

Analisis Image Watermarking Menggunakan Compressive Sensing Algoritma Orthogonal Matching Pursuit dengan Pendekatan Berbasis Discrete Cosine Transform Menggunakan Singular Value Decomposition

Analysis of Image Watermarking Using Compressive Sensing Algorithm Orthogonal Matching Pursuit Approach Based Discrete Cosine Transform Using Singular Value Decomposition

Arining Pangestu¹, Gelar Budiman, S.T., M.T.², Irma Safitri, S.T, M.Sc.³
^{1,2,3} Prodi S1 Teknik Telekomunikasi, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

Jln. Telekomunikasi No.1 Terusan Buah Batu Bandung 40257 Indonesia

¹ariningp@gmail.com, ²gelarbudiman@telkomuniversity.ac.id, ³irmasaf@telkomuniversity.ac.id

ABSTRAK

Pematenan hak cipta ini diperlukan pada saat ini dikarenakan mulai beralihnya bentuk dari banyak hasil karya menjadi *digital* dan hal ini juga turut menimbulkan banyaknya hal-hal yang merugikan seperti pembajakan, penggandaan masal, penyebaran secara ilegal, dan lain-lain yang tentu akan merugikan pencipta dari karya tersebut. Pada penelitian ini akan meneliti sebuah citra yang sudah melalui proses *image watermarking* menggunakan *Compressive Sensing* dengan algoritma *Orthogonal Matching Pursuit*, dimana pada proses *embedding* dan *extraction*-nya dilakukan dengan pendekatan *Singular Value Decomposition* berbasis *Discrete Cosine Transform*. Kombinasi antara *Compressive Sensing* algoritma *Orthogonal Matching Pursuit* dengan *Singular Value Decomposition* berbasis *Discrete Cosine Transform* diharapkan dapat meningkatkan mutu dari citra yang sudah di *watermarking* dengan memperhatikan hasil *robustness*, *embedding capacity*, dan *transparency*. Hasil akhir penelitian tugas akhir ini berupa aplikasi *watermarking* pada Matlab yang memiliki nilai BER (*robustness*) stabil mendekati 0 tanpa serangan dan nilai PSNR diatas 40 dB (49.647-tak hingga). Dengan optimasi *Compressive Sensing* menggunakan algoritma *Orthogonal Matching Pursuit* pada citra *watermark*, nilai PSNR menjadi lebih baik dari pada tanpa optimasi (50.9814-tak hingga) namun ketahanan terhadap serangan dan nilai BER cenderung fluktuatif.

Kata kunci: *Image Watermarking, Compressive Sensing, Orthogonal Matching Pursuit, Discrete Cosine Transform, Singular Value Decomposition.*

ABSTRACT

Copyright patenting is necessary at this time due to start shifting shapes of many works into digital and it also raises the number of harmful things such as piracy, mass duplication, illegal dissemination, and others that would be detrimental to the creators. This research will examine an image that has been through the process of image watermarking using Compressive Sensing with Orthogonal Matching Pursuit algorithm, wherein the embedding and extraction process was conducted through approach Singular Value Decomposition based on Discrete Cosine Transform. The combination of Compressive Sensing Orthogonal Matching Pursuit algorithm with Singular Value Decomposition based on Discrete Cosine Transform is expected to improve the quality of the image watermarking regard to robustness, embedding capacity, and transparency. The final result of this final project is watermarking application on Matlab which has stable BER (robustness) value close to 0 without attack and PSNR value above 40 dB (49.647-infinite). With Compressive Sensing optimization using Orthogonal Matching Pursuit algorithm on watermark image, PSNR value becomes better than without optimization (50.9814-infinite) but resistance to attack and BER value tend to fluctuate.

Keywords: *Image Watermarking, Compressive Sensing, Orthogonal Matching Pursuit, Discrete Cosine Transform, Singular Value Decomposition.*

1. PENDAHULUAN

Watermark adalah invisible signature yang tertanam di dalam sebuah gambar untuk menunjukkan keaslian atau bukti kepemilikan. Tujuannya dikarenakan pemilik pola watermark ingin menjaga pola watermark mereka tetap terjaga kerahasiaannya selama pendeteksian watermark berlangsung. Hasil simulasi yang telah banyak dilakukan menunjukkan kelayakan algoritma digital watermarking digital untuk digunakan dalam menjaga berbagai

