

# Sistem Audio Watermarking Berbasis QIM dengan Teknik DWT-DCT-SVD-CPT

## Audio Watermarking System Based on QIM with DWT-DCT-SVD-CPT Techniques

Allwinnaldo<sup>\*1</sup>, Gelar Budiman<sup>2</sup>, Ledy Novamizanti<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Fakultas Teknik Elektro, Telkom University

Jl. Telekomunikasi Terusan Buah Batu 40257, Bandung, Indonesia, (022) 7566456

winnaldo@outlook.com<sup>\*1</sup>, gelarbudiman@telkomuniversity.ac.id<sup>2</sup>, ledyaldn@telkomuniversity.ac.id<sup>3</sup>

**Abstrak** – Makalah ini menyajikan rangkaian sistem audio watermarking yang mampu memiliki rasio robustness-distortion yang mengagumkan dan nilai data payload yang besar. Sistem audio watermarking mengadopsi metode quantization index modulation (QIM) bersama dengan discrete wavelet transform (DWT), discrete cosine transform (DCT), singular value decomposition (SVD), dan cartesian-to-polar transformation (CPT). Sistem bekerja diawali dengan DWT yang membagi sinyal host berdasarkan rentang frekuensinya, lalu mengubah nilainya ke domain frekuensi oleh DCT. Metode SVD mempartisi sinyal host domain frekuensi menjadi 3 submatriks U, V, dan S, kemudian nilai submatriks S diubah menjadi nilai polar menggunakan CPT, dan diakhiri dengan menyisipkan watermark kedalam nilai polar dari CPT menggunakan metode penyisipan QIM, sehingga menghasilkan sinyal audio ter-watermark. Hasil yang diharapkan yaitu sistem audio watermarking yang diusulkan dapat menghasilkan sinyal audio ter-watermark yang tahan terhadap upaya peretasan, memiliki noise yang minimum, dan berkapasitas besar.

**Kata Kunci:** Audio Watermarking, QIM, DCT, SVD, CPT.

**Abstract** – This paper presents an audio watermarking system that ensures the efficient of robustness-distortion ratio and a pleasing amount of capacity, designed using the Quantization index modulation (QIM) method synergism along with Discrete Wavelet Transform (DWT), Discrete Cosine Transform (DCT), Singular value decomposition (SVD), and Cartesian-to-polar Transformation (CPT) to emphasize copyright protection for harmonical work of art. The system establishes with DWT that divides the signal within a specific range of frequency, alter it to the frequency domain by DCT, partite with mathematical processing SVD, and transform the peculiar value of matrix-S to polar value using CPT, furthermore, QIM embed the watermark into the angular value from the CPT. After all, the expected result is the proposed audio watermarking system can produce a watermarked audio signal that is resistant to hacking attempts, has minimum noise, and has a large capacity.

**Keywords:** Audio Watermarking, QIM, DCT, SVD, CPT.

## 1. Pendahuluan

Seiring dengan maraknya era penemuan dan karya-karya terobosan, kini peradaban manusia sudah berada pada era digital dimana banyak aspek kehidupan manusia yang sangat bergantung pada teknologi, khususnya teknologi telekomunikasi dan informasi seperti internet. Internet memungkinkan manusia dapat berkomunikasi dengan temannya tanpa mengenal jarak dan waktu, sehingga kini banyak sekali terjadi pertukaran pesan dan data digital lewat internet, baik data tersebut amatlah penting, ataupun hanya pesan singkat. Namun sayangnya, karakteristik internet yang sangat bebas menyebabkan cukup banyak kerugian besar, salah satunya yaitu pembajakan dan pencurian hak cipta terhadap data digital yang melintas di internet, terutama terhadap data penting berupa karya seni, informasi privat, dan lainnya. Dengannya, teknik *watermarking* digital hadir sebagai solusi ketika banyak perhatian gelisah terhadap isu perlindungan data digital.

*Watermarking* didefinisikan sebagai tindakan penyembunyian informasi hak cipta, yang dikenal sebagai *watermark*, kedalam sebuah data digital untuk mencegah replikasi ilegal dan membuktikan kepemilikan karya seni digital. Data digital yang akan dilindungi dapat berupa audio, gambar, atau video dan akan berperan sebagai *host* dari *watermark* untuk disisipkan kedalamnya. Jika fokus pada audio digital sebagai *host*, hal ini dikenal sebagai teknik audio *watermarking* yaitu menjanjikan perlindungan hak cipta untuk data audio digital [1].

