

ANALISIS AUDIO WATERMARKING BERBASIS DISCRETE WAVELET TRANSFORM DENGAN METODE SINGULAR VALUE DECOMPOSITION DAN QUANTIZATION INDEX MODULATION DENGAN CITRA TEROPTIMASI COARSE TO FINE SEARCH

AUDIO WATERMARKING ANALYSIS BASED ON DISCRETE WAVELET TRANSFORM USING SINGULAR VALUE DECOMPOSITION AND QUANTIZATION INDEX MODULATION WITH OPTIMIZED IMAGE BY COARSE TO FINE SEARCH

Brian Rizadhani Latuconsina¹, Rita Purnamasari², Raditiana Patmasari³

^{1,2,3}Prodi S1 Teknik Telekomunikasi, Fakultas Teknik, Universitas Telkom

¹brianrl@student.telkomuniversity.ac.id, ²ritapurnamasari@telkomuniversity.co.id,

³raditiana@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Semakin maraknya pembajakan data audio yang terjadi hingga saat ini, urgensi untuk dilakukan sebuah penelitian mengenai *watermarking* menjadi semakin besar. *Watermarking* adalah salah satu metode yang dapat digunakan untuk melakukan tindakan pencegahan terhadap pembajakan data audio oleh oknum pengguna internet yang merugikan pihak-pihak terkait.

Dalam Tugas Akhir ini, penelitian yang dilakukan berikut bertujuan untuk menganalisis hasil *watermarking* yang menggunakan metode *Discrete Wavelet Transform* (DWT), *Singular Value Decomposition* (SVD), *Quantization Index Modulation* (QIM), dan *Coarse to Fine Search* (CFS). Pada sistem yang dirancang, tahapan pertama yang dilakukan adalah melakukan pengolahan citra *watermark* dengan metode CFS dan *reshape*. Kemudian pada proses penyisipan, sistem melakukan proses *watermarking* berbasis DWT dan SVD, lalu hasil pengolahan citra *watermark* disisipkan ke dalam *host* audio menggunakan metode QIM. Tahap terakhir dari sistem adalah ekstraksi *watermark* untuk memisahkan kembali *host* audio dari citra *watermark*.

Penelitian dilakukan menggunakan data gambar dengan dimensi 40×40 *pixels* dengan format .bmp sebagai *watermark* dan lima data audio berupa bass, drum, gitar, piano, dan vokal dalam format .wav sebagai *host*. Dari pengujian sistem yang telah dilakukan, data audio gitar memiliki performa terbaik dari lima jenis data audio yang digunakan sebagai objek penelitian dengan mengaplikasikan parameter input level DWT 5 dan bit kuantisasi 5 berdasarkan nilai parameter yang digunakan sebagai acuan dengan nilai SNR sebesar 57,7067 dB, nilai ODG sebesar -0,3052, dan nilai kapasitas sebesar 22.050 bit per *second*.

Kata Kunci : *audio watermarking, watermark, Discrete Wavelet Transform, Singular Value Decomposition, Quantization Index Modulation, Coarse to Fine Search.*

Abstract

The increase of frequency in audio data piracy makes the urgency to conduct a research about watermarking is getting higher. Watermarking is one of the preventive method to deal with the audio data piracy by the internet users who harm all the related parties.

In this Final Task, the research was conducted to analyse the watermarking results by using Discrete Wavelet Transform (DWT), Singular Value Decomposition (SVD), Quantization Index Modulation (QIM), and Coarse to Fine Search (CFS). In the designed system, the first step to be conducted is to perform watermark image processing with CFS method and reshape. Furthermore, in embedding process, the system performs the watermarking process based on DWT and SVD. The result of watermark image processing is embedded into the audio host using QIM method afterwards. Lastly, the watermark extraction is done to separate the host audio from the watermark image.

This research was conducted by using an image with 40×40 *pixels* in .bmp format as the watermark and five audio data of bass, drum, guitar, piano, and vocal in .wav format as the hosts. According to the conducted test of the system, it is proven that the guitar audio has the best performance out of five other audio data used as research objects by applying input parameters of DWT with the level of 5 and quantization bit of 5 based on the parameters value which are used as references with SNR value of 57.7067 dB, ODG value of -0.3052, and capacity value of 22,050 bit per second.

Keywords: audio watermarking, watermark, DWT, SVD, QIM, Coarse to Fine Search.

1. Pendahuluan

Dengan semakin mudahnya pertukaran informasi yang dapat dilakukan saat ini, manusia banyak mendapatkan keuntungan untuk mendapatkan segala jenis bentuk informasi seperti statistik, karya ilmiah, dan juga multimedia. Namun, segala kemudahan ini kemudian menimbulkan masalah baru khususnya dalam hal hak

cipta, karena segala informasi yang didapat akan sangat susah untuk dibuktikan kebenarannya tanpa ada sesuatu yang dapat digunakan sebagai bukti keaslian informasi tersebut. Kejadian ini secara langsung akan berdampak buruk kepada pemilik asli dari informasi tersebut jika digunakan secara sepihak oleh pihak yang tidak bertanggungjawab. Maka, tindakan pencegahan harus dilakukan sebelum informasi disebarluaskan secara digital di dunia maya.

