

Optimasi Sistem Penyembunyian Data pada Audio menggunakan *Sub-band* Stasioner dan Manipulasi Rata-rata Statistik

LEDYA NOVAMIZANTI, GELAR BUDIMAN, BHISMA ADI WIBOWO

Program Studi S1 Teknik Telekomunikasi, Telkom University
Email : ledyaldn@telkomuniversity.ac.id

Received 11 April 2018 | *Revised* 8 Mei 2018 | *Accepted* 17 Mei 2018

ABSTRAK

Kasus pelanggaran hak cipta musik atau lagu menjadi masalah dan mendapat perhatian serius oleh industri musik di Indonesia. Teknik audio watermarking merupakan salah satu solusi untuk melindungi hak cipta audio digital dari tindakan ilegal dengan cara menyembunyikan watermark berupa identitas pemilik ke dalam audio tersebut. Pada penelitian ini, audio host diubah menjadi matriks 1-dimensi untuk proses framing. Selanjutnya Stationary Wavelet Transform (SWT) digunakan untuk mendapatkan sub-band stasioner terpilih yang akan disisipkan watermark. Metode Statistical Mean Manipulation (SMM) akan menghitung rata-rata host audio dalam satu frame, dan dilakukan proses penyisipan bit. Optimasi dilakukan dengan melakukan evaluasi parameter yang menghasilkan BER paling tinggi setelah sistem diberikan serangan. Hasil dari optimasi diperoleh suatu sistem audio watermarking yang kuat dan tahan terhadap gangguan signal, dengan rata-rata BER 0.113, SNR 31 dB, ODG -0.6, dan MOS 4.6.

Kata kunci: *audio watermarking, SWT, SMM, optimasi*

ABSTRACT

The case of copyright infringement of music or song becomes a serious problem in Indonesia. Audio watermarking technique is one solution to protect the music copyright of digital audio from illegal acts by hiding the watermark in the form owner's identity into the audio. The workings of audio watermarking is to embed the watermark in the form owner's identity into the audio. In this study, the audio host is converted into a 1-dimensional matrix for the framing process. Furthermore Stationary Wavelet Transform (SWT) used to obtain stationary sub-bands selected to be inserted watermark. Statistical methods Mean Manipulation (SMM) will calculate the average host audio in one frame, and do bits insertion process. Optimization is done by evaluating the parameters that produce the highest BER after the system is given an attack. The results of the optimization obtained an audio watermarking system that is robust and resistant to signal interference, with the average BER 0.113, SNR 31 dB, ODG -0.6, and MOS 4.6.

Keywords: *audio watermarking, SWT, SMM, optimization*

1. PENDAHULUAN

Pesatnya perkembangan dalam teknologi komputer dan internet membuat sejumlah besar media dikonversi ke bentuk digital. Ditambah pula dengan hadirnya teknologi internet yang memberikan kemudahan dalam mengakses informasi digital. Namun dari sisi pencipta karya, kedua teknologi tersebut dapat meningkatkan ancaman pembajakan dan hak cipta (**Saini & Shrivastava, 2014**). Saat ini musik dengan mudah dapat dinikmati melalui data audio yang tersebar di internet maupun media lainnya. Menurut IFPI (*International Federation of the Phonographic Industry*), industri rekaman musik kehilangan miliaran dolar setiap tahun karena penyalinan dan distribusi file audio secara ilegal (**Dutt, 2015**). Salah satu solusi dari perlindungan hak cipta musik berupa data audio digital dari tindakan ilegal yaitu audio *watermarking*. Audio *watermarking* adalah proses penyembunyian informasi (watermark) ke dalam file audio sebagai sinyal *host*. *Watermark* yang tersembunyi pada file audio tersebut memiliki tantangan yang baik karena persepsi kemampuan mendengar manusia yang terbatas (**Bender & dkk, 1996**) disebut *human auditory system* (HAS). Fakta ini menyebabkan banyak penelitian dalam pemrosesan audio menggunakan karakteristik HAS, seperti *watermarking* audio dan kompresi audio. *Watermark* disisipkan ke dalam sinyal *host* sedemikian rupa sehingga tidak dapat dipisahkan dari sinyal *host* dan tahan terhadap operasi pengolahan sinyal apa pun tanpa mengurangi performansi dari sinyal *host* (**Husain, 2012**).

Sistem audio *watermarking* yang dirancang oleh Chi-Man Pun dan Xiao-Chen Yuan menggunakan metode SWT dan RASE. Pada penelitian tersebut membuktikan bahwa metode SWT memiliki keunggulan pergeseran invarian yang mampu membantu lokasi segmen RASE yang bergeser akibat serangan. Ketahanan yang tinggi dapat dicapai dengan menyisipkan watermark pada koefisien aproksimasi domain SWT (**Pun & Yuan, 2013**). Perancangan sistem audio *watermarking* yang dilakukan oleh Cui Delong dan tim nya menggunakan metode *Normed Centre of Gravity* (NCG) dan SWT. Hasil dari penelitian tersebut menunjukkan bahwa skema audio *watermarking* yang dirancang memiliki ketahanan yang baik terhadap serangan sinyal processing biasa maupun de-sinkronisasi. SWT terbukti memiliki keunggulan dalam ketahanan audio *watermarking*, hanya saja metode NCG digunakan hanya untuk watermark berbasis citra (**Delong & dkk, 2014**). Penelitian Ching-Tang Hsieh dan Pei-Ying Tsou menggunakan metode *Discrete Fourier Transform* (DFT) dan *Statistical Mean Manipulation* (SMM) pada perancangan sistem audio *watermarking*. *Watermark* yang disisipkan pada domain ceptrum dengan menggunakan metode SMM memiliki ketahanan yang sangat baik. Hanya saja pada penelitian tersebut kapasitas frame yang dihasilkan terbatas sehingga informasi yang akan disisipkan pun menjadi terbatas (**Hsieh & Tsou, 2002**). Optimasi dengan cara evaluasi parameter pada serangan yang menghasilkan performansi sistem audio *watermarking* paling buruk telah dilakukan oleh Budiman dkk (**Budiman & dkk, 2018**). Dari penelitian tersebut diperoleh bahwa metode tersebut dapat meningkatkan kualitas dari *host audio* dan ekstraksi *watermark* yang disisipkan pada *host audio* yang sudah diserang.

Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan perancangan sistem audio *watermarking* menggunakan metode SWT untuk mendapatkan sub-band stasioner terpilih yang akan disisipkan *watermark*. Metode SMM akan menghitung rata-rata *host audio* dalam satu *frame*, dan dilakukan proses penyisipan bit *watermark*. Optimasi dilakukan dengan melakukan evaluasi parameter pada lima serangan yang menghasilkan BER paling tinggi. Teknik *watermarking* ini diimplementasikan menggunakan lima buah data audio berformat .wav dengan *genre* yang berbeda, dan sebuah citra biner sebagai data watermark yang akan disisipkan ke dalam audio. Diharapkan bahwa optimasi yang diterapkan pada sistem audio *watermarking* akan menghasilkan suatu sistem *watermarking* yang kuat dan tahan terhadap serangan gangguan signal.

1.1. Audio watermarking

Audio *watermarking* merupakan proses penyisipan data informasi kedalam suatu sinyal audio tanpa merusak atau mengubah kualitas dari audio tersebut. *Watermarking* dipasang pada audio untuk membuktikan kepemilikan dari audio tersebut serta perlindungan informasi yang disisipkan (**Chauhan & Risvi, 2013**). Karena sinyal audio hanya berisi data satu dimensi dan sistem pendengaran manusia lebih sensitif daripada sistem visual, maka lebih sulit menyembunyikan informasi tambahan ke sinyal audio daripada ke data multimedia lainnya, tanpa menurunkan kualitas objek media (**Chincholkar & dkk, 2017**).

Kriteria dari metode audio *watermarking* adalah sebagai berikut (**Hartung & Kutter, 1999**):

- Imperceptibility*, artinya watermark yang telah tersisip sebagai informasi pemilik harus tidak terdengar dalam sinyal audio terwatermark. Sehingga harus tidak menurunkan kualitas sinyal *host* audio. Parameter dari *imperceptibility* adalah Signal to Host Ratio (SNR), *Objective Different Grade* (ODG) dan *Subjective Different Grade* (SDG).
- Ketahanan (Robustness), artinya watermark harus mampu menangani segala macam serangan pemrosesan sinyal, seperti: low-pass filtering, kompresi MP3, penambahan *echo*, *host* dan bentuk serangan lainnya (**Kiah, 2011**). Parameter dari ketahanan adalah Bit Error Rate (BER).
- Payload*, menunjukkan berapa banyak bit watermark yang dapat disisipkan ke dalam *host* audio per satuan waktu. Parameter dari payload adalah Capacity (C).

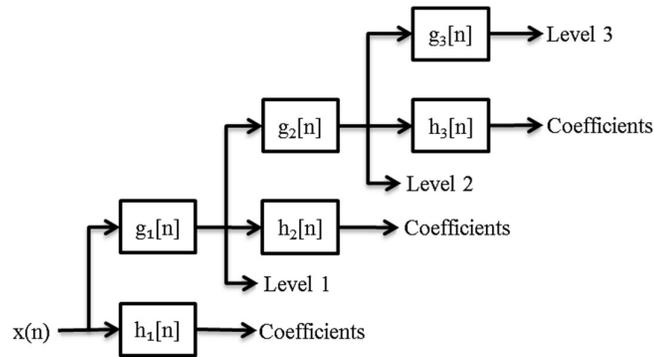
Metode audio *watermarking* dapat dibagi menjadi dua domain, sebagai berikut (**Rashid, 2016**):

- Domain Spasial
Pada teknik audio *watermarking*, domain spasial watermark langsung disisipkan pada domain waktu tanpa transformasi apapun. Teknik ini sangat mudah untuk diterapkan dan memerlukan lebih sedikit perhitungan dibandingkan dengan domain frekuensi. Namun domain spasial memiliki ketahanan yang kurang baik.
- Domain Frekuensi
Pada teknik audio *watermarking*, watermark yang disisipkan dalam domain frekuensi melalui berbagai macam transformasi. Teknik ini sedikit rumit untuk diterapkan dan memerlukan lebih banyak perhitungan dibandingkan dengan domain spasial. Kelebihan dari domain frekuensi yaitu memiliki ketahanan yang jauh lebih baik.

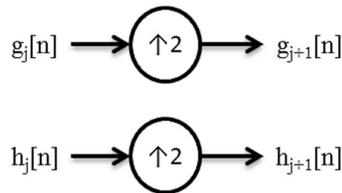
1.2. Stationary Wavelet Transform (SWT)

Stationary Wavelet Transform (SWT) merupakan algoritma pada transformasi *wavelet* yang dirancang untuk mengatasi kelemahan pergeseran *invariant* pada transformasi lain. Pergeseran invarian dari SWT dapat digunakan untuk menghindari kemungkinan bahwa lokasi informasi yang diekstrak mungkin sedikit bergeser karena serangan, seperti *Time Scale Modification* (TSM). SWT hampir identik dengan *Discrete Wavelet Transform* (DWT) dalam hal struktur dekomposisi. Karena SWT tidak menggunakan down-sampling melainkan up-sampling, maka sub-band akan memiliki ukuran yang sama dengan *host* audio input (**Pun & Yuan, 2013**). Gambar 1 menunjukkan cara kerja dari sistem SWT untuk 3 level dekomposisi. Sinyal SWT dari sinyal x dihitung saat melewati sinyal di beberapa filter. Sampel sinyal akan masuk melalui *Low Pass Filter* (LPF) dengan respon impuls g yang akan menghasilkan konvolusi keduanya (**Al-Haj, 2011**).

$$y[n] = (x * g)[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k)g[n - k] \quad (1)$$



Gambar 1. Diagram Blok SWT dengan 3 Level Dekomposisi



Gambar 2. Up-sampling pada SWT

Selanjutnya sinyal akan didekomposisi secara simultan dengan menggunakan *High Pass Filter* (HPF) h . Kemudian hasil dari kedua penyaringan tersebut akan menghasilkan koefisien detail dan koefisien aproksimasi. Karena setengah frekuensi sinyal telah dihapus, maka setengah sampel dapat dibuang sesuai dengan aturan Nyquist. Hasil filter kemudian di subsampel oleh 2 (Zeng, 2012):

$$y_{low}[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k]g[n - k] \quad (2)$$

$$y_{high}[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k]h[n - k] \quad (3)$$

Setelah diperoleh koefisien SWT, maka invers SWT (ISWT) dapat dihitung untuk mengembalikan sinyal dekomposisi ke sinyal aslinya dengan menggunakan rumus berikut ini (Zeng, 2012):

$$x[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} y_{high}[k] h[n - k] + y_{low}[k] g[n - k] \quad (4)$$

1.3. Statistical Mean Manipulation (SMM)

Statistical Mean Manipulation (SMM) merupakan suatu metode penanaman *watermark* pada *host audio*, dengan cara menghitung rata-rata (mean) *host audio* dalam 1 *frame*. SMM merupakan metode penyisipan yang menyisipkan bit *header* yang disinkronisasi kedalam *host audio* sehingga menjadi *audio* yang ter-*watermark* (Vivekananda & dkk, 2008).