multimedia standar.^[3] Discrete Cosine Transform merupakan metode watermarking yang memanfaatkan keterbatasan sistem visual manusia terhadap komponen frekuensi tinggi. Dalam metode ini, beberapa bagian relevan dari citra akan terkonsentrasi ke dalam beberapa komponen frekuensi rendah saja. Dikarenakan embedding watermark-nya terjadi pada frekuensi rendah maka hasilnya memiliki tingkat robustness yang lebih baik tetapi transparency yang cukup buruk sehingga lebih mudah untuk mendeteksi keberadaan watermark. Terdapat beberapa algoritma domain hybrid seperti DCT-SVD, DCT-DWT, DCT-DWT-SVD yang berdampak pada robustness yang lebih baik pada saat pemrosesan sinyal maupun geometrical attacks, meningkatkan kompleksitas sistem, dan cukup banyak mengurangi embedding capacity.^[2] Dalam Compressive Sensing, sinyal dapat direkonstruksi dengan menggunakan sejumlah angka kecil dari perhitungan yang disebut sensing matrix dan sinyalnya harus bersifat sparse (penjarang) dimana sparse image mengandung beberapa koefisien non-zero dan koefisien lainnya adalah zero. Namun, citra standar hampir tidak ada yang bersifat sparse. Oleh karena itu, beberapa metode transformasi seperti DCT, DFT dan DWT dimanfaatkan untuk mengkonversi citra standar menjadi citra sparse. Rekonstruksi citra pada Compressive Sensing berbasis pada metode yang berbeda seperti optimasi dan greedy algorithm. Greedy algorithm memiliki banyak metode didalamnya yang bisa digunakan untuk rekonstruksi sparse image, dua yang paling sering digunakan adalah OMP dan OMP-PKS.^[1]

Maka dari itu pada penelitian ini akan dicoba dengan memadukan Compressive Sensing pada sistem Discrete Cosine Transform watermarking dimana penggabungannya akan dilakukan pada bagian embedding. Dengan dilakukannya watermarking terhadap citra menggunakan Singular Value Decomposition berbasis Discrete Cosine Transform yang dipadukan Compressive Sensing algoritma Orthogonal Matching Pursuit, diharapkan selain bisa memperbaiki citra dari noisy environment dengan tetap mempertahankan robustness yang sudah mumpuni ini, hasil akhirnya juga bisa memenuhi kriteria watermark yang baik lainnya seperti embedding capacity, dan transparency.^[3]

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Citra Digital

Citra dapat didefinisikan sebagai fungsi intensitas cahaya dua dimensi $f(x,y)$, dimana x dan y menyatakan koordinat spasial dan harga f pada sembarang titik (x,y) sebanding dengan skala keabuan (brightness) dari citra pada titik tersebut.

Matriks citra digital yang berukuran $M \times N$ dapat ditunjukkan sebagai berikut:

$$f(x,y) = \begin{bmatrix} (0,0) & \cdots & (0,N-1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ (M-1,0) & \cdots & (M-1,N-1) \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

2.2. Watermarking

Watermarking adalah proses perubahan tapi tidak terlihat terhadap media digital (dikenal sebagai cover work/host image) seperti audio, teks, gambar atau video untuk menanamkan suatu tag otentikasi (watermark) yang terkait dengan media tersebut. Dikarenakan hasil watermarking tersebut mirip dengan media digital dalam keadaan awal, keberadaan watermarking ini akan sulit terdeteksi oleh pihak-pihak yang tidak berwenang (selain dari pemegang hak cipta). Posisi embedding dipengaruhi oleh random key, dimana ini akan menentukan memungkinkan atau tidaknya media tersebut dibagi antara beberapa pihak.^[2]

2.3. Compressive Sensing

Compressive Sensing (Penginderaan Kompresif) adalah metode kompresi yang dalam prosesnya diambil sample dengan jumlah sedikit dan acak berdasarkan pada transformasi proyeksi yang digunakan. Mampu merekonstruksi sinyal dengan menggunakan sejumlah pengukuran acak yang disebut sensing matrix dan sinyalnya harus berjarang. Citra sparse mengandung beberapa koefisien sebagai non-zero dan koefisien lainnya adalah zero.

Suatu sinyal $x \in R^N$ adalah k -sparse ketika hampir seluruh elemen k dari x adalah non-zero. Bila $f \in R^N$ adalah sinyal k -sparse pada ruang ψ yang merupakan kombinasi linear dari N , maka ψ merupakan suatu basis ortonormal dan f muncul dengan persamaan

$$f = \psi x \quad (2.2)$$

Lalu sinyal x bisa merepresentasikan suatu sinyal sparse dengan menggunakan persamaan

$$x = \psi' f \quad (2.3)$$

dan

$$y = \emptyset f \quad (2.4)$$

dimana $y \in R^M$ adalah vektor perhitungan dan $\emptyset$ adalah $M \times N$ sensing matrix. Lalu persamaan sebelumnya akan diubah menjadi

$$y = \emptyset f = \emptyset \psi x = \phi x \quad (2.5)$$

dimana $\phi \in R^{M \times N}$ merepresentasikan underdetermined matrix dengan $M \ll N$.