Dalam Tugas Akhir ini akan dilakukan penelitian yang dikhususkan untuk melindungi hak cipta informasi yang berbentuk audio. Saat ini sangat banyak tersedia tautan yang mengarahkan pengguna internet ke *file* audio yang dapat diunduh secara gratis tanpa sepengetahuan pemilik hak cipta dari *file* tersebut. Sebagai bukti, dikarenakan oleh maraknya pembajakan karya dalam bentuk audio, total kerugian yang dialami oleh para pemilik hak cipta dari *file* audio hampir menyentuh 18,5 triliun rupiah [1]. Ini menyebabkan urgensi dari penelitian ini sangat tinggi untuk mengurangi tindakan yang tidak bertanggung jawab dari oknum pengguna internet.

Salah satu cara yang dapat digunakan untuk melakukan pencegahan ini adalah *watermarking*. *Watermarking* adalah teknik penyisipan penanda berupa sinyal digital yang dilakukan secara rahasia ke dalam sinyal digital lainnya yang dapat digunakan sebagai bukti originalitas sinyal tersebut. Secara umum, teknik *watermarking* harus dapat memenuhi beberapa capaian yaitu *imperceptibility*, *capacity*, dan *security*. *Imperceptibility* adalah tingkat kemiripan antara data audio yang telah ditanam *watermark* dan yang sebelum ditanam *watermark*. *Capacity* adalah jumlah bit maksimum yang dapat ditanamkan pada file audio tanpa mengakibatkan distorsi.

Pada penelitian ini, metode yang digunakan untuk melakukan *watermarking* pada domain frekuensi ini adalah DWT yang kelebihanannya adalah dapat merepresentasikan sinyal yang berada di dalam domain frekuensi dan waktu dan juga memiliki waktu komputasi yang efisien. Setelah itu dilakukan proses penyisipan menggunakan metode SVD yang kelebihanannya terletak pada sisi *robustness*. Kemudian, metode *Quantization Index Modulation* (QIM) sebagai metode ekstraksi *watermark*, kemudian menggunakan CFS karena masih minimnya implementasi optimasi CFS dalam topik *watermarking*.

2. Dasar Teori

2.1 Audio Watermarking

Audio Watermarking adalah salah satu teknik untuk menyisipkan satu atau beberapa informasi yang berguna sebagai penanda atau identitas ke dalam *host* audio yang akan ditandai. Data audio yang telah disisipi *watermark* tersebut secara ideal tidak akan mengalami perubahan secara kasatmata jika dijalankan dengan program pemutar audio. Namun, kenyataannya kondisi tersebut tidak selalu yang menjadi keadaannya setelah proses *watermarking* dilakukan.

2.2 Karakteristik Pada Watermarking

Secara umum pada sistem audio *watermarking*, sistem tersebut harus memenuhi beberapa syarat di bawah ini:

1. Transparansi : kesamaan perseptual antara audio asli dan audio yang telah disisipi *watermark* yang diukur oleh seberapa besar distorsi yang terekam;
2. Kapasitas : jumlah maksimum bit yang ditanam pada audio *host* tanpa mengakibatkan distorsi;
3. Keamanan : kemampuan untuk mengamankan kepemilikan yang sah.

2.3 Discrete Wavelet Transform (DWT)

Transformasi DWT berfungsi sebagai pembagi sinyal yang berada pada frekuensi tinggi dan rendah yang sangat sulit untuk dideteksi oleh pendengaran manusia. Sinyal dengan frekuensi tinggi akan mengalami perubahan cepat yang berdampak pada berkurangnya waktu komputasi dan kebutuhan terhadap sumber daya. Sedangkan sinyal dengan frekuensi rendah akan berfokus ke sebagian besar *host* dan perubahannya akan lebih perlahan dibandingkan dengan sinyal frekuensi tinggi. Dengan menggunakan transformasi DWT sinyal terutama variasi yang terlokalisasi akan dengan efektif dapat ditunjukkan [2].

