

Image Watermarking pada Citra Medis menggunakan Compressive Sensing berbasis Stationary Wavelet Transform

YASQI HAFIZHANA, IRMA SAFITRI, LEDYA NOVAMIZANTI, NUR IBRAHIM

Universitas Telkom, Indonesia
Email: irmasaf@telkomuniversity.ac.id

Received 16 Agustus 2019 | *Revised* 3 September 2019 | *Accepted* 24 September 2019

ABSTRAK

Watermarking pada citra medis dilakukan untuk melindungi hak kepemilikan dan keaslian sebuah citra medis. Proses embedding dan extraction dirancang menggunakan metode Stationary Wavelet Transform (SWT) dan Statistical Mean Manipulation (SMM) untuk mengubah citra host menjadi sinyal sparse kemudian memasuki proses watermarking. Citra watermark dioptimasi dengan menggunakan metode Compressive Sensing (CS). Hasil akhir dari penelitian ini menunjukkan simulasi Image Watermarking dengan Bit Error Rate (BER) mendekati nilai nol dan PSNR lebih besar dari 40 dB, tanpa diberikan serangan. Penerapan Compressive Sensing menyebabkan nilai PSNR meningkat hingga 3,5 dB dan embedding capacity menjadi empat kali lipat lebih baik.

Kata Kunci: *Image watermarking, Telemedicine, Stationary Wavelet Transform, Statistical Mean Manipulation, Compressive Sensing.*

ABSTRACT

Watermarking in medical images is carried out to protect ownership rights and authenticity of a medical image. The embedding and extraction process was designed using Stationary wavelet transform (SWT) and Statistical Mean Manipulation (SMM) methods to convert the host image into a sparse signal and then enter the watermarking process. The watermark image is optimized using the Compressive Sensing (CS) method. The final result of this final project shows the simulation of Image Watermarking with the Bit Error Rate (BER) approaching zero and PSNR greater than 40 dB, without being given an attack. The application of the Compressive Sensing pursuit will cause the PSNR increase up to 3.5 dB and embedding capacity four times better.

Keywords: *Image watermarking, Telemedicine, Stationary Wavelet Transform, Statistical Mean Manipulation, Compressive Sensing.*

1. PENDAHULUAN

Telemedicine merupakan istilah untuk penggunaan teknologi informasi pada dunia medis. Penggunaan teknologi informasi dalam bidang medis memberikan kemudahan dalam melakukan penanganan medis, namun kemudahan tersebut dapat menjadi ancaman keamanan karena mudahnya manipulasi dan replikasi. Dalam penggunaan EPR (*Electronic Patient Record*) membutuhkan validasi yaitu keaslian dan kepemilikan informasi medis tersebut (**Zain & Clarke, 2005**). Teknik *watermarking* dapat diterapkan sebagai langkah untuk melindungi keaslian dan kepemilikan suatu informasi data digital.

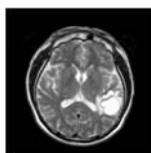
Pada penelitian ini diterapkan metode *Stationary Wavelet Transform* (SWT) dan *Statistical Mean Manipulation* (SMM). Metode tersebut dipilih karena tidak ditemukan penelitian dengan topik *image watermarking* mengguna kombinasi kedua metode tersebut. Pemilihan metode SWT merujuk kepada beberapa penelitian. Pada penelitian (**Zhang dkk, 2010**) menyatakan bahwa Metode SWT lebih baik dibandingkan metode *Discrete Wavelet Transform* (DWT) dalam hal *translation invariant property*. Berdasarkan penelitian (**Purohit dkk, 2017**) dapat diketahui bahwa, pada *image watermarking*, metode SWT menunjukkan peningkatan pada nilai *Peak Signal to Noise Ratio* (PSNR) dan citra *watermark* yang ter-*extraction* sangat berkorelasi dengan *watermark* aslinya untuk berbagai serangan. Kemudian penelitian (**Kumar & Ramashri, 2012**) menyatakan pada kesimpulannya bahwa penggunaan metode SWT membantu meningkatkan kapasitas untuk *watermark* berukuran besar, dan metode ini dapat diperluas untuk citra berwarna. Pemilihan metode SMM mengacu pada penelitian (**Li & Yu, 2000**) yang menyatakan bahwa SMM membuat *watermarking* lebih tahan terhadap serangan, terutama pada serangan yang merusak struktur sinkronisasi sinyal dalam bentuk audio seperti *jittering*.

1.1 Citra Digital

Citra digital adalah suatu fungsi kontinu intensitas cahaya dalam bentuk matriks x dan y ($f(x, y)$) atau dua dimensi. Pada matriks tersebut simbol x menyatakan jumlah baris pada matriks, dan simbol y menyatakan jumlah kolom pada matriks. Persamaan (1) merupakan matriks citra digital dengan ukuran $[M \times N]$.

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

Pada setiap titik koordinat matriks tersebut memiliki nilai bilangan bulat yang merupakan tingkat kedalaman warna (*color depth*) pada citra digital. Titik-titik pada citra digital tersebut merupakan elemen terkecil pada citra digital yaitu *pixel*. Suatu citra digital memiliki resolusi atau ukuran suatu citra digital yang sesuai dengan banyaknya jumlah *pixel*.



Gambar 1. Contoh Citra Medis (Jones, 2013)

Gambar 1 menunjukkan contoh citra medis. Citra medis adalah salah satu penerapan teknologi citra digital dalam bidang medis. Citra medis merupakan hasil dari teknik perekaman pada beberapa bagian organ tubuh manusia menggunakan teknologi alat perekam medis dengan

tujuan tertentu. Citra medis menjadi alat pendukung dalam penanganan medis terhadap pasien **(Zain & Clarke, 2005)**.

1.2 Watermarking

Watermarking merupakan proses penyisipan informasi terhadap suatu data digital (*host*) seperti teks, suara, gambar/citra (*image*), dan gambar bergerak (*video*). Informasi yang disisipkan merupakan suatu tanda rahasia yang tidak kasat mata. Pada *watermarking*, informasi rahasia diharapkan tidak dapat direkonstruksi atau dilihat oleh siapa pun, terkecuali orang yang berwenang **(Cox dkk, 2008)**.

