

Implementasi Metode Dekomposisi QR dalam Pengekripsian Gambar Sidik Jari

Hanif Kalyana Aditya dan 13523041^{1,2}

Program Studi Teknik Informatika

Sekolah Teknik Elektro dan Informatika

Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha 10 Bandung 40132, Indonesia

¹13523041@std.stei.itb.ac.id, ²hanifaditya2304@gmail.com

Abstrak—Dewasa ini, autentifikasi pengguna pada berbagai aplikasi dan platform menjadi salah satu hal yang krusial untuk menjamin bahwa tidak ada pihak eksternal yang menyalahgunakan akun pengguna orang lain. Dari beberapa opsi cara autentifikasi, ada metode yang memiliki tingkat keamanan yang cukup tinggi yaitu pengenalan biometrik atau dalam hal ini adalah sidik jari. Tentunya data mengenai sidik jari yang disimpan akan rentan terhadap suatu peretasan sehingga diperlukan suatu metode enkripsi yang aman. Dengan metode Dekomposisi QR dan Hybrid Multi-resolution Wavelet (HMW) memberikan beberapa lapis keamanan pada pengekrapsian sidik jari.

Kata Kunci—Enkripsi, Dekomposisi QR, Sidik Jari.

I. PENDAHULUAN

Keamanan mengenai privasi data adalah sesuatu hal yang sangat krusial di era perkembangan teknologi informasi yang sangat masif ini. Data milik miliaran orang dalam berbagai bentuk seperti dokumen, foto, video, hingga data yang terdapat di suatu aplikasi. Masalah keamanan itu dicoba untuk diatasi dengan berbagai cara seperti penggunaan kata sandi atau pin sebagai masukan pengguna sebelum memasuki atau membuka sebuah aplikasi atau platform. Akan tetapi, kata sandi yang hanya terdiri dari beberapa karakter memiliki kekurangan dari segi keamanan. Sebab kata sandi atau pin memungkinkan seseorang untuk melakukan peretasan dengan beberapa algoritma tertentu.

Seiring perkembangan teknologi informasi, berbagai platform, aplikasi, dan *software* menawarkan cara lain untuk menggantikan penggunaan kata sandi atau pin. Dari beberapa opsi, pengenalan biometrik atau dalam hal ini adalah sidik jari menjadi salah satu metode yang memiliki tingkat keamanan yang cukup tinggi. Hal ini disebabkan oleh sidik jari yang hanya dimiliki oleh orang itu sendiri atau dengan kata lain bersifat autentik. Meski demikian, data mengenai sidik jari yang disimpan akan rentan terhadap suatu penyerangan sehingga diperlukan suatu metode yang dapat mengenkripsi data sehingga data tersebut tidak mudah untuk didekripsi.

Untuk menjamin keamanan pada data terenkripsi yang

berasal dari sebuah gambar telah dilakukan pengembangan berbagai metode. Contohnya yaitu metode Phase-truncated Fourier transform (PTFT) yang memberi alternatif berupa cryptosystem secara asimetrik dan nonlinear [1]. Meski demikian, metode tersebut masih rentan terhadap serangan tertentu. Metode yang berdasar pada pengompresian matriks jarang/berongga atau *sparse matrix* kemudian menjadi opsi karena matriks tersebut hanya menyimpan dan memanipulasi matriks dengan banyak elemen nol secara efisien serta sistem yang asimetris [3].

Untuk menghasilkan *sparse matrix* dan sistem yang asimetris, digunakanlah metode dekomposisi QR sebelum nantinya matriks tersebut diperlukan sebagai ciphertext sedangkan hasil kali dari dua matriks tersebut (matriks Q sebagai matriks ortogonal dan matriks R matriks segitiga) menjadi kunci untuk melakukan dekripsi [4]. Dari metode Dekomposisi QR tersebut, pengekrapsian gambar sidik jari dikombinasikan dengan metode Hybrid Multi-resolution Wavelet (HMW) sehingga memberikan keamanan yang berlapis. Pada HMW tersebut, diperlukan *Walsh transform and fractional Fourier transform (frFT)* yang melibatkan beberapa orde pecahan