Untuk merancang sistem audio *watermarking* yang baik, terdapat 3 persyaratan utama yang harus dipenuhi: kerahasiaan (*Imperceptibility*) yang sangat baik, ketahanan (*Robustness*) yang solid, dan kapasitas data (*Capacity*) yang besar. *Imperceptibility* (*Inaudible* dalam hal audio) menyiratkan transparansi dari *watermark* setelah disematkan kedalam *host* audio, yakni keberadaan *watermark* tidak menimbulkan perbedaan suara antara *host* audio orisinal dan audio ter-*watermark*. *Robustness* adalah kemampuan audio ter-*watermark* untuk menahan variasi serangan, yang berarti *watermark* akan tetap dalam kondisi baik setiap kali ada upaya untuk merusak dan mencurinya. *Capacity* mengacu pada jumlah *bit watermark* yang dapat disisipkan kedalam sinyal *host* audio dalam waktu 1 detik, direpresentasikan dalam *bit per second* (bps). Namun, akan selalu ada beberapa tarik-ulur (*Trade-off*) sebuah nilai ketika berusaha untuk mencapai semua persyaratan tersebut, seperti rendahnya nilai aspek *robustness* ketika memperoleh nilai yang layak untuk aspek *imperceptibility*. Hal tersebut membuat aspek *robustness* dan *imperceptibility* menjadi 2 aspek yang lebih penting dan menjadikan aspek *capacity* hanyalah kriteria tambahan untuk tolok ukur sistem *watermarking* audio yang hebat [1].

Dalam beberapa tahun terakhir, sudah banyak penelitian mengenai algoritma audio *watermarking* yang dibangun dan saling diperbaiki antara satu dan lainnya, khususnya algoritma audio *watermarking* berbasis *quantization index modulation* (QIM), bersama dengan berbagai algoritma lain seperti *discrete wavelet transform* (DWT), *discrete cosine transform* (DCT), *singular value decomposition* (SVD), dan *cartesian-to-polar transformation* (CPT). Banyak penulis telah mengusulkan skema audio *watermarking*, misalnya *watermarking* berbasis DWT [2], ada beberapa penelitian mengusulkan kombinasi antara DWT dan DCT [3]–[5], algoritma SVD [3]–[7], QIM [8], suatu skema audio *watermarking* menggunakan kombinasi DCT-SVD-QR-CPT-QIM sehingga memiliki *robustness* yang baik sekaligus distorsi untuk *noise* (aspek *imperceptibility*) yang cukup [9]. Skema audio *watermarking* lainnya mengadopsi metode DCT dan mengkombinasikannya dengan SVD [7], [10], terlebih lagi yaitu sistem digital *watermarking* yang berbasis SVD [11]–[14], dan juga berbasis QIM [15], [16]. Diusulkan algoritma audio *watermarking* yang memanfaatkan metode QIM bersama dengan metode DWT, DCT, SVD, dan CPT yang beroperasi secara sinkron untuk mencapai *trade-off* yang optimal dalam hal *robustness*, *imperceptibility*, dan *capacity*.

Makalah ini diklasifikasikan menjadi beberapa bagian. Bagian 2. secara singkat membahas mengenai pengertian metode DWT, DCT, SVD, CPT dan QIM sekaligus dengan rinci menjelaskan mengenai desain sistem audio *watermarking* yang dibangun dan cara beroperasinya. Bagian 3. konsentrasi pada jenis dan pengertian dari parameter-parameter yang digunakan untuk dapat mengetahui kualitas sistem audio *watermarking* yang dibangun. Bagian 4. merepresentasikan kesimpulan dari makalah ini.

## 2. Metode

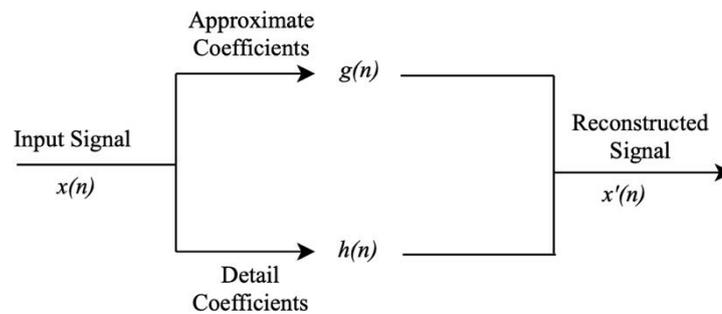
dalam perancangan sistem audio *watermarking*, algoritmanya dibangun dengan mengadopsi beberapa metode pemrosesan sinyal dan setiap metodenya dirakit agar dapat saling bekerjasama sehingga menghasilkan satu buah set sistem yang luar biasa baik. Pada bagian ini, akan dijelaskan mengenai metode yang digunakan dan cara kerja sistem yang dirancang pada makalah ini.

### 2.1. Metode Penelitian

Sistem audio *watermarking* didesain dengan mengadopsi berbagai metode pemrosesan sinyal serta penyisipan *watermark*. Metode-metode tersebut dirangkai agar saling bersinergi sehingga menghasilkan sistem audio *watermarking* yang handal. Berikut metode-metode yang digunakan pada sistem audio *watermarking* yang dibahas pada makalah ini.

