

Evaluasi *Audio Watermarking* Pada Domain *Wavelet* Berbasiskan *Discrete Sine Transform* Dan *Singular Value Decomposition (DST-SVD)* Dengan Metode *Quantization Index Modulation*

1st Bartolomeus Raditya Nugroho
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

bartolomeusraditya@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Gelar Budiman
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

gelarbudiman@telkomuniversity.ac.id

3rd Khaerudin Saleh
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

khaerudin@telkomuniversity.ac.id

Abstrak — *Audio watermarking* merupakan sebuah teknik menyisipkan *watermark* ke dalam sebuah *audio (host)*. Teknik ini merupakan salah satu solusi untuk mengatasi banyaknya pelanggaran hak cipta media, terutama *audio*. *Watermark* biasanya berisi sebuah informasi mengenai tanda kepemilikan dari suatu file, sehingga orang lain tidak dapat memodifikasi, menyebarkan maupun mengakui sebagai pemilik file tersebut.

Watermark dapat disisipkan pada domain waktu maupun domain frekuensi, masing-masing mempunyai kelebihan dan kekurangan. *Watermarking* pada domain waktu lebih mudah diimplementasikan, sedangkan *watermarking* pada domain frekuensi jauh lebih tahan terhadap berbagai serangan. Seperti yang diketahui, *watermarking* tidak hanya harus memperhatikan kualitas dari *audio* yang ter*watermark*, tetapi juga ketahanannya. Sehingga pada tugas akhir ini *watermark* disisipkan pada domain frekuensi. Telah banyak penelitian mengenai *audio watermarking* menggunakan berbagai metode. Pada tugas akhir ini akan membahas mengenai *audio watermarking* berbasis *Discrete Sine Transform* dan *Singular Value Decomposition (DST-SVD)* dengan metode *Quantization Index Modulation* pada domain *wavelet*.

Berdasarkan hasil penelitian *DST-SVD* dengan metode *QIM* pada domain *wavelet* didapatkan nilai rata-rata *Objective Difference Grade (ODG)* sebesar -0.07, nilai rata-rata *Signal to Noise Ratio (SNR)* sebesar 13.9965, nilai rata-rata *Bit Error Rate (BER)* sebesar 0.279402, dan nilai *Capacity (C)* sebesar 5,3883.

Kata kunci: *Audio Watermarking*, *Discrete Wavelet Transform (DWT)*, *Discrete Sine Transform (DST)*, *Singular Value Decomposition (SVD)*, *Quantization Index Modulation (QIM)*.

Penelitian [1], [3] dan [4] menggunakan transformasi *Discrete Wavelet Transform (DWT)* dan menghasilkan *audio watermarking* dengan *imperceptibility* yang tinggi. Penelitian [2] mengkombinasikan *DWT* dan *Singular Value Decomposition (SVD)* dan menghasilkan *audio watermarking* yang memiliki ketahanan yang baik untuk beberapa serangan seperti kompresi MP3, *resampling*, serta *noise*. Pada penelitian [6] dilakukan perbandingan antara *Discrete Cosine Transform (DCT)* dan *Discrete Sine Transform (DST)*. Pada *DCT*, penyisipan *watermark* tidak mempunyai banyak pilihan, sedangkan pada *DST* dengan hasil dari memadatkan energi sinyal menjadi beberapa koefisien memberikan banyak pilihan penyisipan. Karena itu dapat memberikan keamanan lebih untuk sistem *watermarking*. Selain itu, *DST* juga menghasilkan *robustness* dan *imperceptibility* yang bagus [6].

Quantization Index Modulation (QIM) pertama kali diusulkan oleh Chen dan Wornel pada penelitian [8]. Teknik ini mempunyai beberapa kelebihan yaitu meningkatkan ketahanan *watermark*, meminimalkan distorsi antara sinyal *host* dan sinyal ter*watermark*, serta memaksimalkan kapasitas *audio watermarking*, sehingga akan dicapai *trade off* yang paling efisien diantara ketiga parameter yang harus dicapai pada *watermarking (imperceptibility, robustness, capacity)*.

Pada penelitian ini diimplementasikan beberapa metode yang telah digunakan sebelumnya dengan tujuan menggabungkan kelebihan dan mengurangi kelemahan dari masing-masing metode tersebut. *Audio watermarking* yang akan dibuat berbasis *DWT*, *DST*, *SVD* dengan teknik *QIM*.

I. PENDAHULUAN

Salah satu solusi untuk mengatasi pelanggaran hak cipta suatu media yang semakin banyak dilakukan, yaitu dengan menyisipkan informasi yang berisi tanda kepemilikan secara langsung ke dalam media tersebut. *Digital watermarking* merupakan suatu teknik untuk menyisipkan suatu informasi (*watermark*) ke dalam suatu data digital (*host*) tanpa mengganggu kualitas *host* tersebut [1]. Sistem *watermarking* secara umum terdiri dari proses penyisipan (*embedding*) dan ekstraksi. Tugas akhir ini akan menggunakan *blind watermarking*, karena proses ekstraksinya yang lebih sederhana dan *image watermark* disisipkan pada domain frekuensi dengan *host* berupa *audio*.

II. KAJIAN TEORI

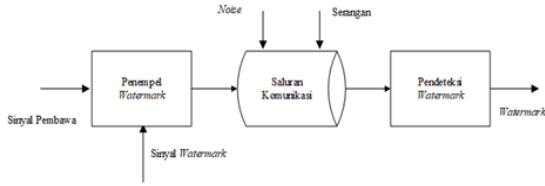
A. Digital watermarking

Digital watermarking merupakan suatu teknik menyisipkan data *watermark* yang berupa teks, suara, citra maupun video ke dalam suatu data digital [1][3][4]. Teknik *watermarking* menggunakan kerentanan indera manusia, sehingga orang lain tidak akan menyadari adanya data *watermark* dalam berkas tersebut.

Sistem *watermarking* mempunyai beberapa komponen utama sebagai berikut [18]:

1. Label atau *watermark*
2. Proses penyembunyian label (penempelan/*embedding*)
3. Proses menghasilkan kembali label *watermark* (verifikasi/ekstraksi).

Adapun komponen-komponen *watermarking* ditunjukkan oleh Gambar 2.1:



GAMBAR 2. 1
Komponen – komponen *watermarking* [18]

Watermarking yang optimal harus memenuhi beberapa kriteria seperti berikut [13]:

- Imperceptibility:** data *watermark* sebaiknya tidak diketahui oleh orang lain, artinya orang lain tidak menyadari adanya perbedaan antara *file* asli maupun *watermarked file*.
- Robustness:** ketahanan sistem *watermarking* terhadap berbagai serangan operasi sinyal.
- Capacity:** Jumlah data yang dapat disisipkan ke dalam sistem *watermarking* (*payload*).