1.3 Compressive Sensing

Compressive Sensing (CS) merupakan suatu metode kompresi dan rekonstruksi pada suatu sinyal atau citra tertentu dengan jumlah sampel yang sedikit. CS mengambil sampel (dalam mode independen sinyal) pada tingkat rendah, kemudian menggunakan daya komputasi untuk rekonstruksi yang terdeteksi sebagai rangkaian pengukuran yang tidak lengkap **(Candes & Wakin, 2008)**. Dalam proses rekonstruksi matriks citra digital, terdapat transformasi yang menjadi alur dalam sistem CS yaitu *Sparsity Transform* (Transformasi penjarang- ψ) dan *Projection Transform* (Transformasi proyeksi- ϕ).

CS dapat merekonstruksi sinyal dengan menggunakan sejumlah pengukuran acak yang disebut *sensing matrix* dan sinyal dalam bentuk *sparse*. Citra *sparse* mengandung beberapa koefisien sebagai *non-zero* dan koefisien lainnya adalah *zero* **(Pangestu, 2017)**. CS secara umum dapat digunakan dalam proses *watermarking*. CS dapat diimplementasikan dalam tiga algoritma proses *watermarking*, yaitu:

1. Encoder

Dalam proses ini, *watermark* v disisipkan pada CS *Measurement* dari sinyal *sparse* x . Citra *watermarking* sendiri direpresentasikan dengan Persamaan (2),

$$y_v = \phi x + Dv \quad (2)$$

dimana D adalah matriks acak dengan ukuran $M \times L$ dan itu harus diketahui sebelum memulai prosedur *embedding* dan *extraction* **(Bash & Kayhan, 2015)**.

2. Algoritma Rekonstruksi

Orthogonal Matching Pursuit merupakan *greedy algorithm* hasil pengembangan dari *Matching Pursuit* (MP). OMP memprediksi besaran koefisien *non-zero* dari x dengan menyelesaikan kesalahan pada kuadrat terkecil antara proyeksi *orthogonal* dari x yang sudah dikembalikan dan perhitungan vektor y **(Bash & Kayhan, 2015)**. Perhitungan dari CS *watermarking* y_v termasuk k -*sparse* x dan L bit citra yang sudah diberikan *watermarking* v , kemudian y_v direkonstruksi menggunakan algoritma OMP dari y_v yang dihitung dengan Persamaan (3),

$$\hat{x} = \arg \min_x \|y - \phi x\|_2 \quad (3)$$

diubah menjadi Persamaan (4),

$$\hat{z} = \arg \min_x \|y_v - HZ\|_2 \quad (4)$$

dimana $\hat{z} = \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{v} \end{bmatrix}$ dan $z = \begin{bmatrix} x \\ v \end{bmatrix}$ **(Bash & Kayhan, 2015)**.

3. Decoder

Decoder dalam proses *extraction* citra *watermarking*. Setelah rekonstruksi melalui CS *measurements watermarking*, *decoder* digunakan untuk mengekstrak *watermark* dengan Persamaan (5) sampai dengan Persamaan (7),

$$\hat{z} = \arg \min_x \|y_v - HZ\|_2 \quad (5)$$

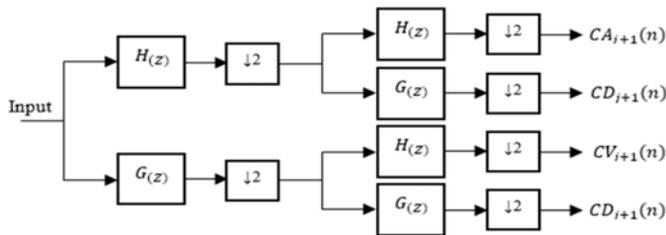
$$\hat{v} = \alpha * \text{sgn}(\tilde{v}) \quad (6)$$

$$\hat{x} = \arg \min_x \|(y_v - D\hat{v}) - \phi x\|_2 \quad (7)$$

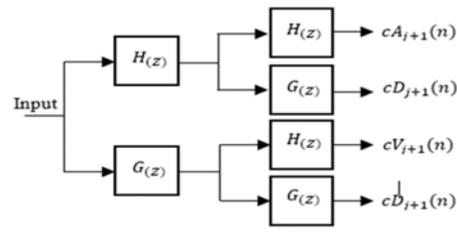
dimana \hat{x} adalah citra yang dipulihkan dan \hat{v} adalah citra *watermark* yang sudah diekstraksi (Bash & Kayhan, 2015).

1.4 Stationary Wavelet Transform (SWT)

Stationary Wavelet Transform (SWT) memiliki sistem kerja atau algoritma yang hampir sama dengan *Discrete Wavelet Transform* (DWT). Meskipun terdapat pada domain yang sama, namun pada SWT tidak dilakukan *downsampling* pada setiap *step* dekomposisinya. Oleh karena itu SWT memiliki nama lain *Undecimated Wavelet Transform* (*undecimated* sendiri memiliki makna tidak dilakukannya *downsampling*). Transformasi *wavelet* sendiri, berfungsi untuk memperlebar sinyal digital ke dalam bentuk domain *wavelet*. Proses ini bertujuan untuk mendapatkan informasi yang tidak muncul pada domain aslinya (umumnya waktu) (Ward, 2018). Dekomposisi dilakukan untuk mendapatkan sinyal pada frekuensi tinggi dan rendah dengan cara melewatkan sinyal informasi ke *High Pass Filter* (HPF) ($G(z)$), dan *Low Pass Filter* (LPF) ($H(z)$). Perbedaan antara SWT dengan DWT terdapat pada operator *downsampling* yang tidak digunakan pada SWT. Perbedaan tersebut dapat dilihat pada Gambar 2 diagram proses DWT dan Gambar 3 diagram proses SWT.



Gambar 2. Diagram DWT



Gambar 3. Diagram SWT

Downsampling sendiri menghilangkan koefisien *redundant*, yang sebenarnya tidak diperlukan untuk merekonstruksi sinyal secara sempurna (Ward, 2018). Pada DWT, koefisien *upsampling* (Bash & Kayhan, 2015) dan *downsampling* ada pada setiap proses dekomposisi. Karena hal ini pula, metode SWT lebih tangguh dibandingkan metode DWT (Zhang dkk, 2010).