Pada DWT sinyal dengan sub-band frekuensi tinggi akan dipisahkan dengan sub-band frekuensi rendah menggunakan filter wavelet. Sinyal dengan frekuensi rendah akan dipisahkan kembali antara frekuensi tinggi dan rendah. Pemisahan sinyal menjadi dua bagian akan diulangi hingga sesuai dengan level dekomposisi yang ditentukan. Nilai x pada sinyal DWT dapat dikalkulasi dengan cara melakukan proses *filtering* terhadap sinyal x tersebut. Tindakan pertama yang dilakukan adalah melewati sinyal x melalui *low pass filter* dengan persamaan di bawah:

$$y[n] = (x * g)[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[n]G[n - k] \quad (2.1)$$

sinyal tersebut kemudian didekomposisi secara simultan dengan *high pass filter*. Hasil yang didapat dari dekomposisi ini adalah *detail coefficients* dan hasil dari *low pass filter* adalah *approximation coefficients*. Luaran dari filter tersebut akan diproses kembali dengan *subsampling* yang memiliki persamaan sebagai berikut:

$$y_{low}[n] = (x * g)[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k]G[2n - k] \tag{2.2}$$

$$y_{high}[n] = (x * g)[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k]H[2n - k] \tag{2.3}$$

dimana $y_{high}[n]$ dan $y_{low}[n]$ merupakan hasil yang didapat dari *high pass filter* dan *low pass filter*, x adalah sinyal asli, H merupakan *high pass filter*, dan G merupakan *low pass filter*. Dampak dari proses dekomposisi ini adalah telah berkurangnya separuh dari ukurannya karena hanya setengah dari setiap luaran filter yang mencirikan sinyal. Namun, setiap luaran hanya memiliki setengah dari pita frekuensi masukan yang menyebabkan ukuran frekuensi menjadi dua kali lipat. Sinyal asli akan dipulihkan menggunakan *inverse DWT* (I-DWT) [3].

2.4 Singular Value Decomposition (SVD)

SVD merupakan salah satu teknik yang memiliki kemampuan untuk melakukan proses dekomposisi sebuah matriks. Teknik ini banyak digunakan pada bidang pengolahan sinyal dan juga statistik. Pada aplikasinya pada audio *watermarking*, keuntungan SVD antara lain adalah memiliki nilai singular pada audio yang cukup stabil yang mengakibatkan nilai singular tersebut tidak akan mengalami perubahan yang signifikan jika audio diberi sedikit serangan, dan juga jika terjadi sedikit perubahan pada nilai singular, kualitas audio tidak akan terpengaruh. SVD adalah teknik yang diterapkan berdasarkan teorema aljabar bahwa sebuah matriks segiempat dapat didekomposisi menjadi 3 buah matriks, yaitu menjadi matriks orthogonal, diagonal, dan transpos yang orthogonal. Jika diterapkan secara matematis, persamaannya akan menjadi sebagai berikut:

$$A = USV^T \tag{2.4}$$

dimana A adalah matriks segiempat, U adalah matriks orthogonal, S adalah matriks diagonal, dan V^T adalah matriks transpose yang orthogonal. Dari proses dekomposisi ini, nilai singular yang berfungsi sebagai representasi sifat audio tersebut tersimpan dalam matriks diagonal S . Setelah proses penyisipan dan rekonstruksi dilakukan, proses *inverse SVD* (ISVD) akan digunakan yang secara matematis formulanya adalah sebagai berikut:

$$A^{-1} = (V^1)^{-1}S^{-1}U^{-1} = VS^{-1}U^T. \tag{2.5}$$

2.5 Quantization Index Modulation (QIM)

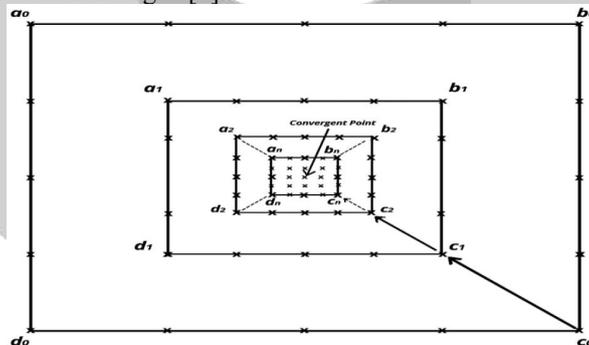
QIM adalah metode yang diusulkan oleh Chen- Wornell yang dapat digunakan untuk menolak gangguan interferensi. Dengan metode ini, sinyal *host* akan melalui proses kuantisasi dalam data *watermark* dengan sebuah atau dua urutan *quantizers*, dimana *quantizers* memiliki indeks masing-masing yang dapat perumusannya dapat dilakukan dengan cara sebagai berikut [4]:

$$S(x,m) = Q_m(x) \tag{2.6}$$

dimana x , m , dan $Q_m(x)$ secara berurutan merupakan *host* sinyal audio, data *watermark*, dan fungsi kuantisasi. *Dither modulation* dapat digunakan pada pelaksanaan QIM *encoding* dan *decoding*.

2.6 Coarse to Fine Search (CFS)

CFS adalah sebuah metode yang memiliki konsep untuk mengurangi wilayah relevan hingga didapatkan wilayah terkecil yang disebut titik konvergen [5].



Gambar 2. 1 Ilustrasi CFS [5].