B. Discrete Wavelet Transform

Discrete Wavelet Transform (DWT) prinsip kerja metode DWT yaitu melakukan dekomposisi sinyal (membagi sinyal menjadi frekuensi tinggi dan frekuensi rendah) dengan cara melewati sinyal audio melalui *high pass filter* dan *low pass filter* [4]. Satu tingkat dekomposisi dapat dituliskan menggunakan persamaan :

$$Y_{high}[k] = \sum_n x[n] \cdot g[2k - n] \quad (2.1)$$

$$Y_{low}[k] = \sum_n x[n] \cdot g[2k - n] \quad (2.2)$$

Untuk IDWT menggunakan persamaan :

$$\hat{Y}_{high} = \frac{x[n] - x[n-1]}{2} \quad (2.3)$$

$$\hat{Y}_{low} = \frac{x[n] + x[n-1]}{2} \quad (2.4)$$

Proses transformasi DWT pada citra memang sederhana. Citra semula yang ditransformasi kemudian didekomposisikan menjadi 4 *sub-image* baru untuk menggantikannya. Setiap *sub-image* berukuran 0.25x dari citra asli. *Sub-image* pada posisi kanan-atas, kiri-bawah, dan kanan-bawah akan tampak seperti versi kasar dari citra asli, karena berisi komponen frekuensi tinggi dari citra asli.

C. Discrete Sine Transform

DST mirip dengan *Discrete Fourier Transform* (DFT). DST menyatakan fungsi domain waktu atau sinyal dalam jumlah sinusoidal dengan perbedaan frekuensi dan amplituda. DST dari satu dimensi sinyal atau fungsi, $x(n)$ dengan $0 \leq n \leq N-1$, yang terdefinisi sesuai persamaan berikut [6]:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \sin\left(\frac{\pi kn}{N+1}\right), k = 0, \dots, N-1 \quad (2.5)$$

dimana $X(k)$ adalah hasil dari proses DST, $x(n)$ adalah nilai amplituda dari sinyal audio, dan N adalah nomor percobaan.

Invers Discrete Sine Transform (IDST) mengkontruksi kembali bilangan dari koefisien DST. Adapun persamaan IDST adalah [6]:

$$Y(n) = \frac{2}{N+1} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \sin\left(\frac{\pi kn}{N+1}\right), n = 0, \dots, N-1 \quad (2.6)$$

D. Singular Value Decomposition

Singular Value Decomposition (SVD) adalah sebuah teknik yang optimal untuk mendekomposisi nilai eigen dari suatu matriks segiempat berdasarkan teorema aljabar linear [2] [7]. Dalam metode SVD, suatu matriks akan diuraikan menjadi tiga matriks yang sederhana, terdiri dari dua matriks ortogonal dan satu matriks diagonal.

Misalkan A merupakan matriks persegi berukuran $n \times n$, maka matriks tersebut dapat didekomposisi menggunakan SVD menggunakan persamaan berikut [2]:

$$A = U S V^T = \sum_{i=1}^n \lambda_i U_i V_i^T \quad (2.7)$$

Kinerja dari matriks – matriks tersebut adalah sebagai berikut [5][3]:

- Matriks A merupakan matriks dari sinyal awal yang belum terbagi. dengan nilai eigen dari matriks $A^T A$ yaitu λ_i untuk setiap $1 \leq i \leq n$ dengan n merupakan banyak nilai eigen, maka nilai singular matriks A yaitu $\sigma_i \leq \sqrt{\lambda_i}$ dan v_i merupakan vektor eigen matriks $A^T A$ yang bersesuaian dengan nilai λ_i .
- Matriks U merupakan matriks ortonormal yang berukuran $m \times n$. Baris ortonormal U dapat didefinisikan sebagai $u_i = \frac{1}{\sigma_i} A v_i$ untuk setiap $1 \leq i \leq n$.
- Matriks S adalah matriks persegi $n \times n$ dengan jenis matriks diagonal. Dimana selain diagonalnya, matriks tersebut berisi elemen 0.

$$S = \begin{bmatrix} \sigma_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \sigma_n \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Pada matriks S inilah nanti akan disisipkan data yang berfungsi sebagai *watermark*.

- Matriks V^T adalah matriks jenis ortonormal $n \times n$. Agar kolom matriks dapat dinormalisasikan menjadi

$$v_i = \frac{1}{\|x\|} x_i. \quad (2.9)$$

Dari definisi – definisi matriks di atas, dapat disimpulkan bahwa jika ketiga matriks itu digabungkan bisa menjadi seperti matriks berikut:

$$[A] = [U] \begin{bmatrix} \sigma_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \sigma_n \end{bmatrix} [V^T] \quad (2.10)$$

E. Quantization Index Modulation

Quantization Index Modulation (QIM) merupakan suatu teknik yang menerapkan kuantisasi ke dalam *sample host* audio untuk proses penyisipan pada *watermarking*, teknik ini pertama kali diusulkan oleh Chen-Wornell [10]. Teknik ini cocok digunakan untuk proses penyisipan *watermark* yang memiliki *tradeoff* antara ketahanan dan rate distorsi.

Adapun persamaan untuk melakukan teknik penyisipan menggunakan QIM adalah sebagai berikut:

$$F'(0) = \begin{cases} A_k, & \text{jika } w = 0 \text{ dan } \arg \min |F(0) - A_k| \\ B_k, & \text{jika } w = 1 \text{ dan } \arg \min |F(0) - B_k| \end{cases} \quad (2.11)$$

dimana:

$$A_k = (2k + \frac{1}{2}) \Delta ; B_k = (2k - \frac{1}{2}) \Delta ; \text{ dengan } k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

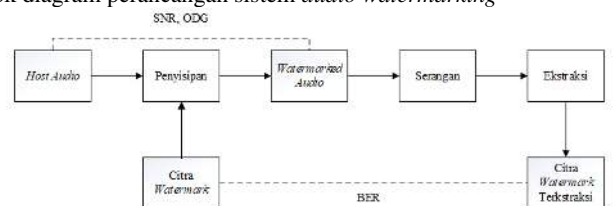
$F'(0)$ merupakan koefisien baru dari *watermarked audio*, w adalah nilai bit *watermark* yang akan disisipkan. A_k dan B_k dipilih sesuai dengan nilai bit-bit *watermark* tersebut. Sedangkan persamaan untuk proses ekstraksi adalah:

$$\tilde{V}(k) = \text{mod}(\text{ceil}\left(\frac{F'(0)}{\Delta}\right) 2) \quad (2.12)$$

dimana $\tilde{V}(k)$ merupakan koefisien dari bit *watermark* yang telah diekstraksi.