Kehandalan dari *watermark* bergantung pada nilai α . Untuk mendeteksi *watermark* koefisien μ , dihitung dan dibandingkan dengan ambang batas yang telah ditetapkan. Hal ini dikarenakan koefisiennya adalah sekitar 10^{-4} , yang cukup kecil untuk perbandingan tersebut. Berikut formula SMM untuk teknik penyisipan (Wen & dkk, 2009):

$$x_w(n) = \begin{cases} x(n) - \mu_x + \alpha \cdot w_i, & \text{jika } w_i = 1 \\ x(n) - \mu_x - \alpha \cdot w_i, & \text{jika } w_i = 0 \end{cases} \quad (5)$$

dimana $x(n)$ adalah sinyal audio *host*, μ_x adalah rata-rata sinyal $x(n)$ dari satu frame, α adalah faktor modifikasi rata-rata pada SMM, w_i adalah *watermark* bit *sync*, dan $x_w(n)$ adalah audio yang telah ter-*watermark*.

Selain digunakan untuk proses penyisipan (*embedding*), SMM juga digunakan untuk proses ekstraksi *watermark*. Ekstraksi merupakan proses pengambilan kembali data inti atau data yang paling penting yang ada pada *watermark*. SMM untuk ekstraksi hampir sama dengan *embedding* hanya perbedaannya adalah yang dihitungnya merupakan audio yang sudah ter-*watermark* (Hsieh & Tsou, 2002).

Berikut formula SMM untuk teknik ekstraksi (Hsieh & Tsou, 2002):

$$x(n) = \begin{cases} x_w(n) - \mu_{x_w} + \alpha \cdot w_i, & \text{jika } w_i = 1 \\ x_w(n) - \mu_{x_w} - \alpha \cdot w_i, & \text{jika } w_i = 0 \end{cases} \quad (6)$$

1.4. Serangan pada Audio *Watermarking*

Serangan pada *watermarking* bertujuan untuk menguji ketahanan dari teknik *watermarking* tersebut. Serangan diberikan pada *watermarked audio* sebelum melewati proses ekstraksi *watermark*. Ketahanan audio *watermarking* dapat dilihat dari beberapa parameter seperti: SNR, ODG, dan BER. Jenis serangan yang digunakan pada *audio watermarking* adalah sebagai berikut (Harahap & dkk, 2016):

- Filtering*, adalah proses menyaring frekuensi tertentu pada data audio digital. Frekuensi yang akan disaring ditentukan dari frekuensi cut-off. Komponen sinyal yang dibutuhkan akan dilewatkan dan yang tidak dibutuhkan akan diredam. *Filtering* yang digunakan, yaitu *Low Pass Filter* (LPF), dan *Band Pass Filter* (BPF). LPF merupakan jenis filter yang melewatkan sinyal frekuensi rendah dan melemahkan sinyal frekuensi tinggi, frekuensi di atas frekuensi cut-off tidak dilewatkan.
- host* atau derau, merupakan serangan dengan menambahkan sinyal gangguan (*host*) ke data audio digital, seperti *White host*, *Pink host*, dan *Gaussian host*.
- Resampling* adalah pengubahan frekuensi sampling pada sinyal asli (*host* audio) dengan frekuensi baru yang ditentukan, kemudian dikembalikan lagi ke frekuensi sampling awal.
- Time Scaling Modification* (TSM), adalah perubahan skala waktu pada file audio.
- Linear Speed change*, merupakan serangan dengan meningkatkan dan menurunkan kecepatan audio tanpa mengubah pitch sinyal.
- Pitch Shifting*, adalah gangguan dengan menggeser frekuensi dari *watermarked audio*.
- Equalizer*, adalah penyesuaian keseimbangan dengan amplitudo = 0.5
- Echo*, adalah suara kiriman yang direfleksikan kembali ke pengirim/ asalnya dengan cukup kuat sehingga dapat dibedakan dari suara asli. Caranya dengan memberikan delay *echo* pada sinyal audio sebesar 0.3
- Kompresi adalah proses untuk memperkecil ukuran data digital dengan mengubah bit rate data tersebut. Semakin kecil bit rate suatu data, maka akan semakin kecil ukurannya.

1.5. Parameter Performansi Sistem

Untuk mengevaluasi penelitian ini, diperlukan parameter-parameter untuk menilai performansi sistem audio *watermarking*. Parameter performansi sistem audio *watermarking* tersebut antara lain *Signal to Host Ratio* (SNR), *Objective Different Grade* (ODG), *Bit Error Rate* (BER), dan *Mean Opinion Score* (MOS).

1.5.1. *Signal to Host Ratio (SNR)*

SNR digunakan untuk mengukur kualitas audio secara obyektif, dengan melakukan perbandingan antara audio ter-*watermark* $x_w(n)$ dengan *host* audio $x(n)$. Satuan yang digunakan untuk nilai SNR adalah decibel (dB). Suatu audio dinyatakan bagus kualitasnya jika $SNR > 20$ dB. Persamaan yang digunakan dalam perhitungan SNR adalah (Pun & Yuan, 2013):

$$SNR = 10 \log_{10} \frac{\sum_{i=0}^{N-1} x^2(n)}{\sum_{i=0}^{N-1} [x_w(n) - x(n)]^2} \quad (7)$$

dimana: N adalah panjang audio

1.5.2. *Bit Error Rate (BER)*

BER merupakan suatu parameter yang akan digunakan untuk penilaian obyektif. Tujuan dari BER agar *host audio* dan ekstraksi *watermark* yang disisipkan pada *host audio* yang sudah diserang dapat diketahui keutuhannya. BER dihitung dengan cara menghitung persentase bit yang salah dari hasil ekstraksi dengan bit keseluruhan sebelum proses penyisipan dilakukan. Persamaan BER dirumuskan sebagai berikut (Zhao & dkk, 2015):

$$BER = \frac{\text{Jumlah Total Bit Error}}{\text{Jumlah Total Bit}} \times 100\% \quad (8)$$