Proses ini dilakukan dari wilayah awal $a_0b_0c_0d_0$ ke wilayah yang lebih kecil $a_1b_1c_1d_1$ hingga mencapai wilayah yang paling kecil $a_nb_nc_nd_n$ yang disebut sebagai titik konvergen. Pada setiap wilayah harus dipastikan bahwa titik konvergen harus selalu berada pada setiap wilayah yang ditentukan. Pada gambar di atas, dapat disimpulkan bahwa titik X selalu berada di dalam semua wilayah yang ditentukan. Untuk mencapai ke wilayah

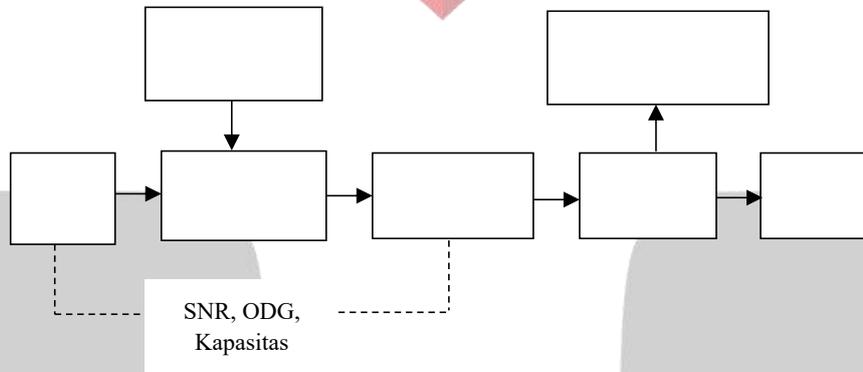
yang lebih kecil, wilayah sebelumnya dibagi menjadi beberapa wilayah, dan dari mereka ditentukan wilayah dengan nilai objektif terkecil dengan cara menguji beberapa titik yang ada di masing-masing wilayah. Proses CFS memiliki 4 langkah sebagai berikut:

1. Menentukan wilayah yang layak dari setiap fungsi kendala dan menempatkan populasi yang akan dioptimasi.
2. Mencari populasi terbaik, P_1^{best} , dengan cara melakukan optimasi secara bersamaan pada setiap kendala untuk mendapatkan nilai parameter terbaik.
3. Menempatkan wilayah layak yang baru di sekitar populasi terbaik sebelumnya dengan panjang sisi setengah dari wilayah sebelumnya, dan cari kembali populasi terbaik.
4. Ulangi langkah tiga sehingga wilayah layak menjadi sangat kecil dan titik konvergen dari proses optimasi ini dapat disebut sebagai populasi terbaik, P_M^{best} .

3. Model Sistem dan Perancangan

3.1 Perancangan Sistem

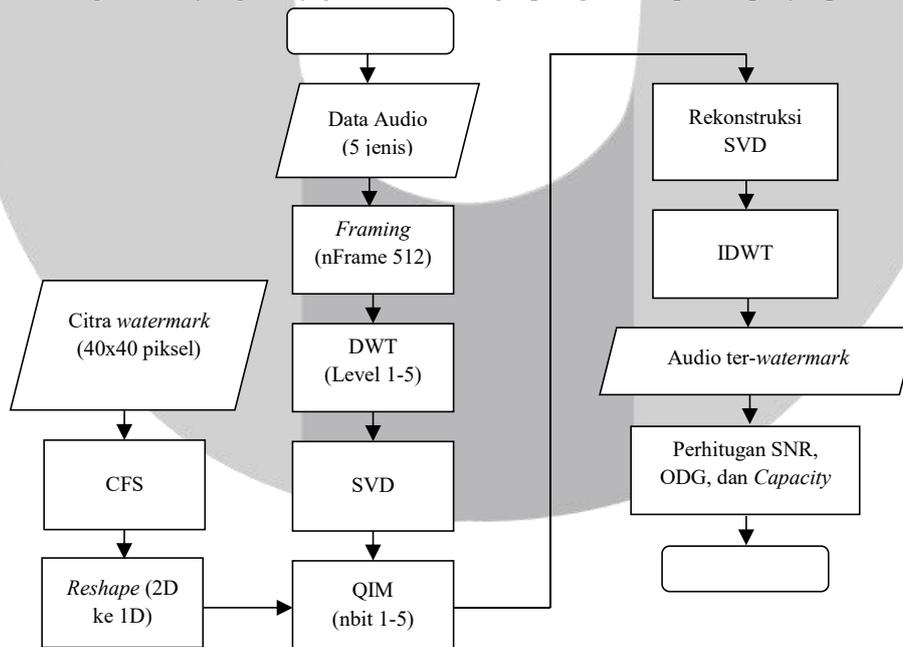
Pada kasus *watermarking* terdapat 2 tahapan yang harus dilakukan dengan tahapan yang pertama adalah proses penyisipan. Tujuan dari penyisipan adalah menyisipkan citra digital ke dalam *file* audio sebagai *host* sehingga didapatkan sebuah *file* audio yang telah disisipi oleh citra digital (*watermarked audio*). Tahap kedua adalah proses ekstraksi terhadap *watermarked* audio untuk memisahkan kembali *host* dengan citra digital yang bertindak sebagai *watermark*. Secara garis besar, perancangan untuk penelitian *watermarking* disajikan dengan Gambar 3.1.