1.5 Statistical Mean Manipulation (SMM)

Statistical Mean Manipulation (SMM) merupakan salah satu metode penyisipan pada lingkup *watermarking* yang menggunakan pengolahan statistik sebagai teknik penyisipan dengan pengambilan nilai rata-rata terhadap sejumlah bilangan tertentu. Dengan menggunakan metode ini, nilai rata-rata pada matriks sinyal *input* tertentu dapat diatur secara statistik. Pada bilangan yang telah diolah secara statistik, *watermark image* mewakili masing-masing bit "0" dan bit "1" pada susunan nilai rata-rata. Formula untuk teknik penyisipan, pada bit "1" ditunjukkan oleh Persamaan (8) dan pada bit "0" ditunjukkan oleh persamaan (9),

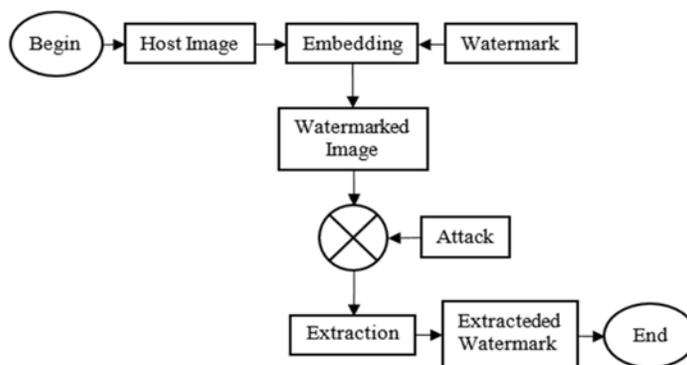
$$x_{cw}(n) = x_c(n) - \mu x + \alpha \quad (8)$$

$$x_{cw}(n) = x_c(n) - \mu x - \alpha \quad (9)$$

dimana, $x_c(n)$ adalah sinyal dalam domain *cepstrum*, μ_i adalah rata-rata sinyal $x_c(n)$, α adalah faktor manipulasi rata-rata pada SMM yang dapat memastikan keandalan dari penyisipan ini, dan $x_{cw}(n)$ adalah *image* yang telah ter-*watermark*. Kekuatan penyisipan *watermark* dikendalikan oleh α . koefisien μ pada *watermark* dapat dideteksi dengan menghitung dan membandingkan ambang batas yang telah ditetapkan. Hal ini dikarenakan koefisien μ memiliki nilai pada kisaran 10^{-4} yang cukup kecil untuk perbandingan tersebut (Wen dkk, 2009).

2. PEMODELAN SISTEM

Pada penelitian ini dilakukan perancangan sistem *image watermarking* pada citra medis dengan menggunakan metode *Stationary Wavelet Transformsm* (SWT) dan teknik penyisipan *Statistical Mean Manipulation* (SMM) dengan *Compressive Sensing* (CS) algoritma *Orthogonal Matching Pursuit* (OMP). Gambar 4 menunjukkan skema model sistem yang digunakan pada penelitian ini.



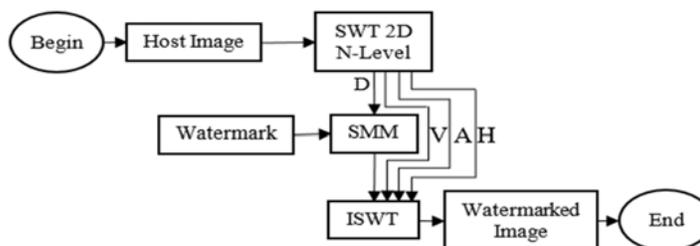
Gambar 4. Bagan Model Perancangan Simulasi *Watermarking*

Proses implementasi *image watermarking* pada sebuah citra digital secara umum terbagi kedalam dua proses, penyisipan (*embedding*) dan pemulihan atau ekstraksi (*extraction*). Pada proses *embedding*, dilakukan penyisipan *watermark image* terhadap *host* (berupa data citra) hingga didapatkan keluaran *Watermarked Image*. Pada proses *extraction*, dilakukan pemulihan atau ekstraksi terhadap *watermarked image* untuk dapat merekonstruksi *watermark image* kembali. Setelah proses *embedding*, dilakukan serangan terhadap *watermarked image* untuk menguji kualitas dan ketahanan sistem *watermarking* (*robustness*).

2.1 Perancangan *Watermarking* Tanpa *Compressive Sensing*

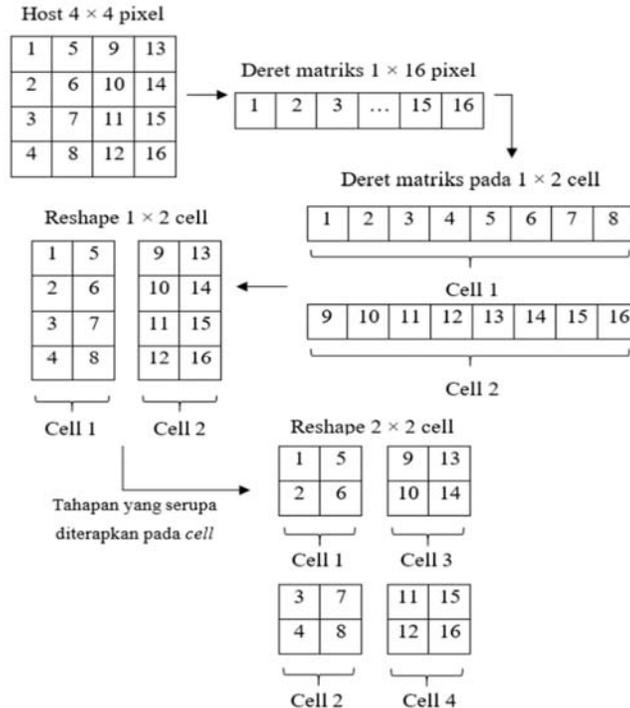
1. *Embedding*

Bagan dan tahapan-tahapan pada proses *embedding* ditunjukkan pada Gambar 5,



Gambar 5. Bagan Tahap *Embedding* Tanpa *Compressive Sensing*

- 1) Tahap pertama pada proses *embedding* adalah pemilihan *host* dan *watermark image*. *Host* yang dipilih merupakan citra medis digital RGB 16bit dalam format *.bmp dengan resolusi 256×256 , 512×512 , 1024×1024 , 2048×2048 *pixel*. *Watermark image* yang digunakan adalah citra biner dalam format *.bmp dengan resolusi 16×16 .
- 2) Dilakukan proses segmentasi pada setiap *layer host* untuk mempermudah proses *embedding*. Dapat dilihat pada Gambar 6, ilustrasi tersebut merupakan proses segmentasi pada *host* gambar dengan resolusi 4×4 *pixel* yang disisipkan *watermark* dengan resolusi 2×2 *pixel*.