Metode rekonstruksinya memperkirakan jika sinyal $\hat{x}$ yang hampir seluruh nilai k adalah non-zero dan $k < M \ll N$. Jika matriks ϕ memenuhi Restricted Isometry Property (RIP), maka $\hat{x}$ bisa direkonstruksi sepenuhnya menggunakan algoritma OMP (Orthogonal Matching Pursuit) dan OMP-PKS (Orthogonal Matching Pursuit-Partially Known Support).

2.4. Discrete Cosine Transform

Discrete Cosine Transform adalah transformasi yang paling umum digunakan untuk pengolahan gambar dikarenakan pepadatan daya yang besar. Ini merupakan transformasi bi-directional dimana mampu mengkonversi citra dari spasial ke domain frekuensi, begitupun sebaliknya. Selama forward transformation, bagian yang bersangkutan dari citra terkonsentrasi ke dalam beberapa komponen frekuensi rendah.^[2]

Persamaan forward transform yaitu:

$$F(m, n) = \frac{2}{\sqrt{mn}} C(m)C(n) * \sum_{x=0}^{y=M-1} \sum_{y=0}^{N-1} \cos\left(\frac{(2x+1)\pi m}{2M}\right) * \cos\left(\frac{(2y+1)\pi n}{2N}\right) \quad (2.20)$$

dan persamaan inverse transform yaitu:

$$F(x, y) = \frac{2}{\sqrt{mn}} C(m)C(n) \sum_{x=0}^{y=M-1} \sum_{y=0}^{N-1} \cos\left(\frac{(2x+1)\pi m}{2M}\right) * \cos\left(\frac{(2y+1)\pi n}{2N}\right) \quad (2.21)$$

$$\text{dimana } C(m), C(n) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{N}} & m, n = 0 \\ \sqrt{\frac{2}{N}} & m, n = 1, 2, 3, \dots, N-1 \end{cases} \quad (2.22)$$

2.5. Singular Value Decomposition

Singular Value Decomposition adalah merupakan sebuah teknik yang biasa digunakan untuk mendekomposisi sebuah matriks. Dengan SVD, sebuah matriks didekomposisi menjadi 3 komponen matriks yaitu 2 matriks orthogonal serta sebuah matriks diagonal yang berisi nilai-nilai singular.

Bila X merupakan suatu matriks dengan ukuran $M \times N$, maka Singular Value Decomposition akan mendekomposisi matriks X menjadi $X = USV^T$.

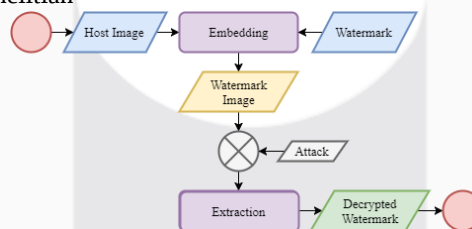
Persamaan di atas memiliki penjabaran dimana U merupakan matriks berukuran $M \times M$ yang setiap kolomnya berisi eigen vector yang sudah dinormalisasikan dari matriks XX^T dan V merupakan matriks berukuran $N \times N$ yang setiap kolomnya berisi eigen vector yang sudah dinormalisasikan dari matriks $X^T X$. Sedangkan S merupakan matriks diagonal yang berukuran $M \times N$ yang pada sisi diagonalnya adalah singular value (σ) dari matriks X , dimana $\sigma = \sqrt{\lambda}$ dan λ merupakan eigen vector dari matriks XX^T dan matriks $X^T X$. Kolom-kolom pada matriks U disebut singular vector kiri dan kolom-kolom pada matriks V disebut singular vector kanan.^[7]

2.6. Quantization Index Modulation

Quantization Index Modulation adalah metode yang efisien secara komputasi/perhitungan watermarking dengan informasi tambahan. Watermarking dengan informasi tambahan.^[9]

3. SISTEM PEMODELAN

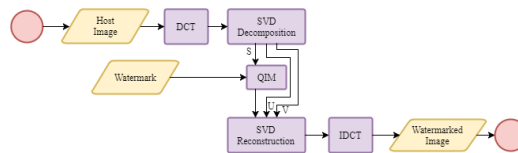
3.1. Model Perancangan Penelitian



Secara umum, watermarking terbagi menjadi 2 proses yaitu embedding dan extraction. Pada proses embedding, watermark akan disematkan ke dalam citra awal dan menghasilkan citra yang sudah ter-watermark. Sedangkan proses extraction adalah proses dimana citra yang sudah ter-watermark akan diekstraksi dan menghasilkan watermark yang sudah terlepas. Sebelum proses extraxtion akan diberikan attacks terhadap citra yang sudah ter-watermark, attacks diberikan untuk menguji kualitas watermark.