#### 2.1.1. Discrete Wavelet Transform

*Discrete wavelet transform* (DWT) merupakan teknik untuk mendekomposisi suatu sinyal menjadi 2 bagian berdasarkan nilai frekuensinya. DWT bekerja dengan mengidentifikasi rentang frekuensi suatu sinyal menggunakan *low pass filter* (LPF) dan *high pass filter* (HPF), kemudian membagi sinyal tersebut menjadi 2 set koefisien yaitu koefisien *approximate* (merekpresentasikan bagian frekuensi rendah, hasil dari LPF) dan koefisien *detail* (merekpresentasikan bagian frekuensi tinggi, hasil dari HPF) [1], [6], [8]. Selanjutnya, dekomposisi daripada sinyal menggunakan DWT dapat dilakukan berulang-ulang, tergantung kebutuhan analisis.



Gambar 1. Dekomposisi sinyal dengan DWT.

Dekomposisi yang dilakukan berulang yaitu dengan membagi kembali baik koefisien *approximate* maupun *detail*, atau dapat keduanya, menjadi 2 bagian. Hal ini disebut sebagai multi-level DWT [6]. Dengan mendekomposisi sinyal berulang kali, rentang frekuensi sinyal hasil dekomposisi akan lebih detail. Sinyal hasil dekomposisi tersebut akan menjadi *host* untuk disisipkan *watermark*, sehingga *watermark* akan lebih presisi untuk disisipkan.

#### 2.1.2. Discrete Cosine Transform

*Discrete cosine transform* (DCT) merupakan metode untuk mengubah sinyal berdomain waktu menjadi sinyal berdomain frekuensi, direpresentasikan dengan koefisien riil hasil penjumlahan operasi perkalian antara sinyal domain waktu, sebagai input DCT, dan persamaan kosinus [3], [9]. Persamaan DCT didefinisikan sebagai berikut,

$$C(m) = a(m) \sum_{n=0}^{N-1} f(n) \cos \left[ \frac{\pi(2n+1)m}{2N} \right] \quad (1)$$

dimana,  $C(m)$  merepresentasikan sinyal domain frekuensi yang didapatkan, disebut sebagai koefisien DCT, dengan  $m = 0, 1, 2, \dots, N - 1$ .  $N$  merepresentasikan panjang dari sinyal dan  $n$  merupakan nilai riil.  $a(m)$  merupakan nilai yang direpresentasikan dengan persamaan sebagai berikut,

$$a(m) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{N}}, & \text{if } m = 0 \\ \sqrt{\frac{2}{N}}, & \text{if } m \neq 0 \end{cases} \quad (2)$$

Inversi DCT (IDCT) merupakan cara untuk mengembalikan sinyal domain frekuensi menjadi sinyal domain waktu [9]. Persamaan IDCT dinyatakan sebagai berikut,

$$f(n) = \sum_{m=0}^{N-1} a(m) C(m) \cos \left[ \frac{\pi(2m+1)n}{2N} \right] \quad (3)$$

dimana  $f(n)$  merupakan sinyal domain waktu sebagai hasil daripada IDCT.

Ketika DCT digunakan untuk mentransformasikan sinyal, DCT pun memiliki kemampuan untuk mengompresi sinyal dengan mengabaikan sampel-sampel yang memiliki nilai amplituda rendah pada sinyal, tanpa mengurangi akurasi dan kualitas sinyal saat ingin direkonstruksi kembali menggunakan IDCT [9], [10].

### 2.1.3. Singular value decomposition

Ketika pemrosesan sinyal sedang berlangsung, sinyal direpresentasikan sebagai matriks yang berisi sampel-sampel memuat informasi daripada sinyal tersebut. *Singular value decomposition* (SVD) merupakan metode matematis untuk mendekomposisi suatu matriks kedalam 3 submatriks, yaitu  $U$ ,  $V$ , dan  $S$  [6]. Pengertian SVD dapat ditulis sebagai sebuah persamaan sebagai berikut,

$$A = USV^T \quad (4)$$

dimana  $A$  merupakan matriks masukan yang didekomposisi menggunakan metode SVD, sehingga menghasilkan submatriks  $U$ ,  $S$ , dan  $V$ . Submatriks  $U$  dan  $V$  merupakan matriks orthogonal, dan submatriks  $S$  merupakan matriks diagonal dimana elemen-elemen diagonalnya merupakan nilai *eigen* (*eigenvalues*) dari matriks  $A$ .

Sebuah sinyal audio direpresentasikan sebagai sebuah matriks 1 dimensi. Sehingga, sinyal audio dapat didekomposisi menggunakan metode SVD, dimana nilai *eigen* pada submatriks  $S$ , umumnya disebut sebagai nilai singular (*singular values* atau SVs), merepresentasikan energi dari sinyal audio [6], [17].

### 2.1.4. Cartesian-to-polar Transformation

*Cartesian-to-polar transformation* (CPT) adalah teknik matematis untuk mengubah suatu nilai koordinat kartesian menjadi nilai koordinat polar [9]. Dalam perhitungannya, persamaan CPT diekspresikan sebagai berikut,

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (5)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{y}{x} \right) \quad (6)$$

dimana  $(x, y)$  merepresentasikan suatu titik pada sistem koordinat kartesian, sementara  $r$  merepresentasikan nilai magnituda dan  $\theta$  merepresentasikan nilai fasa dari nilai koordinat polar yang didapatkan.