1.5.3. *Objective Different Grade (ODG) dan Subjective Different Grade (SDG)*

Objective Different Grade (ODG) dan *Subjective Different Grade (SDG)* merupakan pengukuran imperceptibility berdasarkan standar ITU-R BS.1387-1. ODG dihitung melalui perhitungan kompleks pada pemrosesan sinyal audio berbasis yang bernama PEAQ (Perceptual Evaluation of Audio Quality). Pada pengukuran lain tetapi memiliki relasi yang linear, skala SDG memiliki rentang nilai dari 1 hingga 5. SDG bertujuan untuk mengetahui tingkat kualitas audio yang sudah disisipkan watermark berdasarkan indera pendengaran manusia. SDG diperoleh dari 30 responden, dengan membandingkan perubahan yang terjadi pada audio sebelum dan sesudah disisipi watermark, kemudian diberi nilai 1 hingga 5 (Budiman & dkk, 2016). Pada Tabel 1 dapat dilihat bahwa semakin besar skala ODG dan SDG, maka semakin bagus kualitas audio yang diperoleh.

Tabel 1. *Objective Different Grade (ODG)*

Skala ODG	Skala SDG	Kualitas	Deskripsi
-4	1	Sangat Buruk	Watermark sangat mengganggu
-3	2	Buruk	Watermark mengganggu
-2	3	Cukup	Watermark sedikit mengganggu
-1	4	Baik	Watermark terdengar, tetapi tidak mengganggu
0	5	Sangat Baik	Watermark tidak terdengar

2. METODOLOGI PENELITIAN

Tujuan dari penelitian ini adalah mengimplementasikan suatu teknik *watermarking* pada data audio digital berbasis *Stationary Wavelet Transform (SWT)* dan *Statistical Mean Manipulation (SMM)*, yang dapat melindungi hak cipta data digital dari tindakan ilegal. Untuk mencapai tujuan tersebut, metodologi dalam penelitian ini terdiri dari beberapa tahap yaitu:

1. Identifikasi masalah penelitian

Pada tahap ini dilakukan identifikasi dari permasalahan dan pematangan konsep dengan studi literatur yang sesuai dengan topik penelitian. Penelitian yang telah dilakukan terdahulu dapat menjadi rujukan penting agar mendapatkan benang merah dalam melaksanakan penelitian sesuai *roadmap*-nya. Studi literatur yang dipelajari pada pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Teknik *audio watermarking*
- b. *Stationary Wavelet Transform (SWT)*
- c. *Statistical Mean Manipulation (SMM)*
- d. Serangan pada *audio watermarking*
- e. Performansi sistem *audio watermarking*

2. Pengumpulan Data

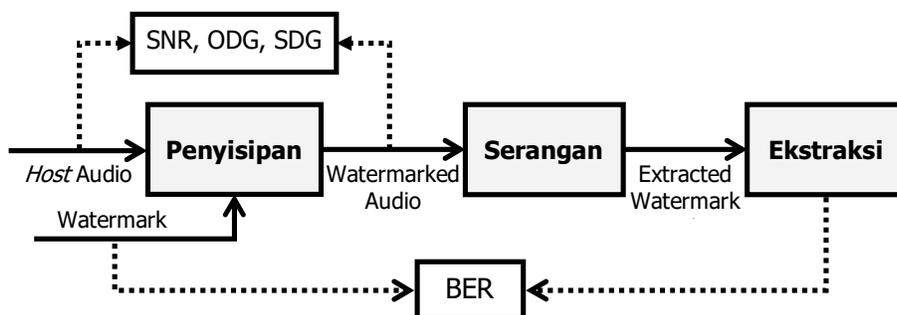
File yang akan digunakan sebagai *host* adalah *audio* mono dengan format *.wav*, frekuensi *sampling* 44100 Hz, dan berdurasi 4-10 detik. Durasi audio bergantung pada ukuran watermark yang disisipkan. Terdapat 5 jenis *file audio* yang digunakan yaitu, *speech* (*host.wav*), instrument piano (*piano.wav*), instrument gitar (*gitar.wav*), instrument drum (*drums.wav*), dan instrument bass (*bass.wav*). Pesan yang dijadikan *watermark* adalah sebuah citra digital biner dengan resolusi 10x10 pixel.



Gambar 3. Citra *Watermark*

3. Perancangan Sistem

Terdapat dua buah skema rancangan yang digunakan yaitu proses penyisipan dan proses ekstraksi. Proses penyisipan bertujuan untuk menyisipkan *watermark* kedalam *host audio*, sedangkan proses ekstraksi bertujuan untuk mengambil kembali watermark yang telah disisipkan agar dapat terdeteksi. Pada sistem *audio watermarking* yang di rancang, pertama-tama dilakukan proses penyisipan pesan watermark ke dalam *host audio*. Audio yang telah diberi *watermark*, diuji dengan beberapa serangan, dan diekstraksi. Selanjutnya diperoleh kualitas pesan yang dihasilkan. Model sistem yang diajukan pada penelitian ini secara umum digambarkan pada diagram berikut :

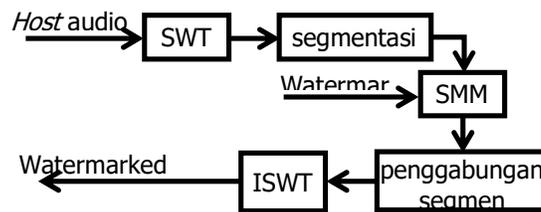


Gambar 4. Sistem *Audio Watermarking* Secara Umum

Pada penelitian ini, dilakukan proses penyisipan *watermark* berupa logo citra biner berukuran 10x10 ke dalam *host audio*. Gambar 5 menunjukkan diagram blok proses penyisipan.

Langkah-langkah dalam proses penyisipan dijelaskan sebagai berikut :

- Langkah 1: Baca *file host audio* $x(n)$, dan *watermark* $w(n)$. Masing-masing diubah ukurannya kedalam ukuran 1 dimensi. Ukuran *watermark* menjadi 1×100 .
- Langkah 2: Lakukan perhitungan SWT pada *host audio* dengan menggunakan persamaan (1). Metode SWT digunakan untuk mengubah domain waktu kedalam domain frekuensi sehingga dapat mempermudah proses penyisipan. Kemudian dihasilkan output sesuai level dekomposisi dari $x(n)$ dalam bentuk beberapa *sub-band*. Output tersebut berupa $x_{low}(n)$ dan $x_{high}(n)$ yang dihitung menggunakan persamaan (2) dan (3). Selanjutnya pilih *sub-band* yang akan disisipkan *watermark*.