3.2. Perancangan Watermarking

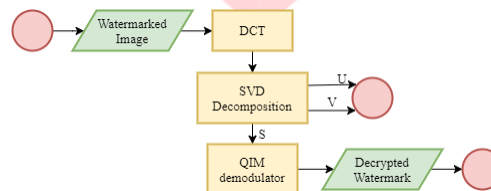
3.2.1. Embedding



Proses embedding dimulai dari ketika citra melalui DCT untuk merubah domain dari domain waktu ke domain frekuensi, kemudian melalui SVD Decomposition yang hasilnya berupa manipulasi menjadi matriks S , U , dan V . Matriks S akan melalui proses QIM sedangkan matriks U dan V akan diteruskan ke SVD Reconstruction. Pada QIM, matriks S akan disematkan watermark. Hasil dari QIM akan diteruskan ke SVD Reconstruction untuk digabungkan bersama matriks U dan V . Proses berikutnya adalah IDCT dimana fungsinya untuk mengembalikan domain citra dari domain frekuensi ke domain waktu. Output dari proses IDCT adalah citra yang sudah disematkan watermark.

Perbedaan proses embedding dengan optimasi terletak pada watermark yang sebelumnya melalui proses CS Reconstruction. CS Reconstruction akan merubah matriks pada watermark menjadi matriks sparse, dalam prosesnya menggunakan algoritma OMP. Hasilnya akan masuk ke proses QIM untuk disematkan ke matriks S dari SVD Decomposition. Proses selanjutnya sama seperti embedding tanpa optimasi dimana output dari proses IDCT adalah citra yang sudah disematkan watermark.

3.2.2. Extraction

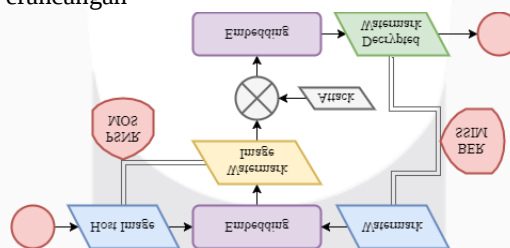


Proses extraction dimulai dengan citra yang sudah disematkan watermark melalui DCT untuk untuk merubah domain dari domain waktu ke domain frekuensi, kemudian melalui SVD Decomposition yang hasilnya berupa manipulasi menjadi matriks S , U , dan V . Berbeda dengan proses embedding, pada extraction matriks S akan melalui proses QIM demodulator sedangkan matriks U dan V akan diteruskan ke SVD Reconstruction. Pada QIM demodulator, matriks S akan didekripsi menjadi watermark.

Matriks U dan V hasil keluaran dari SVD Reconstruction tidak akan dilanjutkan di proses karena gambar citra setelah watermark diekstrak tidak akan jauh berbeda dengan citra sebelum dan sesudah proses embedding sehingga proses ini tidak dilanjutkan.

Perbedaan proses extraction dengan optimasi terletak pada dilakukan proses CS Reconstruction terhadap output QIM demodulator sebelum nantinya akan menghasilkan watermark yang sudah terdekripsi.

3.3. Analisa Uji Kualitas Perancangan



Tujuan dari penelitian adalah mengetahui kualitas watermark yang disematkan ke citra setelah diberikan attacks. Parameter kualitas watermark yang digunakan pada penelitian ini adalah robustness, embedding capacity, dan transparency sebagaimana sudah ditentukan di bab 1.4. Robustness dapat dianalisa dari nilai BER dan SSIM yang didapat dari membandingkan watermark setelah proses extraction dengan sebelum proses embedding. Transparency dapat dianalisa dari nilai MOS dan PSNR yang didapat dari membandingkan citra sesudah dengan sebelum proses embedding. Embedding capacity dapat dianalisa dari penyebaran bit watermark di dalam citra awal pada proses embedding.

4. ANALISIS DAN PENGOLAHAN DATA

4.1 Skenario Pengujian Sistem

4.1.1 Pengujian Sistem Embedding

Pengujian sistem *embedding* bertujuan untuk mengetahui pengaruh dari perubahan nilai dari parameter pada proses *embedding* terhadap nilai PSNR, MOS, *transparency*, dan *embedding capacity*.