Kebalikan dari metode CPT yaitu inversi CPT (ICPT), yaitu mengembalikan nilai koordinat polar menjadi nilai koordinat kartesian [9]. Rumus perhitungan ICPT dinyatakan sebagai berikut,

$$x = r \cos \theta \quad (7)$$

$$y = r \sin \theta \quad (8)$$

### 2.1.5. Quantization index modulation

*Quantization index modulation* (QIM) merupakan teknik atau metode matematis untuk dapat menyisipkan bit-bit *watermark* kedalam *array* matriks sebuah sinyal [9]. Urutan proses matematisnya dinyatakan sebagai berikut,

$$F'(0) = \begin{cases} A_k, & \text{if } w = 1 \text{ and } \arg \min |F(0) - A_k| \\ B_k, & \text{if } w = 0 \text{ and } \arg \min |F(0) - B_k| \end{cases} \quad (9)$$

Sementara nilai  $A_k$  dan  $B_k$  dinyatakan sebagai berikut,

$$A_k = \left(2k + \frac{1}{2}\right) \cdot \Delta ; B_k = \left(2k - \frac{1}{2}\right) \cdot \Delta \quad (10)$$

dimana  $w$  merepresentasikan bit *watermark* dan  $\Delta$  merepresentasikan lebar dari step kuantisasi, dengan  $k$  yang bernilai  $\pm 0, \pm 1, \pm 2$ , dan seterusnya.  $F(0)$  merupakan sinyal *host* audio sebelum dikuantisasi sedangkan  $F'(0)$  merupakan sinyal *host* audio sesudah dikuantisasi, umum disebut sebagai sinyal audio ter-*watermark*. Lebar step kuantisasi ( $\Delta$ ) diekspresikan sebagai persamaan berikut,

$$\Delta = \frac{1}{2^{(nbit-1)}} \quad (11)$$

dimana  $nbit$  merupakan representasi dari bit-bit kuantisasi pada QIM.

Untuk mendapatkan kembali *watermark* yang sudah disisipkan menggunakan metode QIM, berikut cara ekstraksi *watermark* menggunakan teknik QIM [9]. Persamaan ekstraksi QIM dinyatakan sebagai berikut,

$$\tilde{V}(k) = \text{mod} \left( \text{ceil} \left( \frac{F'(0)}{\Delta} \right), 2 \right) \quad (12)$$

dimana  $\tilde{V}(k)$  merupakan bit-bit *watermark* yang sudah diambil kembali dari sinyal audio ter-*watermark*  $F'(0)$ .

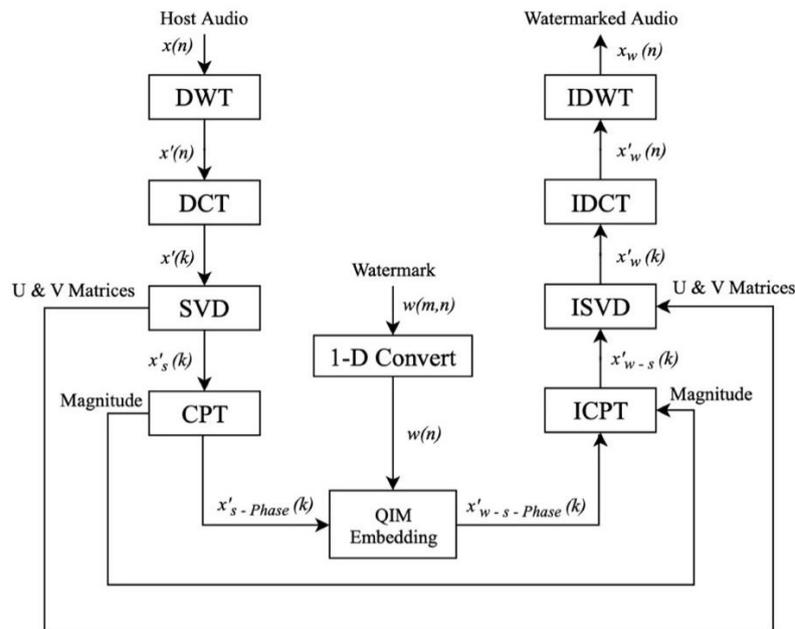
Pada metode QIM, lebar step kuantisasi memiliki pengaruh yang cukup signifikan terhadap 3 persyaratan utama untuk kualitas sistem audio *watermarking* yang dibangun, terutama untuk aspek *robustness* dan *imperceptibility*. Nilai step kuantisasi yang kecil menyebabkan distorsi yang minimal pada sinyal *host* audio, namun nilai *robustness* yang baik bisa didapatkan dengan menggunakan quantizer uniform, dimana memiliki nilai step kuantisasi yang besar [15]. Sehingga metode QIM dapat disebut sebagai metode penyisipan *watermark* dengan rasio *trade-off* yang baik antara distorsi dan *robustness* [16].