Gambar 5. Diagram Blok Proses Penyisipan

- Langkah 3: Lakukan segmentasi berupa *framing* pada *sub-band* terpilih yang akan disisipkan Rumus untuk menghitung panjang *frame* adalah:

$$N_{frame} = \frac{\text{panjang host}}{\text{panjang watermark}} \quad (9)$$

- Langkah 4: Hitung μ_x , yaitu rata-rata sinyal $x(n)$ pada tiap frame. Lakukan penyisipan bit *watermark* $w(n)$ ke dalam *host audio* dengan metode SMM pada persamaan (5), sehingga menghasilkan $x_w(n)$.
- Langkah 5: Lakukan penggabungan seluruh frame hasil penyisipan.
- Langkah 6: Lakukan perhitungan invers SWT (ISWT) untuk mengembalikan sinyal pada domain waktu. Gunakan persamaan (4) pada setiap *sub-band* sehingga menghasilkan *watermark audio* $x_w(n)$.



Gambar 6. Diagram Blok Proses Ekstraksi

Proses ekstraksi merupakan proses pengambilan kembali data *watermark* dari suatu *watermarked audio*. Gambar 6 menunjukkan diagram blok proses ekstraksi. Langkah-langkah dalam proses ekstraksi dijelaskan sebagai berikut :

- Langkah 1: Baca file *watermarked audio* $x_w(n)$.
- Langkah 2: Lakukan perhitungan SWT pada *watermarked audio* dengan menggunakan persamaan (1-3), sehingga menghasilkan $\hat{x}_w(n)$.
- Langkah 3: Lakukan segmentasi pada *sub-band* yang mengandung watermark dengan ukuran N_{frame} sampel/segmen.
- Langkah 4: Hitung μ_{x_w} yaitu rata-rata sinyal audio yang telah ter-*watermark*, $\hat{x}_w(n)$. Lakukan proses ekstraksi pada $\hat{x}_w(n)$ dengan menggunakan SMM pada segmen *host audio*. Persamaan (7) digunakan untuk mendapatkan kembali *host audio*. Bit *watermark* yang telah disisipkan pada proses

penyisipan diperoleh dengan persamaan 10 (Hsieh & Tsou, 2002).

$$\hat{w}_i(n) = \begin{cases} 0, & \text{jika } \mu_{x_w} < 0 \\ 1, & \text{jika } \mu_{x_w} \geq 0 \end{cases} \quad (10)$$

Setelah proses ekstraksi selesai, dapat dihitung nilai BER antara watermark sebelum ekstraksi $w(n)$ dengan *watermark* setelah ekstraksi $\hat{w}(n)$.

4. Pengujian dan analisis performansi sistem
 Pengujian parameter yang dilakukan antara lain : pengaruh level dekomposisi (N), jumlah *frame* (N *Frame*), nilai *threshold*, dan nilai α terhadap performansi sistem *audio watermarking*, yaitu: ODG, SNR, BER, dan C. Pengujian selanjutnya dilakukan uji serangan untuk mengetahui tingkat ketahanan sistem *watermarking* terhadap tindak perusakan yang mungkin terjadi pada implementasinya. Serangan yang digunakan pada penelitian ini yaitu LPF, BPF, *host*, resampling, time scale modification, linier speed change, pitch shifting, *echo*, dan kompresi. Pengujian secara subjektif dilakukan berupa survei SDG menggunakan 30 orang koresponden, dengan membandingkan audio asli dengan *watermarked audio* untuk mendukung analisis dari kualitas sistem audio *watermarking*.
5. Optimasi Sistem
 Selanjutnya dilakukan optimasi terhadap *host audio* yang memiliki kerusakan terparah ketika diserang. Optimasi ini dilakukan dengan cara mengevaluasi parameter yang digunakan hingga mendapatkan ODG, SNR, dan BER yang paling optimal. Setelah diperoleh parameter optimal, maka parameter tersebut diuji terhadap seluruh serangan dan seluruh audio *host* untuk mendapatkan performansi sistem. Sehingga diperoleh parameter terbaik yang memiliki ODG, SNR, dan BER paling optimal.

3. HASIL DAN DISKUSI

3.1. Pengujian Parameter Sistem

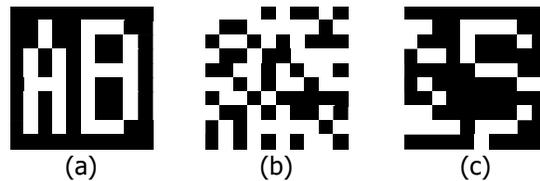
1. Uji Parameter Level Dekomposisi (N)

Nilai N menunjukkan banyaknya dekomposisi yang dilakukan oleh SWT. Semakin banyak level dekomposisi artinya semakin banyak juga pembagian frekuensi yang dilakukan. Pada pengujian ini, digunakan sampel audio *host.wav* dengan nilai N dari 1 sampai 5, parameter $N_{frame}=2048$, $thr=0,1$, dan $\alpha=0,001$.

Tabel 2. Pengaruh Nilai N Terhadap ODG, SNR, BER, dan C

N	ODG	SNR	BER	C
1	0,0899	30,3183	0	21,53
2	0,1167	30,5951	0,49	21,53
3	0,1365	30,7576	0,25	21,53
4	0,1446	30,8532	0,51	21,53
5	0,1498	30,9101	0,41	21,53

Hasil pada Tabel 2 menunjukkan bahwa level dekomposisi (N) berpengaruh terhadap ODG, SNR, dan BER. Namun tidak berpengaruh terhadap Capacity (C). Pada level dekomposisi, N=1 memberikan hasil BER yang diharapkan, yaitu 0. Artinya hasil ekstraksi dari *watermarked audio* dapat utuh kembali, sama dengan kondisi sebelum watermark disisipkan pada *host audio*. Pada Gambar 7 menunjukkan citra hasil ekstraksi pada beberapa nilai N, dari 1 hingga 4. Sehingga parameter N=1 digunakan untuk pengujian parameter berikutnya.



