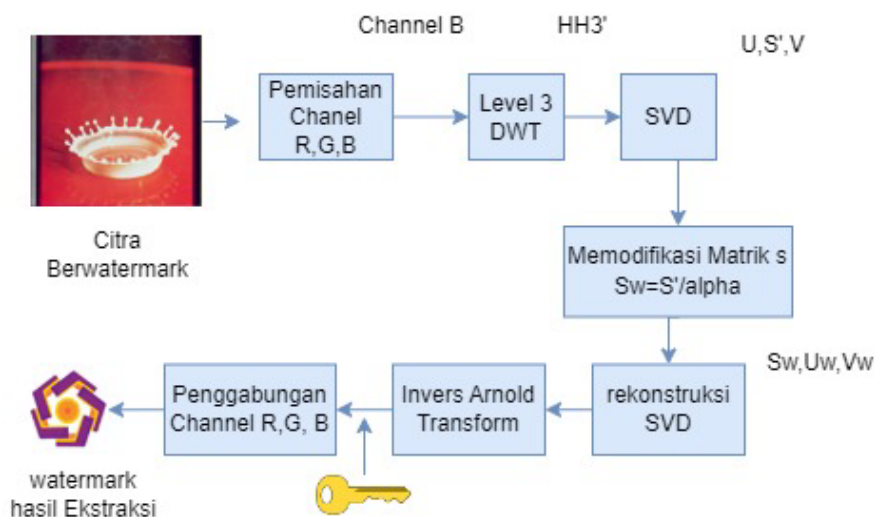
Dimana  $\alpha$  ( $\alpha$ ) merupakan factor penyisipan *watermark*

- 8) Lakukan *Invers* DWT pada matriks modifikasi tersebut.
- 9) Gabungkan tiga *channel* warna untuk menghasilkan citra berwatermark.



Gambar. 3. Skema Penyisipan Watermark

Adapun proses ekstraksi watermark, yang kami usulkan diilustrasikan oleh gambar 4 berikut.



Gambar. 4. Skema Ekstraksi Watermark

Berdasarkan skema tersebut di atas, urutan proses ekstraksi *watermark* di uraikan sebagai berikut:

- 1) Pisahkan *channel* warna *red*, *green* dan *blue* dari citra berwatermark
- 2) Lakukan dekomposisi DWT level 3 dari *channel blue*
- 3) Jalankan SVD pada matriks *coefficient Diagonal* ( $HH3'$ ). SVD akan memberikan vector  $S'$ ,  $U'$  dan  $V'$

- 4) Nilai *singular* dari watermark yang tersemat ( $S_w$ ) dapat diperoleh dengan formula berikut:
 
$$S_w = S/\alpha \tag{7}$$
- 5) Nilai  $\alpha$  yang digunakan pada ekstraksi haruslah sama dengan nilai  $\alpha$  pada saat penyisipan *watermark*.
- 6) Lakukan rekonstruksi SVD
- 7) Jalankan *Invers* Arnold dengan menggunakan *secret key*. Proses ini akan menghasilkan *channel* warna *blue*
- 8) Gabungkan keseluruhan *channel* warna untuk mendapatkan ekstraksi citra *watermark*

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Citra host yang digunakan pada penelitian ini menggunakan citra warna dengan ukuran  $512 \times 512$  px yang berasal dari dataset USC-SIPI Image Database (<https://sipi.usc.edu/database/>). Data citra host diperlihatkan oleh gambar 5 berikut:



Gambar. 5. Citra Host

Citra *watermark* yang digunakan dalam penelitian ini adalah citra warna yang berukuran  $64 \times 64$  px. Citra *watermark* diperlihatkan oleh gambar 6 berikut:



Gambar. 6. Citra watermark

*Watermark* disisipkan menggunakan skema pada gambar 3. Tingkat *imperceptibility* dari *watermark* ditunjukkan oleh tabel I berikut ini:

TABEL I  
 IMPERCEPTIBILITY WATERMARK

Citra Host	Peak Signal to Ratio (PSNR)			
	amikom	android	apple	tux
splash	47.165	48.684	47.693	46.727
airplane	46.648	47.415	46.376	46.103
mandril	39.294	39.563	39.223	39.41
pepper	45.78	46.435	45.529	45.456
sailboat	40.126	40.48	40.151	40.257
house	42.932	43.485	42.946	42.979
<b>average</b>	<b>43.78570833</b>			