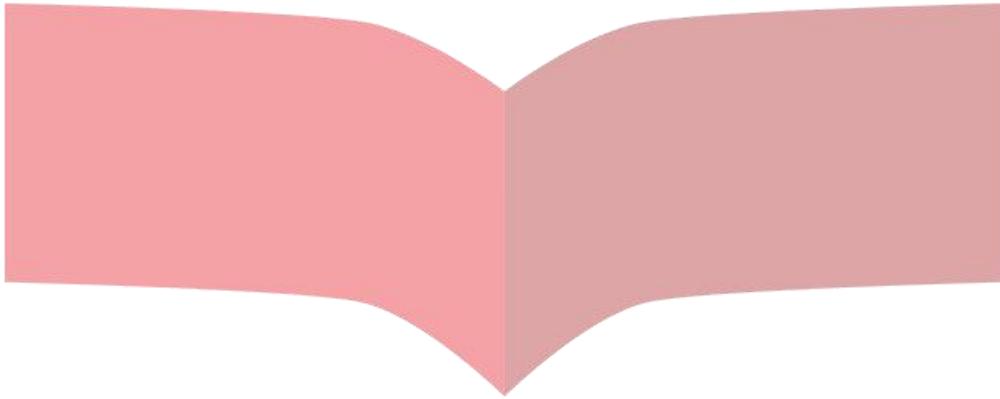
Gambar 3.1 Model perancangan *watermarking*.

3.2 Penyisipan (*Embedding*)

Dalam tahap penyisipan citra digital yang bertindak sebagai *watermark* ke dalam *file* audio sebagai *host*, terdapat tiga proses yang akan dilakukan yaitu transformasi DWT, dekomposisi SVD, dan kuantisasi QIM. Berikut ini adalah diagram alir yang menyajikan secara lengkap bagaimana proses penyisipan dilakukan.

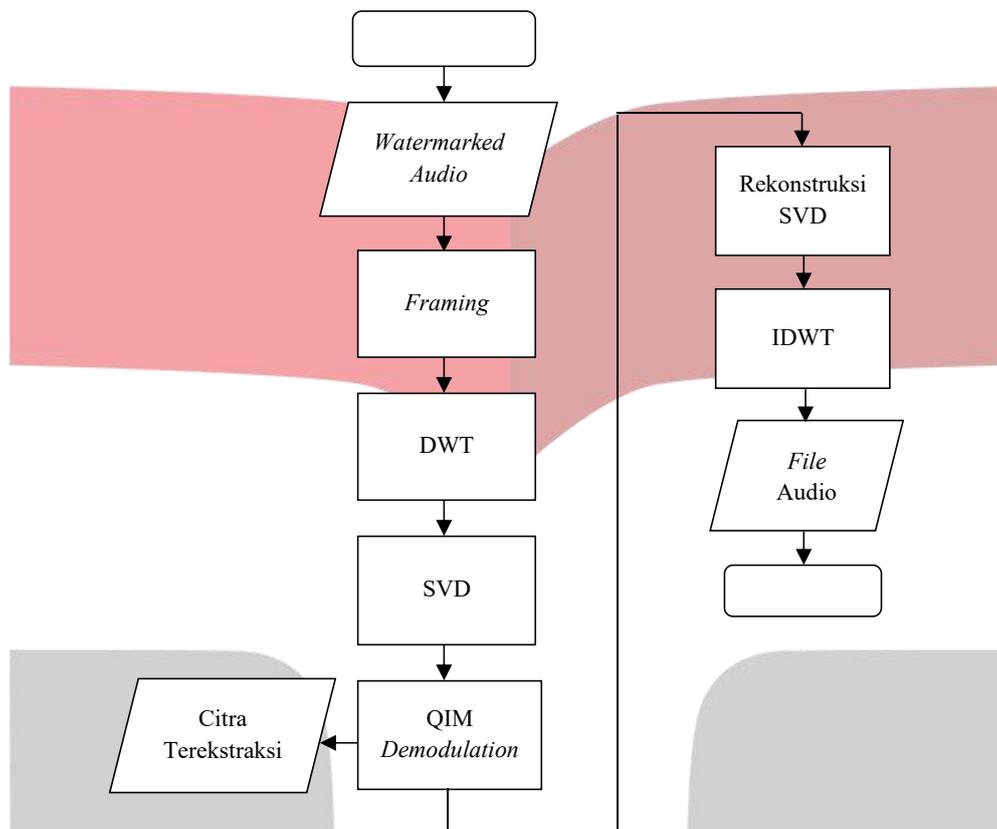


Gambar 3.2 Diagram alir penyisipan.