Gambar 7. Pengaruh Nilai N terhadap Citra Hasil Ekstraksi (a) N=1, (b) N=2, (c) N=3

2. Uji Parameter Panjang *Frame* (Nframe)

Pada pengujian ini, digunakan sampel audio *host.wav* dengan menggunakan parameter yang diperoleh dari pengujian sebelumnya yaitu, $N=1$, $thr=0,1$, dan $\alpha=0,001$.

Tabel 3. Pengaruh Nframe terhadap ODG, SNR, BER, dan C

Nframe	ODG	SNR	BER	C
128	-2,9701	3,0108	0	544,53
256	-3,4071	9,3998	0	172,27
512	-1,4374	16,2873	0	86,13
1024	-0,2595	24,8645	0	43,07
2048	0,0899	30,3183	0	21,53
4096	0,1603	36,3947	0	10,77
8192	0,1646	37,5896	0	5,38

Hasil pada Tabel 3 menunjukkan bahwa nilai Nframe berpengaruh terhadap nilai ODG, SNR, dan C. Namun tidak berpengaruh terhadap BER. Semakin besar Nframe maka semakin baik nilai ODG dan SNR yang dihasilkan, namun banyak bit *watermark* yang dapat disisipkan ke dalam *host audio* semakin berkurang. Sehingga parameter Nframe=2048 digunakan untuk pengujian parameter berikutnya, karena menghasilkan nilai SNR dan ODG yang paling baik.

3. Uji Parameter *Threshold*

Nilai *threshold* akan menentukan nilai daya yang dapat dipilih sebagai lokasi penyisipan. Pada pengujian ini, digunakan sampel audio *host.wav* dengan menggunakan parameter yang diperoleh dari pengujian sebelumnya yaitu, $N=1$, Nframe=2048, dan $\alpha=0,001$. Hasil pada Tabel 4 menunjukkan bahwa parameter *threshold* tidak mempengaruhi performansi sistem.

Tabel 4. Pengaruh *Threshold* terhadap ODG, SNR, BER, dan C

thr	ODG	SNR	BER	C
0,001	0,0899	30,3183	0	21,53
0,01	0,0899	30,3183	0	21,53
0,1	0,0899	30,3183	0	21,53
1	0,0899	30,3183	0	21,53

4. Uji Parameter Alfa

Parameter alfa merupakan faktor penggeser rata-rata yang akan berpengaruh terhadap metode pengisian SMM. Pada pengujian ini, digunakan sampel audio *host.wav* dengan menggunakan parameter yang diperoleh dari pengujian sebelumnya yaitu, $N=1$, Nframe=2048, dan $thr=0,1$.

Tabel 5. Pengaruh Alfa terhadap ODG, SNR, BER, dan C

alfa	ODG	SNR	BER	C
0,001	0,0961	30,3141	0	21,53
0,002	0,0299	29,0987	0	21,53
0,003	-0,0279	27,7074	0	21,53
0,004	-0,1117	26,3369	0	21,53
0,005	-0,1801	23,8983	0	21,53

Pada Tabel 5 menunjukkan bahwa nilai alfa berpengaruh terhadap ODG dan SNR. Namun tidak berpengaruh terhadap BER dan kapasitas bit *watermark*. Semakin besar nilai alfa yang digunakan maka semakin buruk nilai ODG dan SNR yang dihasilkan. Sehingga parameter alfa=0,001 digunakan sebagai parameter sistem, karena menghasilkan nilai ODG dan SNR yang paling baik.

3.2. Pengujian Ketahanan Sistem *Watermarking*

Untuk mengetahui ketahanan suatu *watermark*, maka *watermark* perlu diuji oleh berbagai macam serangan. Parameter yang digunakan dalam pengujian ini diperoleh dari hasil pengujian dan analisis sebelumnya, yaitu: level dekomposisi (N) = 1, Nframe = 2048, *threshold* = 0,1, dan alfa = 0,001.

Tabel 6. Pengaruh Serangan terhadap BER

Serangan	Kriteria	BER				
		host	piano	gitar	drum	bass
LPF	3k	0	0	0	0	0
	6k	0	0	0	0	0
	9k	0	0	0	0	0
BPF	100-6k	0,56	0,48	0,58	0,38	0,58
	50-6k	0,56	0,43	0,61	0,32	0,58
	25-6k	0,56	0,42	0,53	0,3	0,6
Host	0 dB	0,48	0,43	0,5	0,57	0,59
	10 dB	0,48	0,43	0,51	0,52	0,47
	20 dB	0,38	0,57	0,49	0,41	0,42
Resampling	22.05k	0	0	0	0	0
	11.025k	0	0	0	0	0
	16k	0	0	0	0	0
TSM	1%	0,3	0,32	0,27	0,15	0,37
	2%	0,2	0,39	0,4	0,16	0,49
	4%	0,27	0,43	0,44	0,14	0,38
Linear Speed Change	1%	0	0	0	0	0
	5%	0	0	0	0	0
	10%	0	0	0	0	0
Pitch Shifting	1%	0,32	0,46	0,4	0,19	0,5
	2%	0,29	0,44	0,43	0,16	0,43
	4%	0,3	0,39	0,41	0,19	0,45
Equalizer		0,48	0,41	0,48	0,19	0,55
Echo		0,3	0,33	0,41	0,25	0,52
Kompresi MP3	32k	0,04	0,03	0,13	0,02	0,46
	64k	0	0	0,07	0,02	0,34
	128k	0	0	0,01	0	0,14
	192k	0	0	0	0	0
Rata-rata		0,206				

Pada pengujian ini, digunakan 5 jenis audio yang berbeda diantaranya, *host.wav*, *piano.wav*, *gitar.wav*, *drums.wav*, dan *bass.wav*. Hasil pada Tabel 6 menunjukkan bahwa *watermark* yang disisipkan pada 5 *host* memiliki ketahanan terhadap beberapa serangan. Sistem audio *watermarking* yang dirancang tahan terhadap serangan LPF, *resampling*, *linear speed change*, dan kompresi MP3 pada 192k karena BER yang dihasilkan pada uji serangan tersebut bernilai 0 untuk semua jenis audio. Dari hasil uji serangan tersebut, diambil 3 sampel parameter yang memiliki BER tinggi untuk dilakukan optimasi, yaitu :

1. Parameter 1 : serangan TSM (2%) pada audio *piano.wav* yang menunjukkan hasil BER bernilai 0,39.
2. Parameter 2 : serangan *pitch shifting* (4%) pada *gitar.wav* yang menunjukkan hasil BER bernilai 0,41.
3. Parameter 3 : serangan kompresi MP3 (32k) pada *bass.wav* yang menunjukkan hasil BER bernilai 0,46.