III. PERANCANGAN SISTEM

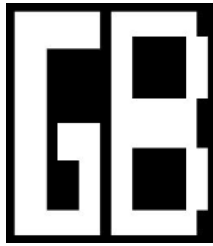
Sistem *watermarking audio* ini terdiri dari dua tahapan, yakni tahap penyisipan data *watermark* (*embedding*) dan tahap ekstraksi data *watermark* dari berkas *host*-nya. Gambar 3.1 menunjukkan blok diagram perancangan sistem *audio watermarking*



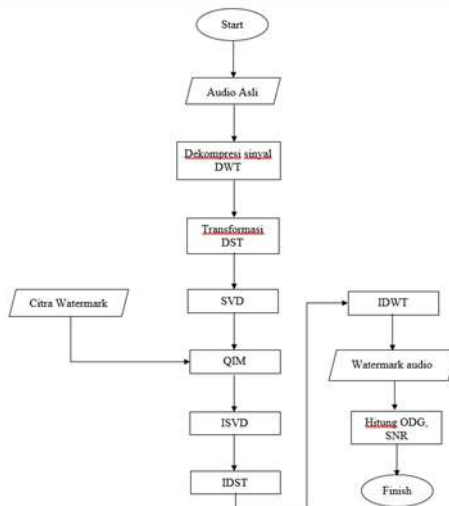
GAMBAR 3. 1
Perancangan sistem *audio watermarking*

A. Perancangan Sistem Penyisipan

Proses penyisipan data *watermark* ke dalam suatu *host* audio disebut dengan proses *embedding*. Proses penyisipan pada sistem *watermarking* ini terdiri dari beberapa tahapan. Tahapan-tahapan tersebut digambarkan dalam diagram alir pada Gambar 3.3.



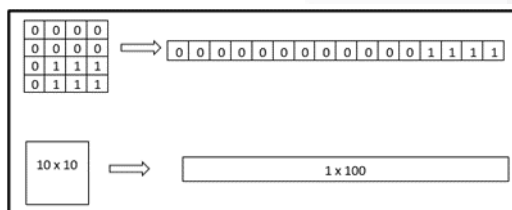
GAMBAR 3.2
Contoh citra hitam putih



GAMBAR 3.3
Diagram alir proses penyisipan

Berikut ini merupakan tahapan-tahapan pada proses penyisipan citra *watermark* ke dalam *host* audio:

Reshape: Citra biner hitam putih berukuran 10 x 10 berdimensi 2 diubah menjadi 1 dimensi dengan ukuran 1 x 100. Nilai 0 menyatakan warna hitam, dan nilai 1 menyatakan warna putih.



GAMBAR 3.4
Proses perubahan citra menjadi satu dimensi

Mengubah *host* audio dari *stereo* ke *mono* dan mempersingkat durasi *host* audio, karena audio *mono* hanya memiliki satu kanal sehingga akan lebih mudah untuk diproses. *Host* audio yang akan diproses dibatasi sepanjang LL, dimana:

$$LL = 2^N \times \text{panjang watermark} \times N\text{frame} \quad (3.1)$$

Keterangan:

LL = panjang *host* minimal yang dibutuhkan

N = 1, 2, 3, ..., 5 (level dekomposisi DWT)

Nframe = 128, 256, ..., 1024 (panjang tiap *frame*)

Proses Discrete Wavelet Transform

Pada tahapan DWT level 1, sinyal akan dilewatkan melalui filter LPF dan HPF, sehingga akan terpisah antara frekuensi rendah dan frekuensi tinggi dari sinyal audio tersebut. Persamaan yang digunakan pada transformasi ini adalah sebagai berikut [3]:

$$Y_{high}[k] = \sum_n x[n]h[2k - n] \quad (3.2)$$

$$Y_{low}[k] = \sum_n x[n]g[2k - n] \quad (3.3)$$

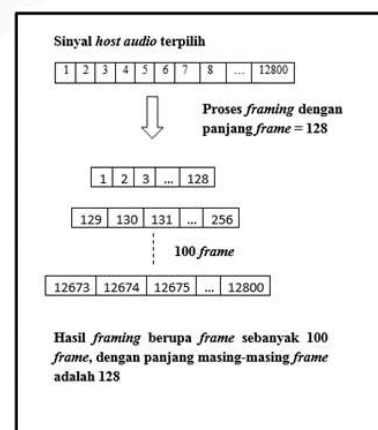
Transformasi DWT yang akan dilakukan adalah sebanyak N level, dimana akan menghasilkan beberapa *subband* yang akan membantu untuk penentuan *subband* terbaik dalam penyisipan *watermark*. Adapun jumlah *subband* yang dihasilkan bergantung pada level DWT, dimana jumlah *subband* adalah 2^N . Proses DWT diilustrasikan pada Gambar 3.5 berikut ini.



GAMBAR 3.5
Proses DWT pada sinyal audio

Karena level DWT yang digunakan adalah 5, maka *subband* yang dihasilkan adalah 2^5 , yaitu sebanyak 32 *subband*. Kemudian, dipilih beberapa posisi dari hasil DWT yang memiliki daya terbesar yang nilainya diatas nilai *threshold* untuk proses penyisipan bit *watermark*. Karena terdapat perubahan pada sinyal dengan daya besar, maka perubahan tersebut tidak akan terlihat secara signifikan.

Proses segmentasi sinyal atau *framing*, merupakan proses membagi *host* menjadi beberapa *frame* sepanjang $N\text{frame}$ untuk setiap *frame* yang terbentuk. Panjang *frame* yang digunakan bervariasi, yaitu 128, 256, 512 dan 1024. Proses segmentasi sinyal dapat dilihat pada Gambar 3.6 berikut.