## 2.2. Desain Sistem Audio Watermarking

Pada penelitian ini, Sistem dirancang dengan menggunakan *watermark* berupa gambar tipe grayscale dengan ukuran  $16 \times 16$  *pixel* untuk disisipkan kedalam sinyal *host* audio. Saat merancang sistem audio *watermarking* yang baik, terdapat setidaknya 2 aspek performansi yang harus terpenuhi yaitu aspek *robustness* dan *imperceptibility*. Meskipun nilai dari kedua aspek tersebut selalu bertentangan, masih ada beberapa hal yang dapat dilakukan untuk mendapatkan hasil yang optimal diantara keduanya. Sistem audio *watermarking* yang diusulkan terbagi menjadi 2 fase kerja, fase pertama yaitu fase penyisipan dan fase kedua yaitu fase ekstraksi.

### 2.2.1. Penyisipan

Fase penyisipan *watermark* merupakan proses memasukan *bit – bit watermark* kedalam sinyal *host* audio, sehingga menghasilkan sinyal audio yang sudah dilengkapi dengan proteksi hak cipta. Gambar 2. Merepresentasikan blok diagram dari fase penyisipan,



Gambar 2. Blok diagram fase penyisipan watermark.

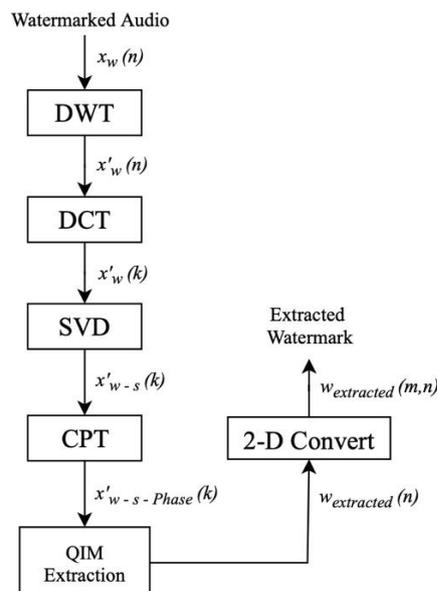
dan langkah – langkah proses penyisipannya sebagai berikut,

- Step 1 :** Watermark yang digunakan merupakan gambar tipe grayscale dengan skala  $16 \times 16$ . Gambar tersebut kemudian dikonversi menjadi tipe biner. Pada pemrosesan sinyal digital, gambar akan direpresentasikan menjadi sebuah matriks 2-dimensi, sehingga dibentuk ulang ukuran matriks sinyal gambar tersebut menjadi matriks 1-dimensi atau matriks singular agar dapat diproses dengan sinyal audio yang berdimensi 1.
- Step 2 :** Mengadakan *bit-bit* sinkronisasi.
- Step 3 :** Melakukan *framing* pada sinyal *host* audio, yaitu dengan membaginya kedalam beberapa bagian yang disebut sebagai *frame*. Kemudian setiap *frame* didekomposisi menggunakan metode DWT menjadi koefisien *approximate* dan *detail*.
- Step 4 :** Metode DCT diterapkan pada bagian koefisien *detail* setiap *frame* untuk dikonversi nilainya dari domain spasial ke domain frekuensi, sehingga menghasilkan matriks koefisien DCT. Koefisien *approximate* setiap *frame* tidak digunakan pada tahap ini dan seterusnya.
- Step 5 :** Matriks koefisien DCT setiap *frame* yang didapatkan dibentuk ulang mejadi matriks 2 baris, dengan setiap barisnya memiliki jumlah sampel yang sama. Kemudian gunakan metode SVD untuk mendekomposisi setiap DCT koefisien yang telah dibentuk ulang menjadi 3 buah submatriks U, S, dan V. Hanya submatriks S, yang nilai diagonalnya merupakan nilai *eigen* dari sinyal *host* audio, digunakan untuk proses penyisipan *watermark*. Pada kasus ini, setiap submatriks S akan memiliki 2 buah nilai *eigen* dan jumlah submatriks S akan sama banyaknya dengan jumlah *frame* koefisien DCT. 2 buah nilai *eigen* di setiap submatriks S akan digunakan untuk langkah berikutnya.
- Step 6 :** Dua buah nilai *eigen* dari setiap submatriks S, yang terletak pada posisi (1,1) dan (2,2), akan digunakan sebagai masukan dari metode CPT, dengan mentransformasikan nilai *eigen* tersebut menjadi nilai koordinat polar. Setiap nilai koordinat polar yang didapatkan akan terdiri atas 2 buah nilai yaitu nilai magnituda dan fasa. Nilai fasa yang telah didapatkan akan digunakan sebagai *host* dari *watermark* untuk disisipkan, sementara nilai magnituda tidak akan digunakan untuk saat ini.