Nilai rerata PSNR dalam penelitian ini adalah 43.786 dB, berarti memiliki nilai *imperceptibility* yang baik karena melampaui batas ambang minimum PSNR (38 dB). Dari perolehan nilai rerata PSNR tersebut, watermark yang kami sisipkan, tidak menyebabkan distorsi yang signifikan. Citra yang berwatermark hampir identik dengan citra host (*imperceptible watermark*). Sehingga skema penyisipan *watermark* yang kami usulkan, cocok untuk

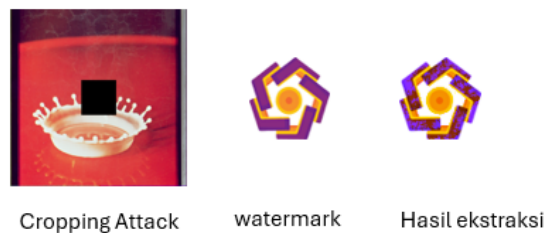
diaplikasikan pada kasus yang membutuhkan kualitas citra visual, seperti citra medis. Nilai *imperceptibility watermarking* pada skema ini jika dibandingkan dengan penelitian sebelumnya dapat ditunjukkan oleh tabel II berikut:

TABEL II  
 PERBANDINGAN HASIL PENELITIAN

Item	Skema Usulan	Moosaza- deh[18]	ThienHuynh et al[19]	Su, et al[20]
Ukuran Citra Host	512 × 512	512 × 512	512 × 512	512 × 512
Tipe Citra	warna	warna	warna	warna
Ukuran Watermark	64 × 64	32 × 32	64 × 64	32 × 32
Domain	Frekuensi	Frekuensi	Frekuensi	Frekuensi
Domain Warna	B	Y	R, G, B	R, G, B
Imperceptibility	43.786 dB	40.402 dB	43.51 dB	37.611 dB

Berdasarkan table II tersebut, maka skema watermarking ini menghasilkan nilai *imperceptibility* yang lebih bagus dari penelitian sebelumnya. Domain warna yang digunakan dalam penyisipan *watermark* cukup mempengaruhi kualitas *imperceptibility* citra berwatermark. Disini terlihat *channel blue* lebih baik dibanding domain warna yang lain. Pemilihan *channel blue* memang terbukti dapat mengurangi visibilitas *watermark*, namun dapat mengurangi ketahanan watermark. Pada skema Moosazadeh[18], meskipun ukuran *watermark* yang disisipkan lebih kecil dibanding ukuran skema usulan, namun hasil PSNR skema usulan tetap lebih tinggi. Hal ini cukup membuktikan bahwa skema usulan cukup baik dalam kualitas visual.

Proses ekstraksi *watermark* dilakukan mengikuti skema gambar 4. Contoh hasil ekstraksi *watermark* diperlihatkan oleh gambar 7 berikut ini:



Gambar. 7. Hasil Ekstraksi Watermark

Untuk mengetahui ketahanan *watermark*, maka dilakukan beberapa pengujian dengan memberikan beberapa serangan. Serangan diberikan kepada citra yang telah diberi watermark. Serangan tersebut antara lain: Salt & Pepper, Gaussian, Median, rotate dan cropping. Salt & pepper dilakukan dengan tingkat noise sebesar 0.5. Pemberian serangan gaussian menggunakan standar deviasi dari distribusi gaussian sebesar 0.5. Serangan Median akan membuat citra berwatermark menjadi blur. Serangan median ini dilakukan dengan kernel berukuran 3×3. Adapun serangan geometri diwakili oleh operasi rotasi dan cropping. Operasi rotasi dilakukan dengan sudut rotasi sebesar 45° dan 90°. Pada rotasi 45°, citra di resize, sehingga ukuran citra tetap sama dengan citra yang mendapat serangan apapun. Serangan cropping, dilakukan dengan menghilangkan bagian citra sebesar 100×100 px, dengan titik awal potongan di koordinat (206, 206). Hasil pengujian direpresentasikan dengan nilai *normalized correlation* (NC) yang ditunjukkan oleh tabel III berikut ini:

TABEL III  
 KETAHANAN WATERMARK

Attack	Normalized Correlation(NC)						
	No Attack	Salt & Pepper	Gaussian	Median	Rotate 45	Rotate 90	Crop
splash	0.998	0.970	0.976	0.976	0.974	0.998	0.993
airplane	0.999	0.970	0.978	0.995	0.983	0.999	0.961
mandril	0.999	0.971	0.977	0.987	0.984	0.999	0.946
pepper	0.999	0.972	0.975	0.994	0.984	0.999	0.998
sailboat	0.999	0.971	0.979	0.993	0.985	0.999	0.975
house	0.999	0.973	0.978	0.994	0.986	0.999	0.970
<b>average</b>	<b>0.998</b>	<b>0.971</b>	<b>0.977</b>	<b>0.989</b>	<b>0.982</b>	<b>0.998</b>	<b>0.973</b>

Jika dilihat dari hasil tabel III, nilai rata-rata dari NC menunjukkan 0.9. Hal ini dapat dikatakan bahwa kualitas *watermarking* menggunakan skema usulan memiliki nilai *robustness* yang cukup baik, yakni mendekati 1. Namun masih terdapat beberapa artefak visual yang muncul dari citra hasil ekstraksi. Hal ini seperti yang ditunjukkan oleh

gambar 7. *Watermark* memiliki kualitas terburuk jika mendapat serangan *salt & pepper* serta *cropping*. Serangan *Salt & pepper* merupakan serangan yang dilakukan dengan memberikan gangguan acak pada citra dengan menambahkan piksel putih (“*salt*”) dan hitam (“*pepper*”). Serangan *salt & pepper* ini akan merusak citra di bagian frekuensi yang tinggi. Skema watermark yang kami sematkan di frekuensi tinggi (HH) pada fase DWT, mengakibatkan kurang tahan terhadap serangan *salt & pepper* ini. Berbeda dengan serangan yang lain, serangan *cropping* akan menghilangkan seluruh informasi pada bagian citra yang *dicrop*, hal ini tentu saja juga akan menghilangkan informasi *watermark* pada bagian tersebut. Sehingga proses rekonstruksi *watermark* tidak akan bisa sempurna.