Parameter	Ragam Nilai pada Parameter				
Ruang warna <i>host image</i>	RGB	YCbCr			
Resolusi <i>host image</i>	64 × 64	128 × 128	256 × 256	512 × 512	1.024 × 1.024
Bit kuantisasi	1	5	9		
Faktor input	0.2	0.6	1		
Rasio kompresi dari CS <i>Reconstruction</i>	62,5%	87,5%			

4.1.2 Pengujian Sistem *Extraction*

Pengujian sistem *extraction* bertujuan untuk mengetahui ketahanan citra *watermark* terhadap serangan yang diberikan setelah proses *embedding* dengan parameter paling optimal terhadap nilai BER, SSIM, dan *robustness*.

Parameter	Ragam Nilai pada Parameter			
JPEG <i>Compression</i>	25%	50%	75%	100%
<i>Rotate</i>	90°	180°	270°	
<i>Scaling</i>	50%	150%		
<i>Cropping</i>	8 <i>pixel</i>	16 <i>pixel</i>		
<i>Median Filter</i>	-			
AWGN	0.001	0.01	0.1	
<i>Salt and Paper Noise</i>	0.001	0.01	0.1	

4.2. Analisa Pengaruh Parameter-Parameter pada *Image Watermarking*

4.2.1 Analisis Pengaruh Parameter Ruang Warna *Host*

Ruang warna *host* merupakan bagian yang divisualkan *host* yang disisipkan *watermark*. Pada penelitian kali ini menguji antara ruang warna RGB dan YcbCr.

	Resolusi <i>host</i> = 64 × 64			
	Bit kuantisasi = 1			
	Faktor input = 1			
	Tanpa optimasi CS			
	Ruang warna <i>host</i>	PSNR	BER	SSIM
	RGB	59,078	0	1
	YCbCr	49,6479	0	1

Nilai PSNR pada ruang warna RGB lebih tinggi daripada di ruang warna YCbCr. Faktor penyebabnya antara lain perbedaan *range* nilai pada tiap *layer* yang ada pada masing-masing ruang warna. Pada RGB, *layer* R, G, dan B memiliki *range* nilai dari 0-255. Sedangkan pada YCbCr, *layer* Y memiliki *range* nilai 16-235, *layer* Cb dan Cr memiliki *range* nilai 16-240.

4.2.2 Analisis Pengaruh Parameter Resolusi *Host*

Resolusi *host* merupakan banyak *pixel host* yang disisipkan *watermark*. Pada penelitian kali ini menguji antara resolusi 64 × 64, 128 × 128, 256 × 256, 512 × 512, dan 1.024 × 1.024.

	Ruang warna <i>host</i> = RGB			
	Bit kuantisasi = 1			
	Faktor input = 0.2			
	Tanpa optimasi CS			
	Resolusi <i>host</i>	PSNR	BER	SSIM
	64 × 64	65,2054	0	1
	128 × 128	73,4027	0	1
	256 × 256	81,9656	0,0039	0,9915
	512 × 512	105,844	0	1
	1.024 × 1.024	113,108	0	1

Semakin besar resolusi *host* yang akan disisipkan maka semakin baik nilai PSNR-nya. Faktor penyebabnya antara lain dengan semakin banyak *pixel* dari citra *host* maka semakin besar juga cakupan yg disisipkan tiap satu bit citra *watermark*. Pengaruhnya, perubahan nilai bit pada *pixel* setelah disisipkan tidak jauh berubah dibandingkan dengan resolusi *host* yang lebih kecil.

4.2.3 Analisis Pengaruh Parameter Bit Kuantisasi

Bit kuantisasi merupakan level prosedur untuk membuat suatu isyarat yang bersifat kontinu ke dalam bentuk diskret. Bit kuantisasi menentukan nilai delta karena pada proses QIM diketahui $\Delta = \frac{1}{2^{N-1}}$, dimana N = bit kuantisasi.

	Ruang warna <i>host</i> = YCbCR			
	Resolusi <i>host</i> = 128×128			
	Faktor input = 0.6			
	Tanpa optimasi CS			
	Bit kuantisasi	PSNR	BER	SSIM
	1	52,0236	0	1
	5	52,1997	0	1
	9	52,1997	0	1

Semakin besar bit kuantisasinya maka semakin baik nilai PSNR-nya. Faktor penyebabnya antara lain dengan semakin besar bit kuantisasinya maka semakin kecil nilai delta. Nilai delta mempengaruhi

kualitas citra dimana semakin kecil deltanya maka semakin baik kualitas citra *host* yang sudah disisipkan.