GAMBAR 3.6
Proses segmentasi sinyal

Sinyal akan dibagi menjadi beberapa *frame* sebanyak X , dengan panjang masing-masing *frame* adalah N_{frame} , dimana:

$$X = \text{panjang sinyal} / N_{frame} \quad (3.4)$$

Keterangan:

X : Jumlah *frame*

N_{frame} : 128, 256, 512 atau 1024

1. Proses Discrete Sine Transform

Keluaran dari dekomposisi DWT tingkat 5 yang telah disegmentasi tersebut akan ditransformasi menggunakan DST. DST akan melakukan transformasi *file audio* asli dengan menggunakan rumus transformasi DST, untuk menghasilkan koefisien-koefisien dalam dimensi frekuensi. Adapun persamaan untuk melakukan transformasi menggunakan DST yaitu:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \sin\left(\frac{\pi kn}{N+1}\right), k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (3.4)$$

2. Proses Singular Value Decomposition

Frame yang berbentuk persegi tersebut akan didekomposisi menggunakan *Singular Value Decomposition* (SVD) menjadi beberapa matriks, yaitu dua matriks orthogonal (U & V^T) serta sebuah matriks diagonal (S). Lalu, bit *watermark* akan disisipkan di bagian matriks S tersebut.

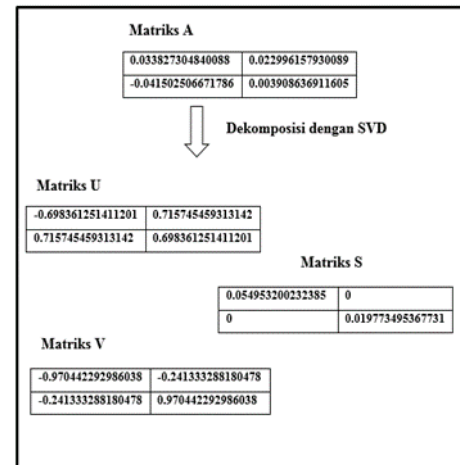
$$A = U \times S \times V^T \quad (3.5)$$

Pada matriks S , bit *watermark* akan disisipkan pada setiap diagonal dari matriks tersebut. Hal ini berlaku pada setiap *frame*. Berikut ini merupakan contoh matriks SVD berdasarkan asumsi yang telah digunakan sebelumnya.

- Matriks A merupakan matriks dari sinyal awal yang belum terbagi. dengan nilai eigen dari matriks $A^T A$ yaitu λ_i untuk setiap $1 \leq i \leq n$ dengan n merupakan banyak nilai eigen, maka nilai singular matriks A yaitu $\sigma_i \leq \sqrt{\lambda_i}$ dan v_i merupakan vektor eigen matriks $A^T A$ yang bersesuaian dengan nilai λ_i .
- Matriks U merupakan matriks ortonormal yang berukuran $m \times n$. Baris ortonormal U dapat didefinisikan sebagai $u_i = \frac{1}{\sigma_i} A v_i$ untuk setiap $1 \leq i \leq n$.
- Matriks S adalah matriks persegi $n \times n$ dengan jenis matriks diagonal. Dimana selain diagonalnya, matriks tersebut berisi elemen 0.
- Matriks V^T adalah matriks jenis ortonormal $n \times n$. Agar kolom matriks dapat membentuk komponen ortonormal, maka vektor – vektor eigen dari $A^H A$ dapat dinormalisasikan menjadi

$$v_i = \frac{1}{\|x\|} x_i.$$

Proses dekomposisi matriks dengan *Singular ValuenDecomposition* (SVD) dapat dilihat pada Gambar 3.7. Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa sebuah matriks A berukuran $M \times M$ yang telah didapat dari proses sebelumnya, akan didekomposisi menjadi matriks U , matriks S dan matriks V yang berukuran $M \times M$. Bit-bit *watermark* akan disisipkan pada matriks S di setiap diagonalnya agar data *watermark* lebih tahan terhadap serangan. Proses SVD dapat dilihat pada Gambar 3.7.



GAMBAR 3. 7

Dekomposisi matrks A dengan SVD

3. Proses Quantization Index Modulation

Metode penyisipan yang diterapkan adalah *Quantization Index Modulation* (QIM). Dalam QIM, parameter yang mengalami variasi adalah jumlah bit quantization (nbit). Nilai nbit ini memiliki dampak pada nilai yang Δ . Nilai Δ merupakan jarak antar nilai quantisasi dari teknik QIM, nilai tersebut diubah untuk mendapatkan hasil penyisipan terbaik. Adapun persamaan yang digunakan dalam proses penyisipan menggunakan teknik QIM adalah sebagai berikut:

Jika bit *watermark* yang disisipkan adalah '1', maka:

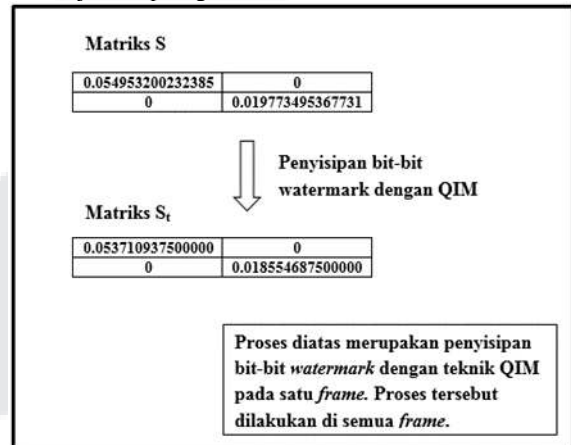
$$S'(a, b) = \left(2k + \frac{1}{2}\right) \Delta \text{ dan } \arg \min |S(a, b) - S'(a, b)| \quad (3.6)$$

Jika bit *watermark* yang disisipkan adalah '0', maka:

$$S'(a, b) = \left(2k - \frac{1}{2}\right) \Delta \text{ dan } \arg \min |S(a, b) - S'(a, b)| \quad (3.7)$$

dimana : $k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ dst

Matriks S yang telah disisipkan bit *watermark* (S_i) ditunjukkan padagambar di bawah ini:



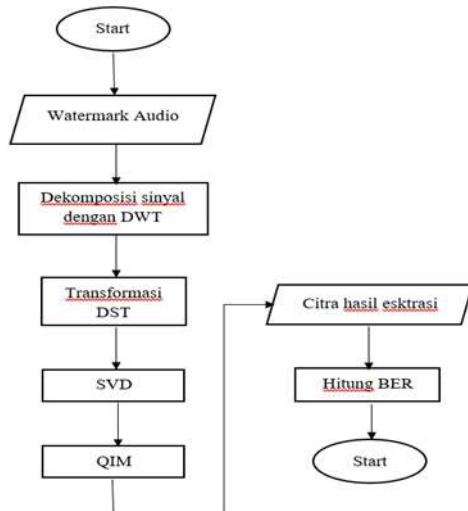
GAMBAR 3. 8

Penyisipan bit watermark dengan QIM

Setelah semua *frame* telah disisipi bit *watermark*, maka matriks persegi diubah kembali menjadi matriks satu dimensi, sehingga dapat dilakukan proses penggabungan setiap *frame* yang telah disisipi bit *watermark* agar menjadi suatu *watermarked audio* (audio yang telah disisipi *watermark*). Kemudian dilakukan proses IDST untuk mengubah sinyal audio ke domain waktu kembali agar dapat didengar dan proses IDWT menggabungkan kembali semua *subband* dari sinyal tersebut. Selanjutnya dilakukan perhitungan nilai *Bit Error Rate* (BER),

Signal to Noise Ratio (SNR), dan Objective Difference Grade (ODG) untuk mengetahui kualitas dari *watermarked audio*.