Ketiga parameter tersebut dievaluasi kembali dengan melakukan pengujian pencarian parameter terbaik yang memiliki kinerja sistem yang optimal.

3.3. Optimasi Parameter Sistem

Optimasi dilakukan dengan cara mengganti parameter *N*, *Nframe*, *threshold*, dan *alfa* secara bergantian pada sistem audio *watermarking* yang diserang oleh serangan TSM (2%), *pitch shifting* (4%), dan kompresi MP3 (32k), diperoleh hasil sebagai berikut:

Tabel 7. Pengaruh Parameter Optimasi terhadap Kinerja Sistem

Parameter	Audio	N	Nframe	thr	alfa	ODG	SNR	BER	C
1	piano	1	4096	0,1	0,009	-2,1473	31,5408	0	10,77
2	gitar	1	8192	0,1	0,0045	-0,0059	27,7557	0	5,38
3	bass	1	8192	0,1	0,004	-0,0027	28,8872	0,19	5,38

Ketiga parameter optimal yang diperoleh pada pengujian sebelumnya digunakan untuk semua jenis audio dan serangan, sehingga menghasilkan output berupa nilai BER. Parameter terbaik dipilih melalui nilai rata-rata BER yang paling baik. Tabel 8 menunjukkan hasil ketahanan *watermark* terhadap serangan menggunakan 3 parameter.

Tabel 8. Perbandingan Rata-rata BER dari Parameter Sebelum dan Sesudah Optimasi pada 5 File Audio

BER Sebelum Optimasi	BER Setelah Optimasi		
	Parameter 1	Parameter 2	Parameter 3
0,218	0,118	0,113	0,115

Hasil pada Tabel 8 menunjukkan bahwa setelah optimasi, parameter 2 memberikan hasil BER yang paling baik, karena menghasilkan rata-rata BER paling kecil.

Tabel 9. Nilai SNR dan ODG untuk Parameter 2

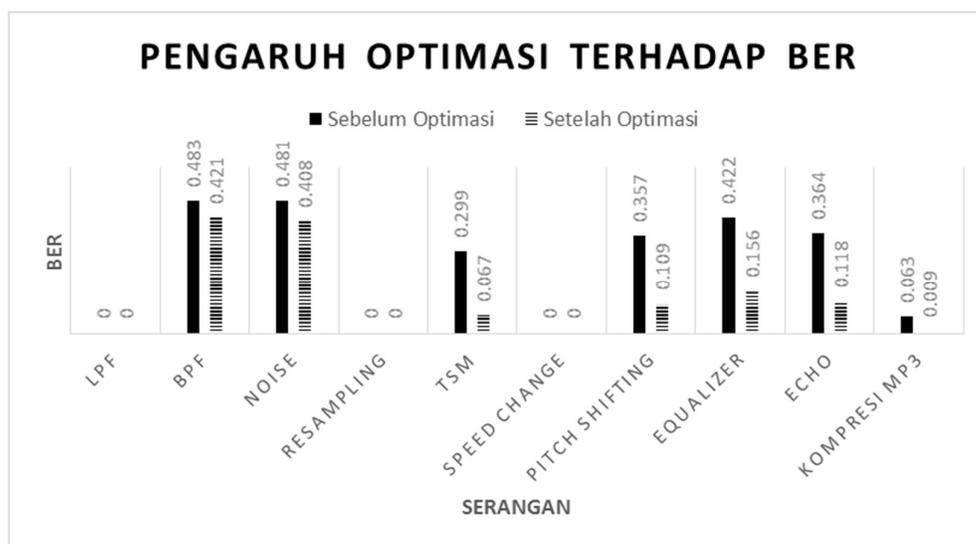
Audio	Parameter 2 (BER=0.113)		
	ODG	SDG	SNR
<i>host</i>	0,106	4,5	26,672
<i>piano</i>	-0,437	4,5	37,817
<i>gitar</i>	-0,002	4,7	28,689
<i>drums</i>	-2,171	4,6	31,152
<i>bass</i>	-0,308	4,5	32,12
Rata-rata	-0,562	4,6	31,290

Kemudian pada Tabel 9 diperoleh bahwa parameter 2 menghasilkan nilai ODG dan SNR sangat baik untuk semua jenis audio, kecuali audio drums. Sedangkan hasil SDG menyatakan bahwa semua audio yang dihasilkan memiliki kualitas yang baik. Hal tersebut dikarenakan keterbatasan sistem persepsi manusia dalam hal pendengaran. Secara keseluruhan, parameter 2 memberikan performansi sistem yang baik, karena nilai SNR > 20dB dan nilai ODG pada kriteria *watermark* terdengar, tetapi tidak mengganggu audio.

3.4. Pengaruh Optimasi Terhadap BER

Gambar 8 menunjukkan bahwa setelah optimasi, sistem audio *watermarking* tahan terhadap serangan LPF, *Resampling*, TSM, *Linier speed change*, *pitch shifting*, *equalizer*, *echo*, dan kompresi MP3. Rata-rata BER setelah optimasi mengalami peningkatan sebesar 45%, yaitu dari 0.206 menjadi 0.113. Sistem audio *watermarking* tahan terhadap serangan filter LPF, namun belum tahan terhadap serangan BPF, baik sebelum maupun setelah dioptimasi. Hal tersebut dikarenakan BPF merupakan gabungan antara filter *highpass* dan *lowpass*, dimana *high pass filter* adalah kebalikan dari *low pass filter*. *High pass filter* adalah jenis filter yang mampu melewatkan frekuensi tinggi, dan meredam frekuensi rendah.

Pada serangan *host*, optimasi pada sistem audio *watermarking* memberikan peningkatan performansi BER sebesar 15%, dari rata-rata BER 0,48 menjadi 0,44. Namun hasil yang diperoleh masih belum memberikan audio *host* dan pesan *watermark* hasil ekstraksi yang utuh saat sebelum disisipkan kedalam audio *host*. Sistem melakukan reduksi *host* dengan filter frekuensi *high pass*, dimana sistem ini rentan terhadap filter high pass.