4.2.4 Analisis Pengaruh Parameter Faktor Input

Faktor input merupakan bilangan yang menentukan berapa banyak bilangan pada matriks *S* yang akan disisipkan citra *watermark*. Matriks *S* yang akan disisipkan memiliki isi semua bit 0 kecuali diagonal utamanya sejumlah lebar sisi. Faktor input dengan nilai 1 berarti keseluruhan bilangan selain 0 akan disisipkan citra *watermark*.

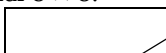
	Ruang warna <i>host</i> = YCbCR			
	Resolusi <i>host</i> = 128×128			
	Bit kuantisasi = 1			
	Tanpa optimasi CS			
Faktor input	PSNR	BER	SSIM	C
0.2	52,1997	0	1	1:64
0.6	52,0236	0	1	1:64
1	51,7109	0,0156	0,966	1:64

Semakin kecil faktor input maka semakin baik nilai PSNR-nya. Faktor penyebabnya antara lain dengan semakin besar juga cakupan yg disisipkan tiap satu bit citra *watermark*. Pengaruhnya, perubahan nilai bit pada *pixel* setelah disisipkan tidak jauh berubah dibandingkan dengan resolusi *host* yang lebih kecil.

4.3. Analisa Pengaruh Optimasi *Compressive Sensing* pada *Watermark*

4.3.1 Analisis Pengaruh Parameter Sisi pada CS *Reconstruction*

Jika sisi citra *watermark* tanpa kompresi (tetap ukuran 16×16) kemudian diberikan optimasi CS *Reconstruction*, maka dibutuhkan waktu yang lebih lama dibandingkan dengan citra *watermark* yang sisinya menjadi 8×8 .

	Ruang warna <i>host</i> = RGB			
	Resolusi <i>host</i> = 64x64			
	Bit kuantisasi = 1			
	Faktor input = 1			
	Rasio kompresi = 62.5%			
Sisi	PSNR	BER	SSIM	C
8 × 8	68.9396	0	1	1:64
16 × 16	62.2223	0	1	1:4

Selain itu, jika dari tabel di atas bisa disimpulkan semakin besar sisi awal citra *watermark* akan membuat nilai PSNR-nya lebih rendah dan *embedding capacity* lebih kecil daripada dengan matriks citra *watermark* yang sisi awalnya sudah dikompresi dulu sebelumnya.

4.3.2 Analisis Pengaruh Parameter Sisi Matriks Y pada CS *Reconstruction*

Matriks Y merupakan hasil dari CS *Reconstruction* yang akan disisipkan di proses *embedding* dan di ekstraksi dari proses *extraction*. Adapun hasil dari matriks Y ini tidak selalu persegi seperti matriks citra *watermark* awal. Maka akan dilakukan manipulasi data dimana matriks Y di sisi terpendek akan diberi nilai hingga ukuran Matriks Y menjadi persegi.

	Ruang warna <i>host</i> = RGB			
	Resolusi <i>host</i> = 64x64			
	Bit kuantisasi = 1			
	Faktor input = 1			
	Sisi citra <i>watermark</i> = 8 × 8			
Sisi Matriks Y	PSNR	BER	SSIM	C
8 × 5	68,9396	0	1	1:64
8 × 8	67.2358	0	1	1:64

Bisa disimpulkan matriks Y dengan sisinya persegi nilai PSNR-nya lebih rendah daripada dengan matriks awalnya.

4.3.3 Analisis Pengaruh Parameter Rasio Kompresi dari CS *Reconstruction*

Parameter rasio kompresi dari CS *Reconstruction* merupakan besar kompresi yang dilakukan saat CS *Reconstruction*.

	Ruang warna <i>host</i> = RGB			
	Resolusi <i>host</i> = 64x64			
	Bit kuantisasi = 1			
	Faktor input = 1			
Rasio kompresi	PSNR	BER	SSIM	C
tanpa CS	59,078	0	1	1:16
87.5%	67,2938	0	1	1:64
62.5%	68,9396	0	1	1:64

Disimpulkan semakin kecil nilai rasio kompresi maka semakin baik nilai PSNR-nya. Faktor penyebabnya antara lain dengan semakin besar juga cakupan yg disisipkan tiap satu bit citra *watermark*.

Pengaruhnya, perubahan nilai bit pada *pixel* setelah disisipkan tidak jauh berubah dibandingkan dengan resolusi *host* yang lebih kecil.