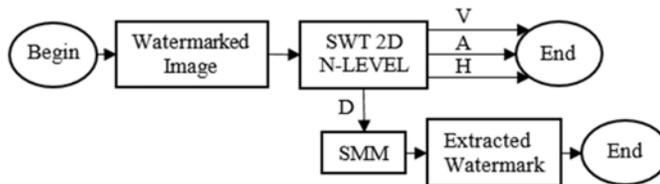


Gambar 6. Ilustrasi Proses Segmentasi

- 3) Tahap berikutnya dilakukan *filtering* terhadap *host* menggunakan *Stationary Wavelet Transform* (SWT) pada level tertentu untuk mengubah *host* kedalam bentuk *sparse*. Pada SWT 2 dimensi N-level, dilakukan filter terhadap sampel dengan menggunakan dua filter yaitu *Low Pass Filter* (LPF) ($H(z)$) dan *High Pass Filter* (HPF) ($G(z)$). Pada penelitian ini dipilih keluaran filter LPF SWT 2D dengan *level 3* yaitu matriks *diagonal* (D) sebagai sampel yang disisipkan *watermark image*.
- 4) Tahap berikutnya adalah penyisipan *watermark* pada hasil *filtering*. *Watermark image* yang dipilih adalah citra biner dengan format *.bmp. *Watermark image* disisipkan pada matriks diagonal hasil dari proses SWT 2 dimensi *level 3* menggunakan metode *Statistical Mean Manipulation* (SMM).
- 5) Sesuai dengan Gambar 4, sampel yang telah disisipkan *watermark* digabungkan kembali dengan sampel lainnya menggunakan metode rekonstruksi *Inverse Stationary Wavelet Transform* (ISWT) untuk mendapatkan *watermarked image*.

2. Extraction

Proses *extraction* digambarkan sesuai dengan bagan pada Gambar 7.



Gambar 7. Bagan Tahap *Extraction* Tanpa *Compressive Sensing*

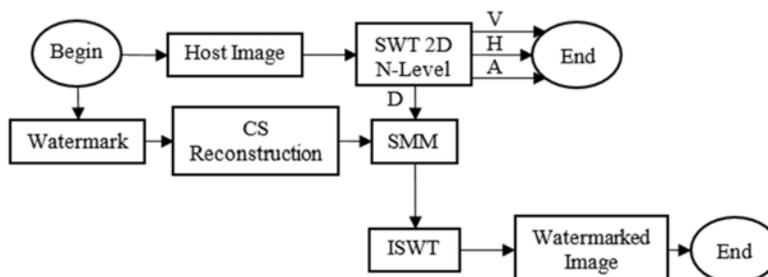
Tahap pelaksanaan dijelaskan dalam urutan berikut ini:

- 1) Dilakukan proses segmentasi pada setiap *layer host* seperti pada proses *embedding*. Ilustrasi proses segmentasi dapat dilihat pada pada Gambar 7.
- 2) *Watermarked image* diubah kedalam bentuk *sparse* dengan menggunakan metode dekomposisi SWT 2 dimensi *N-level*. Pada proses ini digunakan SWT 2 dimensi *level 3* (sesuai dengan SWT 2 dimensi *N-level* pada proses *embedding*). Dalam proses *extraction*, digunakan sampel matriks *diagonal* (D), karena penyisipan pada proses *embedding* dilakukan pada matriks *diagonal* (D).
- 3) Kemudian sampel tersebut melalui proses pemulihan *watermark* atau rekonstruksi *watermark* dengan menggunakan metode SMM.
- 4) Hasil akhir dari proses *extraction* berupa *watermark image*.

2.2 Perancangan *Watermarking* Dengan *Compressive Sensing*

1. *Embedding*

Gambar 8 merupakan bagan dan tahap-tahap pada proses *embedding* dengan *compressive sensing*,

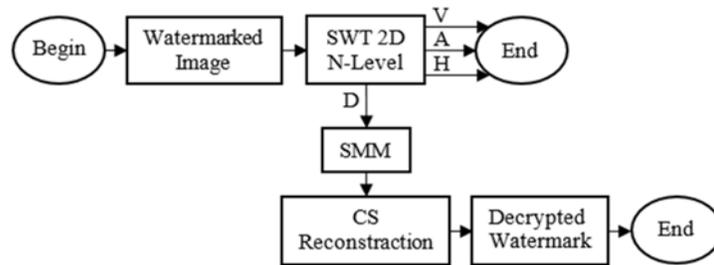


Gambar 8. Bagan Tahap *Embedding* Dengan *Compressive Sensing*

Seperti yang dapat dilihat pada Gambar 8, tidak terdapat banyak perbedaan dengan proses *embedding* tanpa CS. Perbedaan hanya terdapat pada pengolahan *watermark image*. Sebelum disisipkan pada *host*, *watermark image* diolah terlebih dahulu melalui proses *compressive sensing reconstruction*. *Compressive sensing reconstruction* mengubah matriks pada *watermark image* ke dalam bentuk *sparse*. Hasil dari proses tersebut kemudian di sisipkan kedalam *host* menggunakan metode *Statistical Mean Manipulation* (SMM).

2. *Extraction*

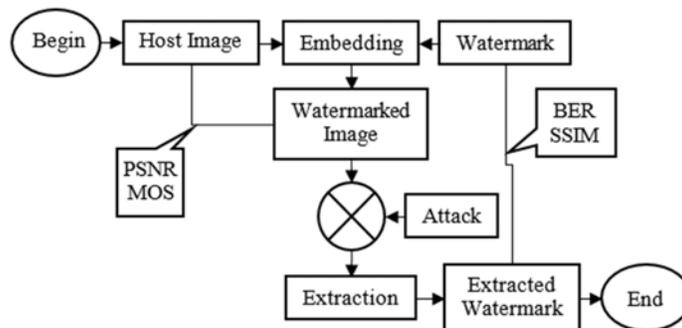
Pada Gambar 9 ditunjukkan proses *extraction* dengan *compressive sensing*. Pada proses *extraction* ini, setelah dilakukan proses pemulihan pada *watermark* dengan metode SMM, *watermark image* dikompresi dengan *compressive sensing reconstruction*.