Gambar 8. Pengaruh Optimasi Terhadap BER

4. KESIMPULAN

Pada penelitian ini telah dirancang suatu sistem *watermarking* pada *file audio* .wav dengan menggunakan *Stationary Wavelet Transform* dan *Statistical Mean Manipulation*, dengan ketahanan yang baik terhadap beberapa serangan, yaitu LPF, *resampling*, TSM, *linear speed change*, *pitch shifting*, *equalizer*, *echo*, dan kompresi mp3. Namun sistem audio *watermarking* belum tahan terhadap serangan BPF, dan *host*. Setelah optimasi, diperoleh rata-rata BER=0,113, ODG=-0,6, SNR=31,290, dan SDG= 4.6. Terjadi peningkatan BER sebesar 45% dibandingkan sebelum optimasi. Berdasarkan kriteria *imperceptibility*, disimpulkan bahwa *watermark* terdengar, namun tidak mengganggu audio. Hal ini membuktikan bahwa setelah

optimasi, sistem audio *watermarking* semakin tahan terhadap serangan. Parameter optimal dari sistem audio *watermarking*, yaitu level dekomposisi $N=1$, panjang *frame* $N_{frame}=8192$, threshold $thr=0,1$, dan $\alpha=0.0045$. Level dekomposisi (N) berpengaruh terhadap ODG, SNR, dan BER, namun tidak berpengaruh terhadap *Capacity* (C). Semakin besar level dekomposisi artinya semakin banyak juga pembagian frekuensi yang dilakukan. Untuk SWT, level dekomposisi terbaik pada $N=1$. Semakin besar N_{frame} maka semakin baik nilai ODG dan SNR yang dihasilkan, namun jumlah bit *watermark* yang dapat disisipkan ke dalam *host audio* semakin berkurang. Oleh karena itu, setelah optimasi hanya diperoleh $Capacity=5,38$ bit/detik. Langkah selanjutnya perlu dilakukan penyempurnaan dari sistem yang telah dirancang, agar *watermark* yang dapat disisipkan ke dalam *host audio* mempunyai kapasitas yang lebih besar. Parameter *threshold* tidak mempengaruhi performansi sistem. Sedangkan nilai α berpengaruh terhadap ODG dan SNR, namun tidak berpengaruh terhadap BER dan kapasitas bit *watermark*. Semakin besar nilai α yang digunakan maka semakin buruk nilai ODG dan SNR yang dihasilkan. Namun performansi sistem menurun ketika $\alpha < 0.0045$.

DAFTAR RUJUKAN

- Saini, L. K., & Shrivastava, V. (2014). A Survey of Digital *Watermarking* Techniques and its Applications. *International Journal of Computer Science Trends and Technology (IJCSST)*, 2(3), 70 - 73.
- Dutt, S. (2015). A Survey of Digital Audio *watermarking* Techniques. *International Journal of Computer Science and Information Technologies (IJCSIT)*, 6(3), 3067 – 3072.
- Bender, W., Gruhl, D., Morimoto, N., & Lu, A. (1996). Techniques for data hiding. *IBM Systems Journal*, 35(3.4), 313 – 336.
- Husain, F. (2012). A Survey of digital *Watermarking* Techniques for Multimedia Data. *MIT International Journal of Electronics and Communication Engineering*, 2(1), 37 - 43.
- Pun, C. M., & Yuan, X. C. (2013). Robust Segments Detector for De-Synchronization Resilient Audio *watermarking*. *IEEE Transactions On Audio Speech and Language Processing*, 2412 - 2424.
- Delong, C., Qirui, L., Guilan, Y., & Jianbin, X. (2014). Conten-Based Audio *watermarking* Based To Resist De-Synchronization Attacks. *International Conference on Information and Network Security*.
- Hsieh, C., & Tsou, P. (2002). Blind Cepstrum Domain Audio *watermarking* Based on Time Energy Features. *International Conference on Digital Signal Processing*, (pp. 705 -708).
- Budiman, G., Suksmono, A. B. & Danudirdjo, D. (2018). FFT-Based Audio *Watermarking* in Adaptive Subband with Spread Spectrum Framework. *Journal of Telecommunication and Computer Engineering (JTEC)*, in press.

- Chauhan, S. P. S., & Rizvi, S. A. M. (2013). A survey: Digital audio *watermarking* Techniques and Applications. *4th International Conference on Computer and Communication Technology (ICCCCT)*, (pp. 185–192).
- Chincholkar, Y. D., Ganorkar, S.R., & Kude, S.P. (2017). A Survey: Digital Audio Watermark Designed Method. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, *6*(6), 288 - 292.
- Hartung, F., & Kutter, M. (1999). Multimedia *Watermarking* Techniques. *Proceeding IEEE*, *87*(7), (pp. 1079 – 1107).
- Kiah, M. L. M., Zaidan, B. B., Zaidan, A. A. Ahmed A. M., & Al-Bakri, S. H. (2011). A Review of audio Based Steganography and Digital Watermarking. *International Journal of the Physical Sciences*, *6*(16), 3837 - 3850.
- Rashid, A. (2016). Digital *Watermarking* Applications and Techniques: A Brief Review. *International Journal of Computer Applications Technology and Research*, *5*(3), 147 – 150.
- Al-haj, A., Mohammad, A., & Bata, L. (2011). DWT – Based Audio *watermarking*. *The International Arab Journal of Information Technology*, *8*(3), 326 – 333.
- Zeng, W. (2012), A Novel Audio *watermarking* Algorithm based on Chrip Signal and Discrete *Wavelet* Transform. *8th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM)*, (pp. 0 – 3).
- Vivekananda, B. K., Sengupta, I., & Das, A. (2008). Audio *watermarking* Based On Mean Quantization In Cepstrum Domain. *16th International Conference on Advanced Computing and Communications (ADCOM)*, (pp. 73 - 77).
- Wen, X., Ding, X., Li, J., Gao, L., & Sun, H. (2009). An Audio *Watermarking* Algorithm Based on Fast Fourier Transform. *International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering*, (pp. 363 – 366).
- Harahap, H., Budiman, G., Novamizanti, L. (2016). Implementasi Teknik *Watermarking* menggunakan FFT dan Spread Spectrum Watermark pada Data Audio Digital. *Jurnal Elkomika*, *4*(1), 98 - 109.
- Zhao, M., Pan, J., & Chen, S. (2015). Optimal SNR of Audio *watermarking* by *Wavelet* and Compact PSO Methods. *Journal of Information Hiding and Multimedia Signal Processing*, *6*(5), 833 – 846.
- Budiman, G., Suksmono, A. B., & Danudirdjo, D. (2016). A Modified Multicarrier Modulation Binary Data Embedding in Audio File. *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, *8*(4), 762 - 774.