B. Perancangan Sistem Pengekstraksian



GAMBAR 3.9
Diagram alir proses ekstraksi

Proses ekstraksi merupakan proses pengambilan kembali data *watermark* dari suatu *watermarked audio*, baik sebelum atau setelah mengalami serangan. Ketahanan *watermark* dapat diketahui melalui *watermark* yang telah diekstraksi, berbentuk sempurna atau tidak. Tahapan dari proses ekstraksi digambarkan melalui diagram pada Gambar 3.9.

Proses yang terjadi pada ekstraksi hampir sama dengan proses penyisipan. Gambar 3.9 memaparkan tahapan pada proses ekstraksi yang diawali dengan *watermarked audio*. Audio akan didekomposisi menggunakan DWT sesuai dengan tingkatan yang diinginkan. Kemudian, akan dilakukan Transformasi DST untuk mengubah sinyal audio dari domain waktu ke domain frekuensi. Keluaran dari DST akan diubah ke matriks persegi, yang kemudian akan menjadi *input* dari proses SVD. Matriks persegi didekomposisi menggunakan SVD menjadi 3 matriks yaitu matriks U, S dan V^T yang diilustrasikan seperti pada proses penyisipan. Setelah itu akan dilakukan proses dekuantisasi menggunakan QIM pada diagonal matriks S, dengan persamaan sebagai berikut:

$$\hat{W}_b = \begin{cases} 1, & \text{if } \left| \frac{\hat{c}_k}{\Delta} - \left\lfloor \frac{\hat{c}_k}{\Delta} \right\rfloor - 0.5 \right| < 0.25; \text{ for } k \in G_1 \\ 0, & \text{lainnya} \end{cases} \quad (3.8)$$

Dimana $\hat{c}_k$ adalah koefisien DWT-DST-SVD yang telah dilakukan sebelumnya, dan Δ adalah langkah kuantisasi yang telah dihitung pada proses penyisipan. Setelah itu akan didapat hasil ekstraksi, yang kemudian dihitung BER dan parameter lainnya untuk melihat ketahanan *watermark* tersebut. Beberapa serangan juga dapat dilakukan sebelum proses ekstraksi dilakukan.

C. Parameter Pengujian

Sistem *watermarking* pada tugas akhir ini akan diuji kualitas dari *audio watermarked* dan citra *watermark* dengan menggunakan beberapa parameter, yaitu sebagai berikut:

1. Signal to Noise Ratio (SNR)

Signal to Noise Ratio (SNR) merupakan perbandingan antara kekuatan sinyal dengan kekuatan derau (*noise*). Nilai SNR akan digunakan untuk mengetahui kemiripan antara sinyal audio asli dengan sinyal *watermarked audio*. Nilai SNR yang baik untuk audio adalah > 20 dB [15]. Persamaan untuk menghitung nilai SNR dinyatakan sebagai berikut [12]:

$$SNR = 10 \log \left(\frac{\sum_{i=0}^{L-1} x(i)^2}{\sum_{i=0}^{L-1} |x(i) - x_w(i)|^2} \right) \quad (3.9)$$

Dimana $x(i)$ merupakan sinyal audio asli, dan $x_w(i)$ adalah sinyal *watermarked audio*.

2. Bit Error Rate (BER)

Bit Error Rate (BER) adalah parameter yang digunakan untuk mengukur ketepatan data *watermark* yang telah diekstraksi sesuai dengan data *watermark* awal yang disisipkan ke dalam *file audio*. Persamaan yang digunakan untuk menghitung BER adalah sebagai berikut [13]:

$$BER = \frac{\text{Jumlah karakter yang salah}}{\text{Jumlah karakter yang benar}} \times 100\% \quad (3.10)$$

3. Objective Different Grade (ODG)

Objective Different Grade (ODG) merupakan perhitungan yang membandingkan antara sinyal audio asli dengan sinyal *watermarked audio* berdasarkan pada algoritma *Perceptual Evaluation of Audio Quality* (PEAQ) yang ditentukan dalam ITU-R BS 1387-1. Nilai ODG berkisar antara 1 sampai dengan 4 berdasarkan pada tabel berikut[12]:

TABEL 3.1
Skala ODG berdasarkan ITU-R

Index Nilai	Deskripsi
0	Tidak terdengar
-1.0	Terdengar, tapi tidak mengganggu
-2.0	Sedikit mengganggu
-3.0	Mengganggu
-4.0	Sangat mengganggu

IV. PENGUJIAN DAN ANALISIS

Pada bab ini akan dijelaskan analisis dan pengujian performansi dari audio yang telah diberi *watermark*. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui parameter terbaik untuk menghasilkan *audio watermarking* yang berkualitas setelah dilakukan pengolahan pada *host audio* dan diberikan serangan pada *audio watermarked*. Pada tugas akhir ini akan digunakan *host audio* dengan format *.wav, frekuensi *sampling* 44100 Hz, *watermark* berbentuk citra dengan format .bmp seperti pada Gambar 4.1, dan *channel* suara stereo.



GAMBAR 4.1
Logo Telkom University

Pada pengujian ini digunakan dua jenis *host audio* berbeda, yaitu jenis percakapan dan instrumen musik. *Host audio* yang digunakan, antara lain *voice*, *piano*, dan *don't_speak-no_doubt*. Jumlah total *file audio* yang akan di uji coba sebanyak tiga macam. Uji coba pada simulasi sistem ini dilakukan dengan skenario berikut ini:

1. Pengujian dan analisis pengaruh parameter *audio watermarking* terhadap kinerja sistem tanpa serangan terhadap nilai ODG, SNR, dan BER.
2. Pengujian terhadap *audio watermark* dengan beberapa serangan, seperti *Low Pass Filter*, *Band Pass Filter*, *Noise*, *Resampling*, *Time Scale Modification*, *Linear Speed Change*, *Pitch Shifting*, *Equalizer*, *Echo*, dan Kompresi MP3 terhadap nilai BER.