4.4. Analisa Ketahanan Watermark terhadap Serangan

4.4.1 Ketahanan Watermark terhadap Serangan Rotate

Ruang warna <i>host</i>	Ragam nilai serangan	tanpa CS		CS 87.5%		CS 62.5%		Resolusi	B.K	F.I
		BER	SSIM	BER	SSIM	BER	SSIM			
RGB	90°	0,1875	0,5928	0,5156	0,0849	0,5313	0,1568	1024	9	0.2
	180°	0,1563	0,6607	0,5000	0,1244	0,5938	0,0428	1024	9	0.2
	270°	0,1875	0,5928	0,5625	0,0147	0,6250	0,0789	1024	9	0.2
YCbCr	90°	0,1875	0,5928	0,5000	0,1028	0,5000	0,1191	1024	9	0.2
	180°	0,1563	0,6607	0,4844	0,1795	0,5469	0,1128	1024	9	0.2
	270°	0,1875	0,5928	0,5469	0,0019	0,5156	0,1710	1024	9	0.2

Bisa disimpulkan citra *watermark* lebih tahan dengan rotasi dengan pembalikan citra secara penuh. Optimasi terhadap citra *watermark* membuat citra *watermark* lebih rentan terhadap serangan ini. Rasio kompresi yang lebih kecil lebih sering menghasilkan BER yang lebih besar.

4.4.2 Ketahanan Watermark terhadap Serangan Scaling

Ruang warna <i>host</i>	Ragam nilai serangan	tanpa CS		CS 87.5%		CS 62.5%		Resolusi	B.K	F.I
		BER	SSIM	BER	SSIM	BER	SSIM			
RGB	50%	0,1875	0,5928	0,5000	0,0793	0,6563	0,0000	1024	9	0.2
	150%	0,4453	0,1184	0,6406	0,0377	0,7500	0,0787	1024	9	0.2
YCbCr	50%	0,1914	0,5833	0,5313	0,0440	0,6094	0,1141	1024	9	0.2
	150%	0,4648	0,0344	0,5625	0,0343	0,6719	0,0456	1024	9	0.2

Bisa disimpulkan citra *watermark* lebih tahan dengan penyekalaan lebih kecil dari ukuran awal. Optimasi terhadap citra *watermark* membuat citra *watermark* lebih rentan terhadap serangan ini. Rasio kompresi yang lebih kecil menghasilkan BER yang lebih besar.

4.4.3 Ketahanan Watermark terhadap Serangan Cropping

Ruang warna <i>host</i>	Ragam nilai serangan	tanpa CS		CS 87.5%		CS 62.5%		Resolusi	B.K	F.I
		BER	SSIM	BER	SSIM	BER	SSIM			
RGB	8 <i>pixel</i>	0,4805	0,0501	0,5625	0,0343	0,5938	0,0074	1024	9	0.2
	16 <i>pixel</i>	0,4688	0,0837	0,5781	0,0588	0,7656	0,2476	1024	9	0.2
YCbCr	8 <i>pixel</i>	0,4648	0,0254	0,4688	0,1813	0,6094	0,0631	1024	9	0.2
	16 <i>pixel</i>	0,5430	0,0940	0,6094	0,0112	0,5938	0,0428	1024	9	0.2

Bisa disimpulkan citra *watermark* lebih tahan dengan pemotongan *pixel* yang lebih sedikit pada citra *host* YCbCr dan tahan dengan pemotongan *pixel* yang lebih sedikit pada citra *host* RGB. Optimasi terhadap citra *watermark* membuat citra *watermark* lebih rentan terhadap serangan ini. Rasio kompresi yang lebih kecil menghasilkan BER yang lebih besar.

4.4.4 Ketahanan Watermark terhadap Serangan Median Filter

Ruang warna <i>host</i>	tanpa CS		CS 87.5%		CS 62.5%		Resolusi	B.K	F.I
	BER	SSIM	BER	SSIM	BER	SSIM			
RGB	0,4727	0,0779	0,6563	0,0747	0,6719	0,0432	1024	9	0.2
YCbCr	0,5117	0,0444	0,6406	0,0154	0,7344	0,1494	1024	9	0.2

Bisa disimpulkan *host* RGB lebih tahan *median filter* dari pada citra *host* YCbCr. Optimasi terhadap citra *watermark* membuat citra *watermark* lebih rentan terhadap serangan ini. Rasio kompresi yang lebih kecil menghasilkan BER yang lebih besar.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

1. Proses *image watermarking* menggunakan *Singular Value Decomposition* berbasis *Discrete Cosine Transform* dikombinasikan dengan pendekatan *Compressive Sensing* algoritma *Orthogonal Matching Pursuit* terbukti dapat direalisasikan.
2. *Compressive Sensing* algoritma *Orthogonal Matching Pursuit* pada *watermark* terhadap proses *image watermarking* menggunakan proses segmentasi yang sudah ada menurunkan nilai *robustness* dan meningkatkan nilai *embedding capacity*, dibandingkan proses *image watermarking* tanpa *Compressive Sensing*.
3. Besar faktor input dan rasio kompresi pada *CS Reconstruction* berbanding terbalik dengan besar PSNR.