- Step 7 :** Setiap *bit watermark* 1-dimensi disisipkan kedalam setiap nilai fasa menggunakan metode QIM.
- Step 8 :** Nilai fasa yang sudah disisipkan *watermark*, disatukan kembali dengan nilai magnituda menggunakan metode ICPT, sehingga kembali menjadi 2 buah nilai *eigen* submatriks S.
- Step 9 :** Menggantikan semua nilai *eigen* lama pada submatriks S tiap *frame* dengan nilai *eigen* baru hasil ICPT yang sudah disisipkan *watermark*. Letakkan nilai *eigen* yang baru pada posisi (1,1) dan (2,2) pada submatriks S tiap *frame*. Kemudian gabungkan kembali submatriks S baru tersebut dengan submatriks U dan V yang tidak mengalami perubahan menggunakan metode ISVD. Lakukan ISVD terhadap setiap *frame* submatriks S baru, U, dan V, sehingga kembali menjadi *frame-frame* matriks berukuran (2,8). Setelah itu, setiap *frame* dengan matriks yang berukuran (2,8) dibentuk ulang ukuran matriksnya menjadi 1-dimensi, untuk menjadi masukan pada langkah selanjutnya.
- Step 10 :** IDCT diterapkan kepada setiap *frame* matriks 1-dimensi yang sudah didapat dari ISVD, sehingga nilainya kembali menjadi nilai domain spasial. nilai domain spasial tiap *frame* yang telah didapatkan akan menjadi nilai koefisien *detail* yang baru.
- Step 11 :** Nilai koefisien *detail* yang baru setiap *frame* disatukan dengan nilai *approximate* tiap *frame* yang nilainya tidak berubah dan digunakan pada saat proses penyisipan dengan menggunakan metode IDWT, sehingga didapatkan sinyal audio ter-*watermark* dengan sempurna.
- Step 12 :** Sinyal audio ter-*watermark* disatukan dengan *bit-bit* sinkronisasi yang sudah dibentuk di langkah awal.
- Step 13 :** Evaluasi kualitas sistem audio *watermarking* dan sinyal audio ter-*watermark* dengan menghitung *signal-to-noise ratio* (SNR), *objective difference grade* (ODG), dan *data payload*.

**2.2.2. Ekstraksi**

Fase ekstraksi didefinisikan sebagai proses pengambilan *watermark* yang disembunyikan didalam suatu data, dalam kasus ini data berupa audio ter-*watermark*. Untuk mendapatkan kembali *watermark* dengan baik, semua nilai dari parameter yang digunakan saat penyisipan harus sama persis dengan yang akan digunakan pada saat ekstraksi. Gambar 3. memperlihatkan blok diagram dari fase ekstraksi,



Gambar 3. Blok diagram fase ekstraksi *watermark*.

dan proses ekstraksinya sebagai berikut,

- Step 1 :** Pendeteksian *bit-bit* sinkronisasi yang ada pada audio ter-*watermark*. Kondisi tersebut dilakukan agar posisi awal dari sinyal audio akan terbaca presisi dengan sinyal awalnya, sehingga *watermark* yang ada didalam sinyal audio akan terbaca dengan akurat.
- Step 2 :** *Framing* dilakukan terhadap sinyal audio ter-*watermark* dengan membaginya kedalam beberapa *frame*. Sama seperti pada proses penyisipan, gunakan metode DWT, dengan level dekomposisi yang sama dengan pada saat proses penyisipan, untuk mendekomposisi setiap *frame* menjadi koefisien *approximate* dan *detail*.
- Step 3 :** Nilai koefisien *detail* setiap *frame* dikonversi dari domain spasial menjadi domain frekuensi menggunakan metode DCT, sehingga menghasilkan koefisien DCT. Koefisien *approximate* tidak digunakan pada tahap ini.
- Step 4 :** Matriks koefisien DCT setiap *frame* dibentuk ulang menjadi matriks berukuran (2,8). Selanjutnya, setiap *frame* matriks (2,8) diproses menggunakan metode DCT dan dihasilkan 3 submatriks U, V, dan S dengan masing-masing submatriks akan berjumlah sama dengan jumlah *frame*. Submatriks S yang didapat hanya akan memiliki 2 buah nilai *eigen* di posisi (1,1) dan (2,2). Seperti proses penyisipan, hanya submatriks S yang digunakan untuk langkah ekstraksi selanjutnya, dan submatriks lainnya tidak digunakan.
- Step 5 :** Nilai *eigen* pada posisi (1,1) dan (2,2) di setiap submatriks S digunakan sebagai masukan pada proses CPT untuk menghasilkan nilai polar. Nilai-nilai fasa dari setiap *frame* nilai polar mengandung *bit-bit watermark* yang telah ditanamkan pada saat proses penyisipan. Sehingga hanya nilai fasa yang menjadi masukan untuk tahap berikutnya.
- Step 6 :** Semua *bit watermark* yang disisipkan di setiap *frame* nilai fasa diekstrak menggunakan metode ekstraksi QIM. *Bit-bit* yang didapatkan dari proses ekstraksi masih tersusun sebagai matriks 1-dimensi.
- Step 7 :** Mengingat pada awalnya *watermark* berupa gambar yaitu sinyal 2-dimensi, pembentukan ulang ukuran matriks *bit-bit watermark* sangat diperlukan. Maka dari itu, ukuran matriks *bit-bit watermark* dibentuk ulang menjadi ukuran orisinal *watermark* (untuk kondisi ini, ukuran orisinal *watermark* yaitu 16×16). Setelah itu, *watermark* sukses didapatkan kembali dan dapat dilihat untuk diproses lebih lanjut.
- Step 8 :** Nilai *bit error rate* (BER) dihitung untuk melihat performansi dari sistem audio *watermarking* pada aspek ketahanannya.