Gambar 9. Bagan Tahap *Extraction* Dengan *Compressive Sensing*

2.3 Analisis Kualitas *Watermarking*

Proses berikut ini dilakukan untuk memenuhi tujuan penelitian ini yaitu mengetahui kualitas sistem *watermarking* yang dirancang. Parameter kualitas *watermarking* yang diperhatikan adalah *robustness*, *transparency*, dan *embedding capacity*. Tingkat *robustness* pada *watermarking* dapat dianalisis melalui nilai BER dengan membandingkan antara *watermark* setelah proses *extraction* dan *watermark* sebelum proses *embedding*. Analisis pada *robustness* dilakukan dengan atau tanpa serangan. Serangan pada *watermarking* yang diterapkan pada penelitian ini adalah *rotate*, *scaling*, *cropping*, *filtering*, *noise* dan *Joint Photographic Experts Group (JPEG) compression*. Tingkat *transparency* pada *watermarking* dapat dianalisis melalui nilai PSNR dan MOS dengan membandingkan antara *host* (citra asli) dengan *watermarked image* dalam proses *embedding*. *Embedding capacity* dapat dianalisis melalui penyebaran bit *watermark* di dalam *host* pada proses *embedding*. Tingkat kualitas *watermark* yang terekstraksi dapat dianalisis melalui nilai BER dan SSIM dengan membandingkan antara *watermark* asli dengan *watermark* setelah proses pengolahan atau transmisi. Gambar 10 menunjukkan bagan dari tahap analisis kualitas *watermarking* penelitian ini.



Gambar 10. Bagan Analisis Kualitas Perancangan Simulasi *Watermarking*

3. PENGUJIAN DAN ANALISIS DATA

3.1 Skenario Pengujian Sistem *Image Watermarkings*

Pengujian dilakukan dalam dua bagian, yaitu pengujian terhadap proses *embedding* dan pengujian terhadap proses *extraction*. Pengujian terhadap proses *embedding* pada sistem *image watermarking* dilakukan untuk mengetahui nilai PSNR, MOS, *transparency* dan *embedding capacity* berdasarkan perubahan pada nilai parameter proses *embedding*. Parameter pengujian proses *embedding* dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter Pengujian Proses *Embedding*

Parameter	Variasi Nilai Parameter				
	256 × 256	512 × 512	1.024 × 1.024	2.048 × 2.048	
Resolusi Citra <i>Host</i>					
Faktor Sisip	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9
Alfa	0,01	0,03	0,05	0,07	0,09
Rasio Kompresi Pada CS	20%	40%	60%		

Pengujian pada proses *extraction* sistem *image watermarking* dilakukan untuk menganalisis ketahanan *watermark* setelah dilakukan penyisipan melalui proses *embedding*. Pengujian pada proses *extraction* dilakukan dengan atau tanpa serangan terhadap *watermarked image*. Parameter pengujian serangan dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter Serangan pada Proses *Extraction*

Jenis Serangan	Index Serangan			
	25%	50%	75%	100%
JPEG Compression				
Rotating	90°	180°	270°	
Scaling	50%		150%	
Cropping	8 pixel		16 pixel	
Filtering	Median			
Additive White Gaussian Noise (AWGN)	0,001	0,01	0,1	
Salt and Pepper Noise	0,001	0,01	0,1	

3.2 Pengaruh Perubahan Parameter-Parameter pada *Image Watermarking*

3.2.1 Pengaruh Perubahan Resolusi *Host*

Hasil pengujian pengaruh resolusi *host* dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Pengujian Pengaruh Resolusi *Host*

Resolusi <i>Host</i>	Faktor Sisip = 0,9 , Alfa = 0,01 , Tanpa CS			
	BER	SSIM	PSNR	Capacity
256 × 256	0,035156	0,921782	53,67941	256
512 × 512	0,09375	0,794242	56,03058	1024
1.024 × 1.024	0,113281	0,755206	61,04405	4096
2.048 × 2.048	0,085938	0,801745	64,7776	16384

Berdasarkan Tabel 3, dapat diamati bahwa semakin besar resolusi *host* maka semakin besar pula nilai PSNR dan *embedding capacity*. Hal tersebut dapat terjadi karena cakupan wilayah yang dapat disisipkan *watermark* semakin besar sesuai dengan banyaknya *pixel* pada citra *host*. Sedangkan nilai BER dan SSIM mengalami fluktuasi dengan *trend* yang menurun, karena jumlah *pixel* yang banyak pada proses penyisipan memperbesar kemungkinan terjadinya perubahan pada nilai *pixel* pada *host* secara masif dan menyebabkan kesalahan pada proses *extraction* atau pemulihan citra *watermark*.

3.2.2 Pengaruh Nilai Faktor Sisip

Pada proses penyisipan *watermark*, dibutuhkan suatu nilai yang menentukan banyaknya bagian bilangan pada suatu matriks yang hendak disisipkan *watermark*. Faktor sisip dengan nilai 1 pada pengujian menunjukkan bahwa seluruh bilangan pada bagian matriks D dilakukan penyisipan *watermark*. Hasil pengujian pengaruh nilai faktor sisip dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Pengujian Pengaruh Nilai Faktor Sisip

Faktor Sisip	Resolusi <i>Host</i> = 256 × 256 , Alfa = 0,01 , Tanpa CS			
	BER	SSIM	PSNR	Capacity
0,1	0,125	0,729237	66,45033	256
0,3	0,058594	0,86509	60,09633	256
0,5	0,066406	0,853764	56,62621	256
0,7	0,085938	0,810302	54,98198	256
0,9	0,035156	0,921782	53,67941	256

Semakin tinggi nilai faktor sisip maka semakin rendah nilai PSNR, karena semakin banyaknya *pixel* yang terlibat pada penyisipan tiap bit *watermark* menyebabkan besarnya perubahan nilai matriks pada citra *host*. Tetapi, semakin besar nilai faktor sisip semakin baik nilai BER dan SSIM, karena semakin besarnya nilai faktor sisip menyebabkan banyaknya bilangan pada matriks *host* yang dapat disisipkan tiap bit *watermark*.