4. Hasil *Mean Opinion Score* yang didapat berada di kisaran 3.89-4.24 yang berarti hasil proses *image watermarking* berada di kategori cukup-baik berdasarkan *Human Visual System* (HVS).
 5. Pemberian serangan terhadap citra yang sudah disisipkan dengan *watermark*, baik dengan maupun tanpa *Compressive Sensing*, cenderung sama dengan perbedaan tipis karena nilai BER yang dihasilkan saat citra *watermark* teroptimasi sedikit lebih tinggi dari BER dengan citra *watermark* tanpa optimasi. Contohnya, pada serangan **Scaling 150%** terhadap citra dengan **ukuran 1.024x1.024, bit kuantisasi 1, dan faktor input 1**, nilai BER saat citra *watermark* teroptimasi 62.5% adalah 0.6093, saat citra *watermark* teroptimasi 87.5% adalah 0.5781, dan saat citra *watermark* tanpa optimasi CS adalah 0.2265. (Lainnya bisa dilihat di lampiran.)
 6. Ruang warna RGB menghasilkan PSNR yang lebih tinggi (59.078-tak hingga) dari ruang warna YCbCr (49.647-52.1985).
 7. Ukuran resolusi citra *host* dan besar bit kuantisasi berbanding lurus dengan besar PSNR.
 8. CS *Reconstruction* dengan rasio kompresi yang lebih kecil menghasilkan BER yang lebih besar.
- 5.2 Saran
1. Menggunakan variasi ruang warna selain RGB dan YCbCr, seperti *grayscale*, *biner*, HSV, dan NTSC.
 2. Menggunakan algoritma *Compressive Sensing* selain OMP, seperti OMP-PKS, *L₁ Magic*.
 3. Menggunakan teknik dekomposisi selain SVD, seperti *QR Decomposition*.
 4. Menggunakan teknik segmentasi lainnya.
 5. Menggunakan transformasi *pre-processing* pada citra *host* selain DCT, seperti DWT, LWT, FFT, dan lain-lain.
 6. Menggunakan jenis *host file* selain citra, seperti audio, video, dan lain-lain.
 7. Menggunakan jenis *watermark file* selain citra, seperti audio, video, dan lain-lain

REFERENSI

- [1] J.S. LeenaJasmine ; L.Prabha, "Efficient Secure Image Watermarking Using Wavelet Transform," *International Journal of Computer Trends and Technology*, vol. 17, no. 3, pp. 133-137, 2004.
- [2] Neetha K. K., Aneesh M. Koya, "A Compressive Sensing Approach to DCT," *2015 International Conference on Control, Communication & Computing India (ICCC)*, pp. 495-500, November 2015.
- [3] Ali A. H. Karah Bash and Sema K. Kayhan, "Watermarked Compressive Sensing Measurements Reconstructed by the Greedy Algorithms," *International Journal of Computer Theory and Engineering*, vol. 7, no. 3, pp. 219-222, June 2015.
- [4] F. H. Pugar, "Blind Watermarking Pada Citra Digitl Menggunakan Discrete Wavelet Transform dan M-ary Modulation," Teknik Informatika-Telkom University, Bandung, 2016.
- [5] Abdul Kadir; Adhi Susanto, "Pengolahan Cirta, Teori dan Aplikasi," Andi, Yogyakarta, 2012.
- [6] Amy Tun; Yadana Thein, "Digital Image Watermarking Scheme Based on LWT and DCT," *IACSIT International Journal of Engineering and Technology*, vol. 5, no. 2, pp. 272-277, 2013.
- [7] S. Sari, "Analysis of Inverse Discrete Cosinus Transformation of Compressive Video Grayscale Sensing," S1 Teknik Telekomunikasi - Telkom University, Bandung, 2011.
- [8] C.Venkata Narasimhulu; K.Satya Prasad, "A Hybrid Watermarking Scheme Using Contourlet Transform and Singular Value Decomposition," *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, vol. 10, no. 9, pp. 12-16, 2010.
- [9] Qiao Li; Ingemar J.Cox, "Using Perceptual Models to Improve Fidelity and Provide Resistance to Valumetric Scaling for Quantization Index Modulation Watermarking," *IEEE Transaction on Informations Forensics and Security*, vol. 2, no. 2, pp. 127-139, 2013.
- [10] T. V. J. Sipayung, "Watermarking Audio Dengan Skema QIM Menggunakan Transformasi Wavelet," S1 Teknik Informatika - Telkom University, Bandung, 2007.