#### IV. KESIMPULAN

Berdasarkan beberapa pengujian yang telah dilakukan dalam penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa skema watermarking yang diusulkan memiliki nilai imperceptibility yang baik. Nilai rata-rata PSNR yang dihasilkan oleh skema ini adalah 43.786 dB. Skema yang diusulkan juga telah diuji dengan berbagai jenis serangan, dengan nilai rerata NC sebesar 0.9. Hal ini dapat dikatakan bahwa skema yang diusulkan, bersifat robust(tahan) terhadap serangan.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini sepenuhnya didukung dan didanai oleh Universitas Amikom Yogyakarta.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Xu, J. Yu, and H. Tang, “Wavelets-Based Digital Watermarking Scheme for Medical Image Data,” in *Proceedings - 2022 2nd International Conference on Computer Graphics, Image and Virtualization, ICCGIV 2022*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022, pp. 98–102. doi: 10.1109/ICCGIV57403.2022.00025.
- [2] L. Novamizanti, I. Safitri, H. B. Arindaka, and I. I. Tritasmoro, “Watermarking berbasis Redundant Discrete Wavelet Transform dan Arnold Transform pada Citra Medis,” *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 13, no. 2, pp. 48–55, Dec. 2021, doi: 10.15294/jte.v13i2.31691.
- [3] K. Tarmisi, A. Shalan, A. A. Alshareef, and S. S. Alotaibi, “A Robust Image Watermarking Technique Using Multi-DW-DCT Scheme,” in *Proceedings - 2022 IEEE/ACIS 7th International Conference on Big Data, Cloud Computing, and Data Science, BCD 2022*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022, pp. 155–160. doi: 10.1109/BCD54882.2022.9900697.
- [4] S. Gani and B. Setiyono, “Teknik Invisible Watermarking Digital Menggunakan Metode DWT(Discrete Wavelet Transform),” *Jurnal Sains dan Seni ITS*, vol. 7, no. 2, pp. A24–A30, 2018.
- [5] M. Begum, J. Ferdush, and M. S. Uddin, “A Hybrid robust watermarking system based on discrete cosine transform, discrete wavelet transform, and singular value decomposition,” *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, vol. 34, no. 8, pp. 5856–5867, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.jksuci.2021.07.012.
- [6] B. Mokashi, V. S. Bhat, J. D. Pujari, S. Roopashree, T. R. Mahesh, and D. S. Alex, “Efficient Hybrid Blind Watermarking in DWT-DCT-SVD with Dual Biometric Features for Images,” *Contrast Media Mol Imaging*, vol. 2022, 2022, doi: 10.1155/2022/2918126.
- [7] E. Rahmawan Pramudya, “Compression Run Length Encoding On Watermarking Using a Combination of DCT, DWT and SVD,” *Journal of Applied Intelligent System*, vol. 8, no. 2, pp. 129–139, 2023.
- [8] T. Ma and N. Chen, “NSCT-DWT-SVD Composite Digital Watermarking Algorithm based on QR Code,” in *Proceedings - 2022 International Conference on Computers, Information Processing and Advanced Education, CIPAE 2022*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022, pp. 380–384. doi: 10.1109/CIPAE55637.2022.00086.
- [9] Z. Li, H. Zhang, X. Liu, C. Wang, and X. Wang, “Blind and safety-enhanced dual watermarking algorithm with chaotic system encryption based on RHF and DWT-DCT,” *Digital Signal Processing: A Review Journal*, vol. 115, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.dsp.2021.103062.
- [10] A. A. Mohammed, B. A. Jebur, and K. M. Younus, “Hybrid DCT-SVD Based Digital Watermarking Scheme with Chaotic Encryption for Medical Images,” *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 1152, no. 1, p. 012025, May 2021, doi: 10.1088/1757-899x/1152/1/012025.
- [11] M. Plata and P. Syga, “Robust spatial-spread deep neural image watermarking,” in *Proceedings - 2020 IEEE 19th International Conference on Trust, Security and Privacy in Computing and Communications, TrustCom 2020*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Dec. 2020, pp. 62–70. doi: 10.1109/TrustCom50675.2020.00022.
- [12] M. Solikhin, Y. Pratama, P. Pasaribu, J. Rumahorbo, and B. Simanullang, “Analisis Watermarking Menggunakan Metode Discrete Cosine Transform (DCT) dan Discrete Fourier Transform (DFT),” *Jurnal Sistem Cerdas*, vol. 5, no. 3, pp. 155–170, 2022.
- [13] H. Guo, B. Niu, Y. Huang, H. Guan, F. Lan, and F. Lin, “An Improved Robust Digital Image Watermarking Algorithm based on two-level DCT,” in *Proceedings - 2021 International Conference on Culture-Oriented Science and Technology, ICCST 2021*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021, pp. 417–421. doi: 10.1109/ICCST53801.2021.00093.
- [14] Z. Yuan, D. Liu, X. Zhang, and Q. Su, “New image blind watermarking method based on two-dimensional discrete cosine transform,” *Optik (Stuttg)*, vol. 204, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.ijleo.2019.164152.
- [15] P. Sivananthamaitrey and P. R. Kumar, “Optimal Dual Watermarking of Color Images with SWT and SVD Through Genetic Algorithm,” *Circuits Syst Signal Process*, vol. 41, no. 1, pp. 224–248, Jan. 2022, doi: 10.1007/s00034-021-01773-y.
- [16] S. Roy and A. K. Pal, “A Hybrid Domain Color Image Watermarking Based on DWT-SVD,” *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Electrical Engineering*, vol. 43, no. 2, pp. 201–217, Jun. 2019, doi: 10.1007/s40998-018-0109-x.
- [17] X. Yuan and X. Wang, “Multiple Watermarking Based on DCT Coefficients Selection,” in *2022 14th International Conference on Signal Processing Systems (ICSPS)*, IEEE, Nov. 2022, pp. 518–522. doi: 10.1109/ICSPS58776.2022.00095.
- [18] M. Moosazadeh and G. Ekbatanifard, “A new DCT-based robust image watermarking method using teaching-learning-Based optimization,” *Journal of Information Security and Applications*, vol. 47, pp. 28–38, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.jisa.2019.04.001.
- [19] T. Huynh-The, O. Banos, S. Lee, Y. Yoon, and T. Le-Tien, “Improving digital image watermarking by means of optimal channel selection,” *Expert Syst Appl*, vol. 62, pp. 177–189, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.eswa.2016.06.015.
- [20] Q. Su et al., “New Rapid and Robust Color Image Watermarking Technique in Spatial Domain,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 30398–30409, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2895062.