3.3 Ekstraksi (Extraction)

Proses ekstraksi adalah proses untuk memisahkan kembali *file* audio dengan citra digital setelah *watermarked audio* telah melewati pengujian parameter. Diagram alir untuk proses ekstraksi disajikan pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Diagram alir ekstraksi.

3.4 Parameter Pengujian Sistem

Berikut adalah beberapa parameter yang digunakan untuk menguji sistem yang telah didesain ini, yaitu:

1. *Signal-to-Noise Ratio* (SNR)

SNR adalah parameter yang digunakan untuk mengukur kualitas dari sinyal yang telah diproses. Dalam sistem ini, pengukuran SNR dilakukan pada *watermarked audio* dengan cara membandingkan level sinyal yang diinginkan dengan sinyal yang mengganggu (*noise*). Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui *transparency* dari sistem yang telah didesain. Berikut adalah cara perhitungan SNR secara matematis [3]:

$$SNR = 10 \log_{10} \frac{\sum_{n=1}^N S^2(n)}{\sum_{n=1}^N [S(n) - \hat{S}(n)]^2} \tag{3.1}$$

dimana $S(n)$ merupakan sinyal audio sebelum diproses oleh sistem dan $\hat{S}(n)$ merupakan sinyal yang telah disisipi oleh *watermark*.

2. *Objective Difference Grade* (ODG)

ODG merupakan penilaian kualitas audio dengan standard ITU-R BS. 1387 [6]. Penilaian ODG memiliki skala antara 0,0 hingga -4,0 yang merepresentasikan estimasi dan akurasi penurunan kualitas audio. Hasil akhir ODG juga didapatkan dengan membandingkan sinyal audio yang telah disisipi *watermark* dengan sinyal audio sebelum diproses sistem [7]. Nilai 0.0 menunjukkan bahwa audio memiliki kualitas baik sekali sedangkan -4.0 mengindikasikan bahwa audio memiliki kualitas yang sangat buruk. Di bawah ini adalah tabel ODG.

Tabel 3. *Objective Difference Grade* (ODG).

Skala	Tingkat Kerusakan	Kualitas
0	Tidak terdengar	Sangat Baik
-1	Terdengar, tapi tidak mengganggu	Baik
-2	Sedikit mengganggu	Cukup
-3	Mengganggu	Buruk
-4	Sangat mengganggu	Sangat Buruk

3. Capacity

Capacity merupakan representasi dari jumlah bit yang tertanam ke dalam host yang diukur dalam satuan waktu. Berikut adalah perhitungan kapasitas secara matematis:

$$B = \frac{R}{2^k} \text{ bit per second} \tag{3.2}$$

Dengan R adalah tingkat sampling audio (Hz) per detik dan K mewakili tingkat dekomposisi wavelet (DWT).

4. Pengujian Sistem dan Analisis

4.1 Spesifikasi Sistem

Untuk menjalankan sistem untuk melakukan watermarking, dibutuhkan perangkat keras dan lunak dengan spesifikasi sebagai berikut:

1. Perangkat Keras

Spesifikasi yang digunakan untuk menjalankan sistem berupa 1 perangkat PC dengan Intel(R) Core(TM) i7-4750HQ, Random Access Memory (RAM) sebesar 16Gb, dan penyimpanan 1 Tb; dan sebuah pengeras suara Edifier.

2. Perangkat Lunak

Sistem audio watermarking dibuat pada perangkat lunak dengan spesifikasi berupa windows 10 home single language 64-bit dengan program MATLAB R2017a 64-bit.

4.2 Tahapan Pengujian Sistem

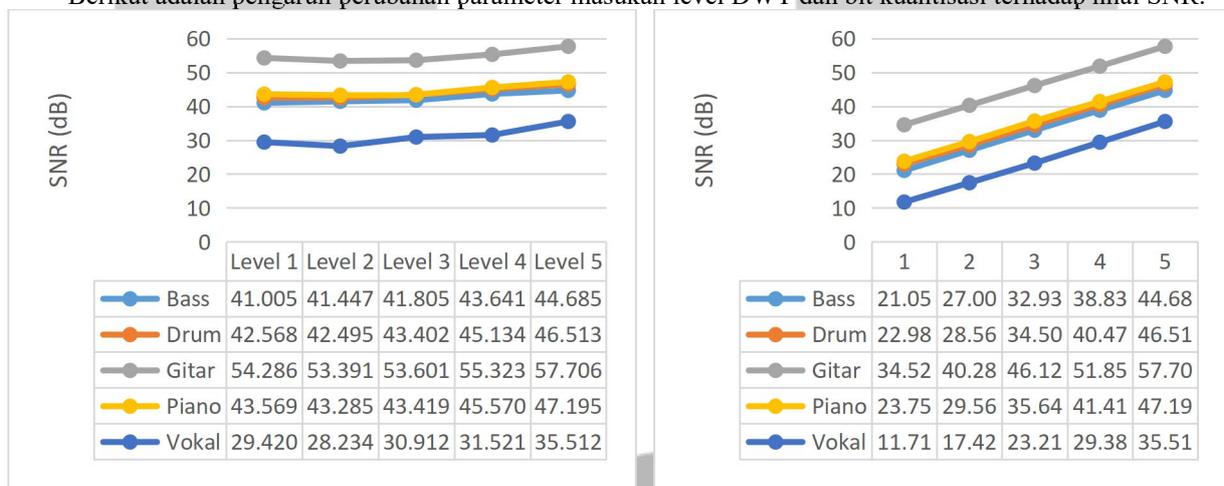
Pengujian sistem akan melalui tahapan sebagai berikut:

1. Menguji sistem dengan memasukkan lima data audio secara bergantian dan juga data watermark untuk melihat bagaimana performa data audio yang telah ditanam watermark.
2. Memasukkan parameter awal dan yang berbeda-beda untuk mengetahui pengaruh setiap perubahan parameter awal pada hasil proses watermarking.
3. Pengujian pada setiap lima level DWT dilakukan pada frekuensi terendah.

4.3 Hasil Pengujian Sistem dan Analisis Audio Watermarking

4.3.1 Pengaruh Level DWT dan Bit Kuantisasi terhadap SNR

Berikut adalah pengaruh perubahan parameter masukan level DWT dan bit kuantisasi terhadap nilai SNR.



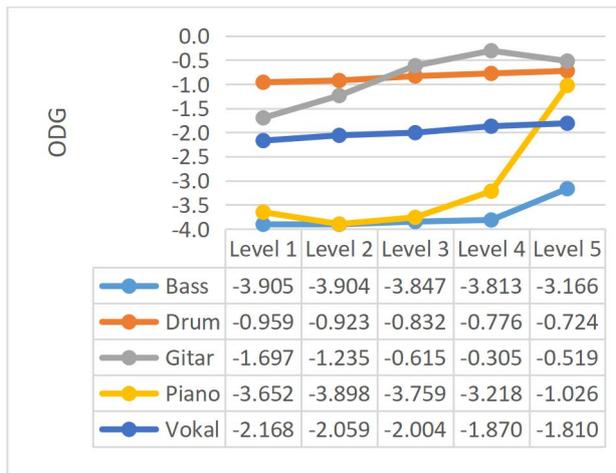
Gambar 4.1 Pengaruh level DWT terhadap SNR

Gambar 4.2 Pengaruh bit kuantisasi terhadap SNR

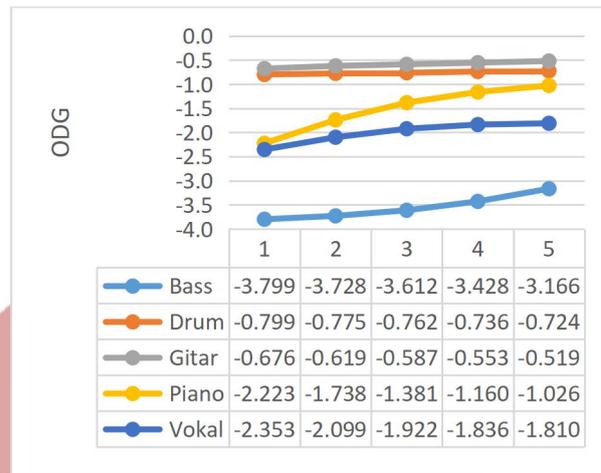
Dari gambar di atas, nilai SNR akan meningkat seiring dengan peningkatan level DWT dan bit kuantisasi yang diaplikasikan pada sistem.

4.3.2 Pengaruh Level DWT dan Bit Kuantisasi terhadap ODG

Berikut adalah pengaruh perubahan parameter masukan level DWT dan bit kuantisasi terhadap nilai ODG.