3.2.3 Pengaruh Nilai Alfa

Pada metode penyisipan *statistical mean manipulation*, nilai alfa menentukan kekuatan penyisipan *watermark* terhadap *host*. Hasil pengujian pada Tabel 5 menunjukkan bahwa semakin kecil nilai alfa pada pengujian semakin besar nilai PSNR yang didapatkan. Salah satu penyebabnya antara lain nilai alfa (pada *range* pengujian) hanya mempengaruhi *watermark* pada proses penyisipan, dimana semakin kecil nilai alfa maka semakin baik bit citra *watermark* yang disisipkan.

Tabel 5. Hasil Pengujian Pengaruh Nilai Alfa

Alfa	Resolusi <i>Host</i> = 256 × 256 , Faktor Sisip = 0,9 , Tanpa CS			
	BER	SSIM	PSNR	Capacity
0,01	0,035156	0,921782	53,67941	256
0,03	0,035156	0,921782	50,21527	256
0,05	0,035156	0,921782	46,48018	256
0,07	0,035156	0,921782	44,25782	256
0,09	0,035156	0,921782	41,80584	256

3.3 Analisis Pengaruh *Compressive Sensing* pada *Watermark*

Compressive Sensing (CS) dengan algoritma *Orthogonal Matching Pursuit* (OMP) diimplementasikan pada penelitian ini. Penggunaan CS algoritma OMP dilakukan pada citra *watermark* yang disisipkan pada proses *watermarking*. Dalam pengamatan ini dilakukan kompresi dengan hasil keluaran berdimensi 16×16 *pixel* dan 8×8 *pixel*. Rasio kompresi yang digunakan adalah 20%, 40% dan 60%.

3.3.1 Analisis Pengaruh Resolusi Kompresi *Compressive Sensing*

Resolusi kompresi merupakan dimensi yang digunakan sebagai hasil dari proses kompresi. Hasil pengujian pengaruh resolusi *compressive sensing* ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil Pengujian Pengaruh Resolusi *Compressive Sensing*

Pixel	Resolusi <i>Host</i> = 256 × 256 , Faktor Sisip = 0,9 , Alfa = 0,01				
	BER	SSIM	PSNR	Capacity	Ket.
16×16	0,035156	0,921782	53,67941	256	Tanpa CS
16×16	0,125	0,678145	53,73613	256	CS = 20%
8×8	0,3125	0,320469	56,86462	1.024	CS = 20%

Semakin kecil resolusi kompresi, maka semakin baik nilai PSNR dan *embedding capacity*-nya. Hal ini terjadi karena semakin kecilnya resolusi *watermark* yang disisipkan dapat berpengaruh terhadap cakupan penyisipan yang semakin besar setiap bit *watermark* terhadap citra *host*.

3.3.2 Analisis Pengaruh Rasio Kompresi *Compressive Sensing*

Rasio kompresi merupakan perbandingan antara data asli dengan data hasil kompresi. Hasil pengujian pengaruh rasio kompresi *compressive sensing* dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Hasil Pengujian Pengaruh Rasio Kompresi *Compressive Sensing*

Pixel	CS	Resolusi Host = 256 × 256 , Faktor Sisip = 0,9 , Alfa = 0,01			
		BER	SSIM	PSNR	Capacity
16×16	Tanpa CS	0,035156	0,921782	53,67941	256
	20%	0,125	0,678145	53,73613	256
	40%	0,082031	0,786366	53,62623	256
8×8	60%	0,042969	0,90227	53,65688	256
	20%	0,3125	0,320469	56,86462	1.024
	40%	0,234375	0,486996	56,50376	1.024
	60%	0,078125	0,82811	56,07586	1.024

Nilai PSNR dan *embedding capacity* mencapai nilai optimum pada rasio kompresi 60% dengan resolusi kompresi 8×8 *pixel*. Hasil tersebut dapat disebabkan oleh semakin ringkasnya resolusi citra *watermark* dan semakin baiknya kualitas kompresi.

3.4 Analisis Ketahanan *Watermark* Terhadap Serangan

3.4.1 Ketahanan *Watermark* terhadap Serangan *Rotating*

Rotating merupakan proses pengolahan data gambar dengan mengubah sudut gambar pada titik pusat rotasinya. Berdasarkan Tabel 8, dapat diamati bahwa *watermark* bertahan lebih baik pada serangan putaran 180° dibandingkan pada serangan 90° dan 270°. Implementasi CS terhadap citra *watermark* membuat *watermark*-nya lebih rentan terhadap serangan kecuali pada serangan *rotating* 90°, dimana terlihat adanya peningkatan ketahanan terhadap serangan. Kemudian, pada penerapan CS rasio 60%, *watermark* mengalami peningkatan ketahanan terhadap serangan *rotating* 180° dengan cukup baik.

Tabel 8. Hasil Pengujian Serangan *Rotating*

Status	Rotating	Value	Tanpa CS	CS 20%	CS 40%	CS 60%
Resolusi Host 256 × 256 Faktor Sisip 0,9 Alfa 0,01	90°	BER	0,429688	0,40625	0,40625	0,40625
		SSIM	0,00038	0,052669	0,052669	0,052669
		PSNR	53,67941	56,86462	56,50376	56,07586
	180°	BER	0,328125	0,40625	0,375	0,265625
		SSIM	0,276606	0,120553	0,226615	0,459151
		PSNR	53,67941	56,86462	56,50376	56,07586
	270°	BER	0,453125	0,421875	0,421875	0,421875
		SSIM	0,019651	0,019925	0,019925	0,008583
		PSNR	53,67941	56,86462	56,50376	56,07586

3.4.2 Ketahanan *Watermark* terhadap Serangan *Scaling*

Scaling merupakan proses pengolahan gambar dengan memperbesar atau memperkecil suatu gambar. *Scaling* dapat digunakan untuk memperjelas suatu gambar. Hasil pengujian serangan *scaling* dapat dilihat pada Tabel 9.

Tabel 9. Hasil Pengujian Serangan *Scaling*

Status	Scaling	Value	Tanpa CS	CS 20%	CS 40%	CS 60%
Resolusi Host 256 × 256 Faktor Sisip 0,9 Alfa 0,01	50%	BER	0,1875	0,359375	0,34375	0,359375
		SSIM	0,586788	0,238066	0,242807	0,195623
		PSNR	53,67941	56,86462	56,50376	56,07586
	150%	BER	0,082031	0,359375	0,25	0,140625
		SSIM	0,82555	0,252919	0,475458	0,697066
		PSNR	53,67941	56,86462	56,50376	56,07586

Informasi pada Tabel 9 menunjukkan bahwa citra *watermark* dapat bertahan pada serangan *scaling* dengan cukup baik, tetapi *watermark* dapat bertahan lebih baik pada serangan *scaling* 150% atau pembesaran. Penerapan CS terhadap citra *watermark* membuat *watermark*-nya lebih rentan terhadap serangan *scaling*, diperbesar maupun diperkecil.