### 3. Hasil dan Pembahasan

Saat proses eksperimen sudah dilakukan melalui 2 proses sebelumnya yaitu penyisipan dan ekstraksi, sistem audio *watermarking* yang dirancang sudah dapat diketahui kualitasnya. Tiga aspek yang merepresentasikan kualitas sistem audio *watermarking* yaitu *robustness*, *imperceptibility*, dan *capacity*, dapat diukur melalui perhitungan parameter kualitas seperti BER, SNR, ODG, dan *data payload*. Secara rinci, perhitungan semua parameter kualitas dijelaskan sebagai berikut,

1. *Bit error rate* (BER) merupakan parameter kualitas untuk mengukur aspek ketahanan (*robustness*) dari sistem audio *watermarking*, dengan menghitung keakurasian antara *bit-bit watermark* orisinal dengan *watermark* hasil ekstraksi. Perhitungan BER dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut,

$$BER = \frac{\text{Jumlah bit berbeda antara } w_e \text{ dan } w_o}{\text{Jumlah bits dari } w_o} \times 100\% \quad (13)$$

dimana  $w_e$  merupakan *watermark* hasil ekstraksi, dan  $w_o$  merupakan *watermark* semula.

2. *Signal-to-noise ratio* (SNR) merupakan parameter kualitas untuk mengukur aspek kerahasiaan (*imperceptibility*) daripada *watermark* yang disisipkan kedalam sinyal *host* audio, dengan melihat perbedaan antara sinyal audio orisinal dengan sinyal audio ter-*watermark*. Secara matematis, SNR dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut,

$$SNR = 10 \log_{10} \left( \frac{\sum_{i=0}^{L-1} x^2(n)}{\sum_{i=0}^{L-1} (x(n) - x_w(n))^2} \right) \quad (14)$$

dimana  $L$  merupakan panjang sinyal audio ter-*watermark* dalam sampel,  $x(n)$  merupakan sinyal *host* audio sebelum disisipkan *watermark*, dan  $x_w(n)$  merupakan sinyal audio ter-*watermark*.

3. *Objective difference grade* (ODG) merupakan parameter kualitas untuk mengukur aspek *imperceptibility*. Serupa dengan SNR, ODG pun membandingkan antara sinyal audio orisinal dengan sinyal audio ter-*watermark*. Perhitungan nilai ODG memanfaatkan algoritma perceptual evaluation of audio quality (PEAQ) yang secara khusus dibahas di ITU-R BS.1387 menggabungkan model *psychoacoustic*. Kualitas aspek *imperceptibility* dalam hal ODG ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Deskripsi nilai *objective difference grade* (ODG).

Nilai ODG	Deskripsi	Kualitas
0	Tidak terdeteksi / Imperceptible	Sangat baik
-1	Terdeteksi, namun tidak mengganggu	Baik
-2	Cukup mengganggu	Cukup
-3	Mengganggu	Buruk
-4	Sangat mengganggu	Sangat buruk

4. *Data payload* merupakan parameter kualitas untuk mengukur aspek kapasitas (*capacity*), dengan menghitung jumlah *bit watermark* yang dapat disisipkan kedalam sinyal *host* audio dalam waktu 1 detik, umumnya satuan dari *data payload* berupa *bit per second* (bps). Berikut persamaan *data payload*,

$$C = \frac{L_w \cdot F_s}{L} \quad (15)$$

dimana  $C$  merupakan *payload* atau kapasitas dari *watermark* dalam satuan bps atau *bit per second*,  $L_w$  merupakan panjang dari *watermark* dalam *bits*,  $F_s$  merupakan frekuensi *sampling* audio ter-*watermark* dalam sampel per detik, dan  $L$  merupakan panjang dari audio ter-*watermark* dalam sampel.