3. Pengujian terhadap pengaruh parameter *audio watermarking* terhadap kinerja sistem disetiap serangan yang diuji.
4. Uji coba terhadap *audio watermarking* dengan beberapa parameter optimal dengan serangan terhadap BER.

A. Analisis Audio Watermarking Tanpa Serangan

Pada subbab ini akan dilakukan perubahan parameter-parameter yang diawali tanpa serangan pada *audio watermark*. Perubahan parameter yang akan dilakukan meliputi tingkat dekomposisi (N), jumlah bit dalam QIM (nbit), iscpt dan *dither*. Beberapa parameter lainnya sudah ditetapkan seperti, penempatan posisi penyisipan watermark pada metode SVD (posisiw), alfa, panjang bit *header* (Nbsi), panjang kode *header* PNcode (Nblock) dan *threshold* (thr). *Host* audio yang digunakan adalah *voice.wav* (Index=1).

Untuk parameter tetap pada penelitian ini adalah

- Alfa = 0,009
- *Threshold* = 0,009
- Nbsi = 10
- *nblock* = 8

1. Analisis Pengaruh dari iscpt

Nilai iscpt yang dianalisis adalah 0 dan 1, Pengaruh nilai iscpt terhadap BER, ODG, dan SNR dapat dilihat pada Tabel 4.1

TABEL 4. 1
Analisis pengaruh dari iscpt

iscpt	ODG	SNR	BER
0	-3.73	14.81	0.2
1	-3.64	16.01	0.14

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4.1, nilai iscpt berpengaruh terhadap ODG, SNR, dan BER. Pada iscpt bernilai 1 menghasilkan BER yang lebih baik dibandingkan iscpt bernilai 0. Oleh karena itu iscpt bernilai 1 akan digunakan sebagai parameter untuk pengujian berikutnya.

2. Analisis Pengaruh dari *dither*

Nilai *dither* yang dianalisis adalah 0 dan 1. Pengaruh nilai *dither* terhadap BER, ODG, dan SNR dapat dilihat pada Tabel 4.2.

TABEL 4. 2
Analisis pengaruh dari *dither*

<i>dither</i>	ODG	SNR	BER
0	-3.74	14.79	0.23
1	-3.64	16.04	0.11

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4.2, pada *dither* bernilai 1 menghasilkan BER yang lebih baik dibandingkan *dither* bernilai 0. Oleh karena itu *dither* bernilai 1 akan digunakan sebagai parameter pengujian berikutnya.

3. Analisis Pengaruh Jumlah Bit dalam QIM (nbit)

Nilai nbit yang akan dianalisis adalah 1, 2, 3, 4, dan 5. Pengaruh nilai nbit terhadap ODG, SNR, dan BER dapat dilihat pada Tabel 4.3.

TABEL 4. 3
Analisis pengaruh dari nbit

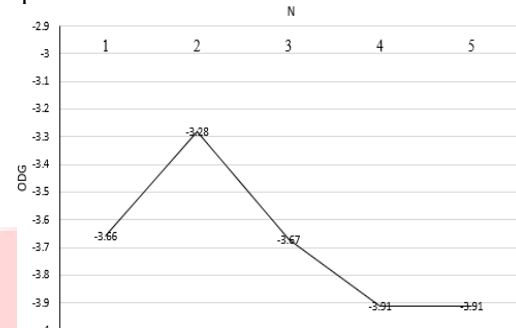
nbit	ODG	SNR	BER
1	-3.64	15.992	0.25
2	-3.64	16.023	0.28
3	-3.57	16.036	0.02
4	-3.64	16.039	0.08
5	-3.64	16.04	0.03

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4.3 semakin kecil nilai nbit semakin besar hasil ODG, SNR dan BER,

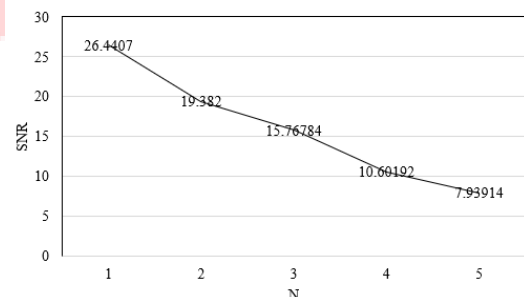
akan tetapi pada nilai nbit = 3 didapatkan hasil yang paling baik yaitu ODG = -3.57, SNR = 16.036, BER = 0.02. Oleh karena itu nilai nbit bernilai 3 akan digunakan sebagai parameter pengujian berikutnya.

4. Analisis Pengaruh Tingkatan Dekomposisi (N)

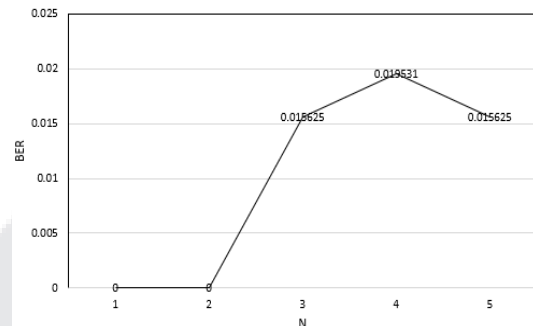
Nilai N yang akan dianalisis adalah 1, 2, 3, 4 dan 5. Pengaruh nilai N terhadap ODG, SNR, dan BER dapat dilihat pada Gambar berikut



GAMBAR 4. 2
Pengaruh N terhadap ODG



GAMBAR 4. 3
Pengaruh N terhadap SNR

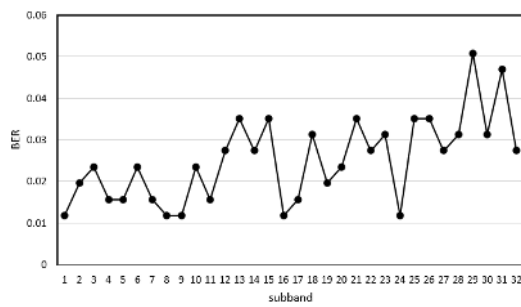


GAMBAR 4. 4
Pengaruh N terhadap BER

Berdasarkan hasil pengujian diatas diketahui semakin besar nilai N maka semakin besar juga nilai ODG dan BER. Sedangkan untuk SNR semakin kecil jika nilai N semakin besar. Untuk itu dipilihlah N = 1 yang akan digunakan sebagai parameter pengujian berikutnya.