3.4.3 Ketahanan *Watermark* terhadap Serangan *Cropping*

Cropping adalah proses memotong suatu gambar. Proses pemotongan gambar dilakukan dengan cara menghilangkan atau menghapus *pixel* yang tidak diinginkan pada gambar.

Berdasarkan Tabel 10, dapat diamati bahwa *watermark* tidak dapat bertahan pada serangan *cropping*. Penerapan CS dengan rasio 20% membuat *watermark* tidak lebih tahan terhadap serangan *cropping*. Namun, pada penerapan CS rasio 40% dan 60%, *watermark* dapat bertahan dengan cukup baik terhadap serangan *cropping*.

Tabel 10. Hasil Pengujian Serangan *Cropping*

Status	Cropping	Value	Tanpa CS	CS 20%	CS 40%	CS 60%
Resolusi Host 256 × 256 Faktor Sisip 0,9 Alfa 0,01	8 pixel	BER	0,410156	0,375	0,203125	0,15625
		SSIM	0,083335	0,102768	0,541105	0,631612
		PSNR	53,67941	56,86462	56,50376	56,07586
	16 pixel	BER	0,390625	0,40625	0,234375	0,15625
		SSIM	0,114204	0,090058	0,463934	0,641437
		PSNR	53,67941	56,86462	56,50376	56,07586

3.4.4 Ketahanan *Watermark* terhadap Serangan *Filtering*

Filtering adalah proses menghilangkan komponen yang tidak diinginkan pada suatu sinyal. Hasil pengujian serangan *filtering* dapat dilihat pada Tabel 11.

Tabel 11. Hasil Pengujian Serangan *Filtering*

Status	Filtering	Value	Tanpa CS	CS 20%	CS 40%	CS 60%
Resolusi Host 256 × 256 Faktor Sisip 0,9 Alfa 0,01	Median	BER	0,371094	0,34375	0,28125	0,171875
		SSIM	0,104045	0,192003	0,352311	0,607026
		PSNR	53,67941	56,86462	56,50376	56,07586

Berdasarkan Tabel 11, *watermark* tidak dapat bertahan terhadap serangan *filtering*. Penggunaan CS pada *watermark* menyebabkan *watermark* lebih tahan terhadap serangan *filtering*. Pada penerapan CS rasio 60%, *watermark* dapat bertahan dengan cukup baik terhadap serangan *filtering*.

3.4.5 Ketahanan *Watermark* terhadap Serangan *Adding Noise*

1. *Additive White Gaussian Noise* (AWGN)

Additive white gaussian noise merupakan model *noise* yang kerap muncul pada berbagai jenis informasi. *Noise* ini terdistribusi normal dengan nilai yang seragam pada setiap pita frekuensinya. Hasil pengujian serangan *additive white gaussian noise* dapat dilihat pada Tabel 12.

Berdasarkan Tabel 12, *watermark* tidak dapat bertahan pada serangan penambahan *noise* AWGN. Penerapan CS menyebabkan peningkatan ketahanan *watermark* terhadap serangan AWGN. Pada penerapan CS rasio 60%, *watermark* dapat bertahan cukup baik terhadap serangan AWGN.

Tabel 12. Hasil Pengujian Serangan *Additive White Gaussian Noise*

Status	<i>Additive White Gaussian Noise</i>	Value	Tanpa CS	CS 20%	CS 40%	CS 60%
Resolusi Host 256 × 256 Faktor Sisip 0,9 Alfa 0,01	0,001	BER	0,296875	0,4375	0,28125	0,15625
		SSIM	0,355287	0,10872	0,383996	0,659786
		PSNR	53,67941	56,86462	56,50376	56,07586
	0,01	BER	0,355469	0,390625	0,28125	0,140625
		SSIM	0,22947	0,155403	0,399185	0,69475
		PSNR	53,67941	56,86462	56,50376	56,07586
	0,1	BER	0,5	0,46875	0,296875	0,125
		SSIM	0,036881	0,039074	0,390328	0,724969
		PSNR	53,67941	56,86462	56,50376	56,07586

2. *Salt and Pepper Noise*

Salt and pepper noise merupakan bentuk *noise* yang banyak muncul ditemukan pada gambar. Hasil pengujian serangan *salt and papper noise* dapat dilihat pada Tabel 13.

Tabel 13. Hasil Pengujian Serangan *Salt and Pepper Noise*

Status	<i>Salt and Pepper Noise</i>	Value	Tanpa CS	CS 20%	CS 40%	CS 60%
Resolusi Host 256 × 256 Faktor Sisip 0,9 Alfa 0,01	0,001	BER	0,039063	0,3125	0,265625	0,125
		SSIM	0,912869	0,320469	0,429574	0,733842
		PSNR	53,67941	56,86462	56,50376	56,07586
	0,01	BER	0,0625	0,328125	0,265625	0,125
		SSIM	0,86089	0,291971	0,429574	0,733842
		PSNR	53,67941	56,86462	56,50376	56,07586
	0,1	BER	0,050781	0,375	0,265625	0,125
		SSIM	0,887421	0,199524	0,425421	0,733842
		PSNR	53,67941	56,86462	56,50376	56,07586

Berdasarkan Tabel 13, *watermark* dapat bertahan pada serangan penambahan *noise salt and pepper*. Penerapan CS menyebabkan *watermark* lebih rentan terhadap serangan ini. Hal ini disebabkan oleh perubahan nilai yang cukup drastis pada bit-bit tertentu yang menimbulkan kesalahan pada proses *extraction watermark* dengan penggunaan CS.

3.4.6 Ketahanan *Watermark* terhadap Serangan *JPEG Compression*

Joint Photograohic Experts Group Compression atau yang banyak disebut *JPEG Compression* merupakan metode kompresi terhadap suatu gambar digital. Kompresi ini bersifat *lossy compression* dan dapat disesuaikan derajat kompresinya.