#### 4. Kesimpulan

Pada *paper* ilmiah ini, diusulkan sebuah desain sistem audio *watermarking* yang mengadopsi metode QIM sebagai metode utama untuk tahap penyisipan *watermark*-nya, bersama dengan metode DWT, DCT, SVD, dan CPT yang memperkuat sistem pada tahap pra-pemrosesan. Sistem tersebut diuji kualitasnya dengan mempertimbangkan 3 aspek yaitu *robustness*, *imperceptibility*, dan *capacity*. Pada makalah ini, ketiga aspek kualitas tersebut dapat diketahui dengan menghitung beberapa parameter kualitas antara lain BER, SNR, ODG, dan *data payload*. Hasil penelitian ini diharapkan mampu memiliki BER yang bernilai 0, nilai SNR > 21 dB, ODG > -0,5, dan *data payload* dengan nilai melebihi 500 bps. Dengan tercapainya semua nilai yang diharapkan, sistem audio *watermarking* yang dirancang akanlah menjadi sistem audio *watermarking* unggulan.

**Referensi**

- [1] Y. Lin and W. H. Lin, *Audio watermark: A comprehensive foundation using MATLAB*. 2015.
- [2] H.-N. Huang, S.-T. Chen, and C.-Y. Hsu, "Wavelet-domain audio watermarking using optimal modification on low-frequency amplitude," *IET Signal Process.*, vol. 9, no. 2, pp. 166–176, 2015.
- [3] A. Singhal, A. N. Chaubey, and C. Prakash, "Audio watermarking using combination of multilevel wavelet decomposition, DCT and SVD," pp. 239–243, 2012.
- [4] P. K. Dhar and T. Shimamura, "Audio watermarking in transform domain based on singular value decomposition and quantization," *APCC 2012 - 18th Asia-Pacific Conf. Commun. "Green Smart Commun. IT Innov.*, pp. 516–521, 2012.
- [5] M. Kansal, G. Singh, and B. V. Kranthi, "DWT, DCT and SVD Based Digital Image Watermarking," *2012 Int. Conf. Comput. Sci.*, pp. 77–81, 2012.
- [6] K. R. Kakkirala, S. R. Chalamala, and G. B. M. Rao, "DWT-SVD based blind audio watermarking scheme for copyright protection," *ICALIP 2014 - 2014 Int. Conf. Audio, Lang. Image Process. Proc.*, pp. 180–183, 2015.
- [7] G. Suresh, N. V. Lalitha, C. Srinivasa Rao, and V. Sailaja, "An efficient and simple audio watermarking using DCT-SVD," *2012 Int. Conf. Devices, Circuits Syst. ICDCS 2012*, no. 4, pp. 177–181, 2012.
- [8] R. Martínez-Noriega, H. Kang, B. Kurkoski, K. Yamaguchi, and M. Nakano-Miyatake, "Audio Watermarking Based on Wavelet Transform and Quantization Index Modulation," *22nd Int. Tech. Conf. Circuits-/Systems, Comput. Commun. ITCCSCC*, pp. 133–134, 2007.
- [9] R. D. RENDRAGRAHA, G. BUDIMAN, and I. SAFITRI, "QIM - Based Audio Watermarking with Combination Technique of DCT-QR-CPT," *ELKOMIKA J. Tek. Energi Elektr. Tek. Telekomun. Tek. Elektron.*, vol. 7, no. 1, p. 112, 2019.
- [10] P. K. Dhar and T. Shimamura, "Blind audio watermarking in transform domain based on singular value decomposition and exponential-log operations," *Radioengineering*, vol. 26, no. 2, pp. 552–561, 2017.
- [11] M. J. Hwang, J. Lee, M. Lee, and H. G. Kang, "SVD-Based adaptive QIM watermarking on stereo audio signals," *IEEE Trans. Multimed.*, vol. 20, no. 1, pp. 45–54, 2018.
- [12] H.-T. Hu, H.-H. Chou, C. Yu, and L.-Y. Hsu, "Incorporation of perceptually adaptive QIM with singular value decomposition for blind audio watermarking," *EURASIP J. Adv. Signal Process.*, vol. 2014, no. 1, p. 12, Dec. 2014.
- [13] B. Lei, Y. Soon, F. Zhou, Z. Li, H. L.-S. Processing, and U. 2012, "A robust audio watermarking scheme based on lifting wavelet transform and singular value decomposition," *Elsevier*.
- [14] P. K. Dhar and T. Shimamura, "FFT-Based Audio Watermarking Using SVD and CPT," p. 59, 2015.
- [15] A. El Bahi, M. Khalil, and A. Adib, "A dual audio watermarking system based on Spread Spectrum and QIM technique," *2013 8th Int. Conf. Intell. Syst. Theor. Appl. SITA 2013*, pp. 1–4, 2013.
- [16] N. V. Lalitha, C. Srinivasa Rao, and P. V. Y. Jaya Sree, "Robust audio watermarking scheme with synchronization code and QIM," *Int. J. Eng. Technol.*, vol. 8, no. 1, pp. 486–500, 2016.
- [17] E.N.F. Astuti, G. Budiman, L. Novamizanti, "Perancangan Teknik LWT-DCT-SVD pada Audio Watermarking Stereo dengan Sinkronisasi dan Compressive Sampling", Seminar Nasional Rekayasa Teknologi Industri dan Informasi (ReTII), 2017.