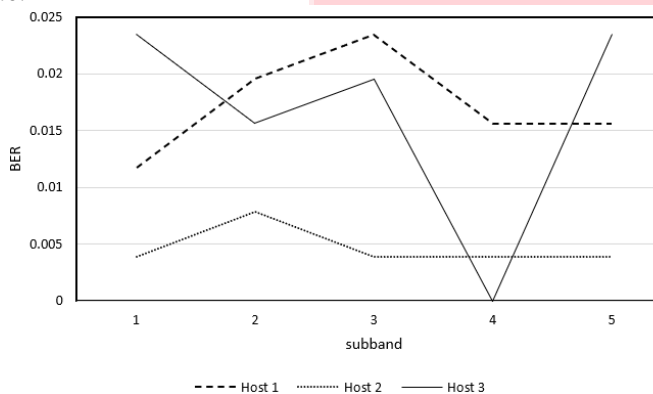
5. Analisis Perubahan *subband*

Nilai *subband* yang akan digunakan adalah 1 sampai 32. Pengaruh nilai *subband* terhadap ODG, SNR dan BER dapat dilihat pada Gambar 4.5.



GAMBAR 4. 5
Pengaruh *subband* terhadap BER

Berdasarkan hasil pengujian pada Gambar 4.5 semakin tinggi nilai *subband* semakin tinggi juga BER. Untuk itu *subband* yang diambil hanya nilai *subband* terkecil yaitu *subband* 1, 2, 3, 4 dan 5. Kemudian dianalisis kembali dengan menggunakan tiga *host* audio seperti pada Gambar 4.6.



Gambar 4. 6 Perubahan *subband* dengan *host* audio

Berdasarkan hasil pengujian pada Gambar 4.6 dapat diketahui bahwa nilai *subband* dengan *host* yang berbeda masih mempunyai hasil yang baik. Diantara *subband* 1 sampai 5, nilai *subband* 3 dianggap yang paling optimal sehingga digunakan untuk pengujian berikutnya.

6. Optimasi Parameter Tanpa Serangan

Setelah menganalisis pengaruh dari masing-masing parameter terhadap kinerja dari *audio watermarking*, parameter yang dipilih adalah parameter yang paling baik untuk pengujian *audio watermarking* terhadap serangan. Parameter optimal dapat dilihat pada Tabel 4.4. Nilai *iscpt* = 1, *dither* = 1, *nbit* = 3, *N* = 1 dan *subband* = 3 akan digunakan untuk analisis ketahanan *audio watermarking* terhadap serangan.

Setelah menganalisis pengaruh setiap parameter pada kinerja *audio watermarking*, parameter yang dipilih adalah parameter terbaik untuk menguji *audio watermarking* terhadap serangan.

Tabel 4. 1
Optimasi parameter tanpa serangan

Parameter	
iscpt	1
dither	1
nbit	3
N	1
subband	3
ODG	-0.07
SNR	14.16
BER	0.02
C	5.38

B. Pengujian dan Analisis Ketahanan Audio Watermarking Terhadap Serangan

Padapengujian ini akan dilakukan optimasi parameter terhadap serangan. Parameter yang optimal ditentukan setelah melakukan serangan terhadap audio yang telah di-*watermark* dengan serangan kompresi MP3 256 kbps. Nilai *iscpt*, *dither*, *nbit*, *N*, dan *subband* dipilih dari Tabel 4.4, sedangkan nilai *N* akan diubah-ubah untuk mendapatkan ODG, SNR, dan BER yang optimal.

Parameter optimal dari pengujian *audio watermarking* terhadap serangan kompresi MP3 256 kbps untuk masing-masing *host* audio dapat dilihat pada Tabel 4.5. Nilai ODG, SNR, dan BER dari pengujian *audio watermarking* terhadap serangan kompresi MP3 256 kbps untuk masing-masing *host* audio dapat dilihat pada Tabel 4.6.

Tabel 4. 2
Parameter optimal terhadap serangan

Host Audio	N	BER
Voice.wav	2	0.441
Voice.wav	3	0.039
Voice.wav	4	0.032
Voice.wav	5	0.027

Tabel 4. 3
Parameter optimal terhadap serangan

Host Audio	ODG	SNR	BER	C
Voice.wav	-0.07	14.16	0.027	5.383
Piao.wav	-0.07	13.66	0	5.383
Don't_speak-no_doubt.wav	-0.07	14.161	0.05	5.383

Berdasarkan Tabel 4.5, Nilai BER terkecil sebesar 0.027344 yang didapatkan dari *N* = 5, maka nilai *N* optimal adalah *N* = 5. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 4.6 dengan nilai ODG sebesar -0.07, Nilai SNR pada rentang 13.66 hingga 14.16, nilai *C* sebesar 5.38 dan nilai BER pada rentang 0 hingga 0.02.

C. Perbandingan dengan Penelitian Terkait

Pada subbab ini akan membahas perbandingan dengan penelitian terkait sebelumnya, yaitu dengan penelitian [14], [22] dan [23]. Parameter yang dibandingkan adalah ODG, SNR dan BER saat sistem audio watermarking diberikan serangan. Berikut adalah tabel hasil perbandingan sistem yang diusulkan pada Tugas Akhir ini dengan penelitian terkait [14], [22] dan [23].

Tabel 4. 4 Perbandingan dengan penelitian terkait

Referensi	ODG	SNR	BER	
			MP3 64k	MP3 128k
[14]	N/A	32.09	0.23	0.205
[22]	-0.08	33	0.12-0.27	0-0.09
[23]	-0.07	10.13	0.084	N/A
Sistem yang diusulkan	-0.07	13.99	0.31	0.05

Pada Tabel 4.7 Skema yang diusulkan memiliki ODG yang sama dengan [23] dan lebih rendah dari [22]. Nilai SNR dari skema yang diusulkan memiliki nilai rata-rata sebesar 13.9965 yang mana lebih rendah dari [14] dan [22], tetapi lebih tinggi dari [23]. Untuk nilai rata-rata BER pada serangan MP3 64k, skema yang diusulkan memiliki nilai

BER yang lebih rendah dibandingkan dengan [14], [22] dan [23]. Sedangkan untuk serangan MP3 128k, skema yang diusulkan memiliki rata-rata nilai BER yang lebih rendah dari [14] dan [22].