Tabel 14. Hasil Pengujian Serangan JPEG Compression

Status	JPEG Comp. Ratio	Value	Tanpa CS	CS 20%	CS 40%	CS 60%
Resolusi Host 256 × 256 Faktor Sisip 0,9 Alfa 0,01	25%	BER	0,40625	0,34375	0,34375	0,34375
		SSIM	0,049661	0,213355	0,213355	0,213355
		PSNR	53,67941	56,86462	56,50376	56,07586
	50%	BER	0,40625	0,328125	0,328125	0,328125
		SSIM	0,054316	0,244827	0,244827	0,244827
		PSNR	53,67941	56,86462	56,50376	56,07586
	75%	BER	0,394531	0,3125	0,3125	0,28125
		SSIM	0,067678	0,283393	0,283393	0,354746
		PSNR	53,67941	56,86462	56,50376	56,07586
	100%	BER	0,046875	0,359375	0,265625	0,109375
		SSIM	0,896229	0,227546	0,422805	0,764557
		PSNR	53,67941	56,86462	56,50376	56,07586

Dapat diamati melalui Tabel 14, *watermark* hanya dapat bertahan dengan baik pada kompresi JPEG dengan rasio 100%. Penerapan CS pada *watermark*, menyebabkan peningkatan kerentanan *watermark* terhadap serangan kompresi JPEG 100%. Penggunaan CS rasio 60% dapat bertahan cukup baik pada kompresi JPEG 100%. Namun, seperti terlihat pada Tabel 14, penggunaan CS meningkatkan ketahanan *watermark* terhadap serangan kompresi JPEG dengan rasio 25%, 50% dan 75%. Hasil pengujian serangan JPEG *compression* dapat dilihat pada Tabel 14.

3.5 Mean Opinion Score (MOS)

Mean Opinion Score (MOS) merupakan kumpulan penilaian subjektif dari sejumlah responden yang dilakukan untuk mendukung hasil penelitian ini. Penilaian diambil melalui proses pengamatan responden, berdasarkan indra penglihatan manusia atau *Human Visual System* (HVS), dalam membandingkan antara gambar asli dengan gambar yang telah disisipkan *watermark*. Hasil rekapitulasi kuisiner *mean opinion score* dapat dilihat pada Tabel 15.

Tabel 15. Hasil Rekapitulasi Kuisiner Mean Opinion Score

Perbandingan	1	2	3	4
Citra Host	256 × 256	512 × 512	1.024 × 1.024	2.048 × 2.048
MOS	3,884615	4,102564	4,102564	4,076923

Setelah dilakukan rekapitulasi data, didapatkan sebanyak 78 responden yang telah berpartisipasi dalam pengambilan nilai perbandingan dengan menggunakan kuisiner yang telah dibuat. Berdasarkan hasil dari Tabel 15, dapat di ketahui bahwa hasil proses *watermarking* dapat dinilai baik menurut indra penglihatan manusia dengan nilai MOS rata-rata 4 atau baik.

4. KESIMPULAN

Setelah dilakukan pengujian dan analisis pada skema *watermarking* yang telah dirancang, proses *image watermarking* menggunakan metode *Statistical Mean Manipulation* (SMM) berbasis *Stationary Wavelet Transform* (SWT) dengan penerapan *Compressive Sensing* (CS) algoritma *Orthogonal Matching Pursuit* dapat direalisasikan dan dapat diimplementasikan dengan cukup baik. Hal ini dapat dilihat berdasarkan nilai PSNR membaik hingga 3,5 dB pada CS dengan resolusi 8×8 *pixel*. Penerapan serangan terhadap *host* yang telah disisipkan *watermark*, tanpa penggunaan *Compressive Sensing*, menunjukkan bahwa *watermark* dapat bertahan terhadap serangan *Salt and Pepper* (SSIM dengan kisaran 0,86089-0,912869), *Scaling* 150% (SSIM = 0,82555), dan JPEG 100% (SSIM = 0,896229).

DAFTAR RUJUKAN

- Bash, A. A., & Kayhan, S. K. (2015). Watermarked Compressive Sensing Measurements Reconstructed by the Greedy Algorithms. *International Journal of Computer Theory and Engineering*, 7(3), 219-222.
- Candes, E. J., & Wakin, B. M. (2008). An Introduction To Compressive Sampling. *IEEE Signal Processing*, 21-30.
- Cox, I., Miller, M., Bloom, J., Fridrich, J., & Kalker, T. (2008). *Digital Watermarking and Steganography Second Edition*. Hawthorne: Elsevier inc.
- Jones, R. (2013, July 16). *Answer to headache/seizure*. Retrieved from EM REMS: <https://emrems.com/category/mri/>
- Kumar, S. B., & Ramashri, D. (2012). Robust SWT SVD Based Digital Image Watermarking Technique. *International Journal of Computer Science Information and Engineering Technologies ISSN 2277-4408*, 1-4.
- Li, X., & Yu, H. H. (2000). Transparent and Robust Audio Data Hiding in Cepstrum Domain. *International Conference on Multimedia and Expo. ICME2000*. (pp. 397-400). New York: IEEE.
- Pangestu, A. (2017). *Analisis Image Watermarking Menggunakan Compressive Sensing Algoritma Orthogonal Matching Pursuit dengan Pendekatan Berbasis Discrete Cosine Transform Menggunakan Singular Value Decomposition*. Bandung: Telkom University.
- Purohit, N., Chennakrishna, M., & Manikantan, K. (2017). Novel Digital Image Watermarking in SWT+SVD Domain. *Proceedings of the International Conference on Signal, Networks, Computing, and System Volume 1* (pp. 12-23). New Delhi: Springer India.
- Ward, D. L. (2018). *Redundant Discrete Wavelet Transform Based Super-Resolution Using Sub-Pixel Image registration*. Ohio: Air Force Institute of Technology.
- 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. 0-3). Xi'an: IEEE.
- Zain, J. M., & Clarke, M. (2005). Security In Telemedicine : Issues In Watermarking Medical Images. *3rd International Conference : Sciences of Electronic, Technologies of Information and Telecommunication*. Sousse: IEEE.
- Zhang, Y., Dong, Z., Wu, L., Wang, S., & Zhou, Z. (2010). Feature extraction of brain MRI by stationary wavelet transform. *International Conference on Biomedical Engineering and Computer Science, ICBECS 2010*, 115-132.