Gambar 4.3 Pengaruh level DWT terhadap ODG

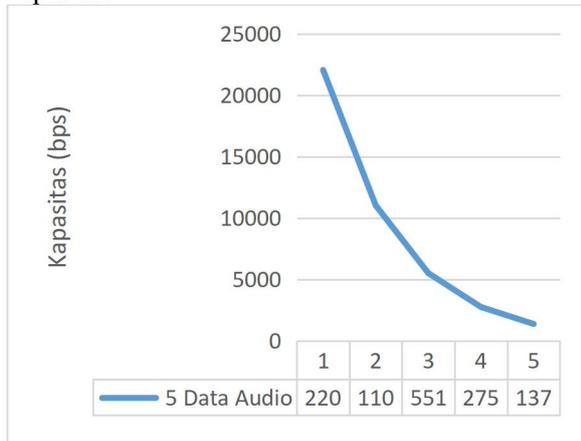


Gambar 4.4 Pengaruh bit kuantisasi terhadap ODG

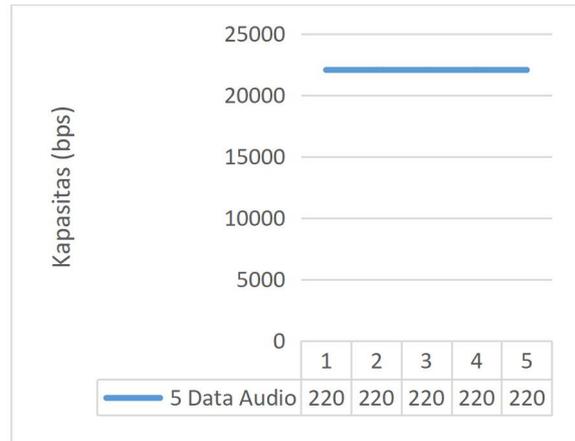
Dari gambar di atas, nilai ODG cenderung akan meningkat seiring dengan peningkatan level DWT dan bit kuantisasi yang diaplikasikan pada sistem.

4.3.3 Pengaruh Level DWT dan Bit Kuantisasi terhadap Kapasitas

Berikut adalah pengaruh perubahan parameter masukan level DWT dan bit kuantisasi terhadap nilai kapasitas.



Gambar 4.5 Pengaruh level DWT terhadap kapasitas.



Gambar 4.6 Pengaruh bit kuantisasi terhadap kapasitas.

Dari gambar di atas, kapasitas hanya dipengaruhi oleh perubahan level DWT namun tidak dipengaruhi oleh perubahan bit kuantisasi yang digunakan.

5. Kesimpulan dan Saran

5.1 Kesimpulan

Berikut adalah kesimpulan yang dapat ditarik dari penelitian tentang *watermarking* yang telah dilakukan:

1. Sistem *audio watermarking* yang telah berhasil diimplementasikan menggunakan metode DWT, SVD, QIM, dan CFS dengan data audio gitar memiliki performa terbaik setelah melalui sistem dengan hasil parameter terbaik dengan nilai SNR 57,7067 dB, ODG -0,3052, dan kapasitas 22.050 bps.
2. Setiap perubahan nilai level DWT dan bit kuantisasi mempengaruhi nilai dari setiap luaran berupa SNR, ODG, dan kapasitas. Nilai SNR dan ODG meningkat seiring dengan peningkatan nilai level DWT dan bit kuantisasi, sedangkan nilai kapasitas semakin baik jika level DWT yang diaplikasikan semakin kecil dan tidak dipengaruhi oleh perubahan nilai kapasitas.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis yang telah dilakukan, ada beberapa hal yang dapat dikembangkan dari penelitian ini, yaitu:

1. Mengaplikasikan level DWT dan bit kuantisasi dengan rentang yang lebih besar.
2. Menggunakan CFS sebagai optimasi setelah proses *watermarking* dilakukan untuk mendapatkan parameter yang lebih baik.

Daftar Pustaka:

- [1] "1.2 Billion Songs Downloaded Illegally | The Independent." [Online]. Available: <https://www.independent.co.uk/arts-entertainment/music/news/12-billion-songs-downloaded-illegally-2161907.html>. [Accessed: 26-Mar-2019].
- [2] H. Nikmehr and S. T. Hashemy, "A New Approach to Audio Watermarking Using Discrete Wavelet and Cosine Transforms," *Int. Conf. Commun. Eng.*, 2010.
- [3] A. Kaur, M. K. Dutta, K. M. Soni, and N. Taneja, "A High Payload Audio Watermarking Algorithm Robust Against MP3 Compression," in *2014 7th International Conference on Contemporary Computing, IC3 2014*, 2014.
- [4] N. Khademi, M. A. Akhaee, S. M. Ahadi, M. Moradi, and A. Kashi, "Audio watermarking based on Quantization Index Modulation in the frequency domain," in *ICSPC 2007 Proceedings - 2007 IEEE International Conference on Signal Processing and Communications*, 2007.
- [5] J. Raharjo, A. Soeprijanto, and H. Zein, "Multi Dimension Of Coarse To Fine Search Method Development For Solving Economic Dispatch," *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 3, no. 1, pp. 1–9, 2016.
- [6] I. T. Union, "Rec. ITU-R BS.1387-1: Method for objective measurements of perceived audio quality," *Int. Telecommun. Union, Geneva*, pp. 1–100, 2011.
- [7] T. T. Oo and T. Onoye, "Progressive audio scrambling via wavelet transform," in *IEEE Asia-Pacific Conference on Circuits and Systems, Proceedings, APCCAS*, 2015.