V. KESIMPULAN

A. Kesimpulan

Setelah melakukan pengujian *audio watermarking* dengan DST-SVD dan metode QIM terhadap beberapa serangan, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Skema *audio watermarking* menggunakan metode DST-SVD dan QIM dilakukan pengujian tanpa menggunakan serangan menghasilkan nilai rata-rata *Objective Difference Grade* (ODG) sebesar -0.07, nilai rata-rata *Signal to Noise Ratio* (SNR) sebesar 14.1638, nilai rata-rata *Bit Error Rate* (BER) sebesar 0.023438, dan nilai *Capacity* (C) sebesar 5.3833.
2. Ketahanan skema *audio watermarking* diuji dengan menggunakan serangan LPF, kompresi MP3, *equalizer*, *noise*, *resampling*, BPF, *pitch shifting*, *linear speed change*, *time scale modification*, dan *echo*. Hasil dari pengujian tersebut memiliki nilai rata-rata *Bit Error Rate* (BER) sebesar 0.279402 dari 3 host yang berbeda.
3. Skema *audio watermarking* mendapatkan hasil terbaik dengan menggunakan parameter optimal yaitu $nbit = 3$, $N = 5$, $iscpt = 1$, $dither = 1$, dan $subband = 3$.
4. Skema *audio watermarking* yang diusulkan dibandingkan dengan penelitian terkait menunjukkan hasil bahwa skema yang diusulkan memiliki nilai rata-rata BER yang kurang baik pada serangan MP3 64k, akan tetapi memiliki nilai rata-rata yang baik pada serangan MP3 128k.

B. Saran

Pada penelitian ini telah dijelaskan beberapa kendala yang mungkin bisa dikembangkan atau diperbaiki untuk menghasilkan skema *audio watermarking* lebih baik lagi. Oleh karena itu, saran untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Disarankan untuk penelitian selanjutnya menggunakan kombinasi metode lain sehingga menghasilkan nilai BER mendekati nilai 0.

REFERENSI

- [1] Adib, Abdellah. "A high capacity quantization-based audio watermarking technique using the DWPT." *2014 International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS)*. IEEE, 2014.
- [2] K. R. Kakkirala, S. R. Chalamala, and B. M. R. G. "DWT-SVD Based Blind Audio Watermarking Scheme For Copyright Protection," *TCS Innov. Labs, TATA Consult. Serv. Hyderabad, India*, pp. 180–183, 2014.
- [3] Elshazly, A. R., M. M. Fouad, and M. E. Nasr. "Secure and robust high quality DWT domain audio watermarking algorithm with binary image." *2012 seventh international conference on computer engineering & systems (ICCES)*. IEEE, 2012.
- [4] N. V. Lalitha, "DWT-Arnold Transform Based Audio Watermarking," *IEEE Asia Pasific Conf. Postgraduat Res. Microelectron. Electron.*, pp. 196–199, 2013.
- [5] Zhou, Zhiping, and Lihua Zhou. "A novel algorithm for robust audio watermarking based on quantification DCT domain." *Third International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing (IIH-MSP 2007)*. Vol. 1. IEEE, 2007.
- [6] Yassine, Himeur, Boudraa Bachir, and Khelalef Aziz. "A secure and high robust audio watermarking system for copyright protection." *International journal of computer applications* 53.17 (2012): 33-39.
- [7] Suresh, Gulivindala, et al. "An efficient and simple audio watermarking using DCT-SVD." *2012 International Conference on Devices, Circuits and Systems (ICDCS)*. IEEE, 2012.
- [8] Chen, Brian, and Gregory W. Wornell. "Quantization index modulation: A class of provably good methods for digital watermarking and information embedding." *IEEE Transactions on Information theory* 47.4 (2001): 1423-1443.
- [9] Ma, Yi-ping, and Ji-qing Han. "Audio watermarking in DCT: Embedding strategy and algorithm." *ACTA ELECTONICA SINICA* 34.7 (2006): 1260
- [10] Khademi, Nima, et al. "Audio watermarking based on quantization index modulation in the frequency domain." *2007 IEEE International Conference on Signal Processing and Communications*. IEEE, 2007.
- [11] Hu, Hwai Tsu, Szu Hong Chen, and Ling Yuan Hsu. "Incorporation of perceptually energy-compensated qim into dwt-dct based blind audio watermarking." *2014 Tenth International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing*. IEEE, 2014.
- [12] Al-Haj, Ali. "An imperceptible and robust audio watermarking algorithm." *EURASIP Journal on Audio, Speech, and Music Processing* 2014 (2014): 1-12.
- [13] Ambika, D., and V. Radha. "Speech Watermarking Using Discrete Wavelet Transform, Discrete Cosine Transform And Singular Value Decomposition." *Int. J. Comput. Sci. Eng. Technol* 5.11 (2014): 1089-1093.
- [14] Budiman, Gelar, et al. "QIM-based audio watermarking with combined techniques of SWT-DST-QR-CPT using SS-based synchronization." *2018 6th International Conference on Information and Communication Technology (ICoICT)*. IEEE, 2018.
- [15] Thiede, Thilo, et al. "PEAQ-The ITU standard for objective measurement of perceived audio quality." *Journal of the Audio Engineering Society* 48.1/2 (2000): 3-29.
- [16] Ketcham, Mahasak, and Sartid Vongpraphip. "Genetic algorithm audio watermarking using multiple image-based watermarks." *2007 International Symposium on Communications and Information Technologies*. IEEE, 2007.
- [17] Muhaimin, Habibur, et al. "An efficient audio watermark by autocorrelation methods." *2015 International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI)*. IEEE, 2015.

- [18] Firdausy, Kartika, Ikhwan Hawariyanta, and Murinto Murinto. "IMPLEMENTASI WATERMARKING UNTUK PENYEMBUNYIAN DATA PADA CITRA DALAM DOMAIN FREKUENSI MENGGUNAKAN DISCRETE COSINE TRANSFORM." *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)* 4.1 (2006): 19-26.
- [19] Puja, A., and A. Khurshid. "Novel invisible watermarking for various images using HWT-GA-PSO based hybrid optimization." *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering* 3.8 (2013): 1093-1101.
- [20] Aryani, Fitri, and Dewi Yulianti. "Aplikasi Metode Singular Value Decomposition (SVD) Pada Sistem Persamaan Linier Kompleks." *SITEKIN: Jurnal Sains, Teknologi dan Industri* 10.1 (2012): 67-76.
- [21] Adriansyah, Yayan. "Aplikasi watermark pada citra digital menggunakan metode Singular Value Decomposition (SVD)." (2011)..
- [22] Fallahpour, Mehdi, and David Megias. "DWT-based high capacity audio watermarking." *IEICE transactions on fundamentals of electronics, communications and computer sciences* 93.1 (2010): 331-335.
- [23] Putri, Fredara Sista, Gelar Budiman, and Ledya Novamizanti. "Analisa Dan Perancangan Audio Watermarking Hybrid Smm Dan Qim Pada Domain Swt Dengan Ct Dan Kombinasi Dst-svd-cpt." *eProceedings of Engineering* 7.2 (2020).