II. STUDI LITERATUR

A. Definisi Dekomposisi QR

Dekomposisi QR adalah suatu metode untuk memfaktorkan sebuah matriks berukuran $m \times n$ menjadi hasil kali matriks ortogonal dan matriks segitiga

$$\begin{bmatrix} | & | & | \\ \mathbf{a}_1 & \mathbf{a}_2 & \mathbf{a}_3 \\ | & | & | \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} | & | & | \\ \mathbf{e}_1 & \mathbf{e}_2 & \mathbf{e}_3 \\ | & | & | \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{e}_1 \cdot \mathbf{a}_1 & \mathbf{e}_1 \cdot \mathbf{a}_2 & \mathbf{e}_1 \cdot \mathbf{a}_3 \\ 0 & \mathbf{e}_2 \cdot \mathbf{a}_2 & \mathbf{e}_2 \cdot \mathbf{a}_3 \\ 0 & 0 & \mathbf{e}_3 \cdot \mathbf{a}_3 \end{bmatrix}$$

Orthogonal Unit vectors Upper Diagonal Matrix

Gambar 1. Dekomposisi QR

Sumber: <https://informatika.stei.itb.ac.id/~rinaldi.munir/AljabarGeometri/2024-2025/Algeo-23b-Dekomposisi-QR-2024.pdf>, diakses pada 28/12/2024

Dengan Q adalah matriks ortonormal yaitu matriks yang setiap kolomnya merupakan vector satuan sedemikian sehingga hasil kali titik setiap vector dengan vector

lainnya bernilai nol. Sementara itu R adalah matriks segitiga. Hal khusus terjadi jika A merupakan matriks nonsingular, hasil dari dekomposisi A bersifat unik. Matriks Q juga memiliki sifat sedemikian sehingga

$$QQ^T = I.$$

Gambar 2. Sifat matriks Q

Sumber: <https://informatika.stei.itb.ac.id/~rinaldi.munir/AljabarGeometri/2024-2025/Algeo-23b-Dekomposisi-QR-2024.pdf>, diakses pada 28/12/2024

B. Metode Gram-Schmidt

Untuk melakukan dekomposisi QR, salah satu metode yang umum digunakan adalah Metode Gram-Schmidt. Dengan metode ini, setiap kolom suatu matriks A berukuran $m \times n$ dipandang sebagai vector-vector sebagai berikut :

$$A = \left[\mathbf{a}_1 \mid \mathbf{a}_2 \mid \cdots \mid \mathbf{a}_n \right].$$

Gambar 3. Kolom matriks A

Sumber: <https://informatika.stei.itb.ac.id/~rinaldi.munir/AljabarGeometri/2024-2025/Algeo-23b-Dekomposisi-QR-2024.pdf>, diakses pada 28/12/2024

Selanjutnya hitung vector-vector seperti di bawah ini:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_1 &= \mathbf{a}_1, & \mathbf{e}_1 &= \frac{\mathbf{u}_1}{\|\mathbf{u}_1\|}, \\ \mathbf{u}_2 &= \mathbf{a}_2 - (\mathbf{a}_2 \cdot \mathbf{e}_1)\mathbf{e}_1, & \mathbf{e}_2 &= \frac{\mathbf{u}_2}{\|\mathbf{u}_2\|}, \\ \mathbf{u}_{k+1} &= \mathbf{a}_{k+1} - (\mathbf{a}_{k+1} \cdot \mathbf{e}_1)\mathbf{e}_1 - \cdots - (\mathbf{a}_{k+1} \cdot \mathbf{e}_k)\mathbf{e}_k, & \mathbf{e}_{k+1} &= \frac{\mathbf{u}_{k+1}}{\|\mathbf{u}_{k+1}\|}. \end{aligned}$$

Gambar 4. Perhitungan vektor \mathbf{e}_1

Sumber: <https://informatika.stei.itb.ac.id/~rinaldi.munir/AljabarGeometri/2024-2025/Algeo-23b-Dekomposisi-QR-2024.pdf>, diakses pada 28/12/2024

Maka didapatlah hasil faktorisasi matriks A

$$A = \left[\mathbf{a}_1 \mid \mathbf{a}_2 \mid \cdots \mid \mathbf{a}_n \right] = \left[\mathbf{e}_1 \mid \mathbf{e}_2 \mid \cdots \mid \mathbf{e}_n \right] \begin{bmatrix} \mathbf{a}_1 \cdot \mathbf{e}_1 & \mathbf{a}_2 \cdot \mathbf{e}_1 & \cdots & \mathbf{a}_n \cdot \mathbf{e}_1 \\ 0 & \mathbf{a}_2 \cdot \mathbf{e}_2 & \cdots & \mathbf{a}_n \cdot \mathbf{e}_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \mathbf{a}_n \cdot \mathbf{e}_n \end{bmatrix} = QR.$$

Gambar 5. Hasil faktorisasi matriks A

Sumber: <https://informatika.stei.itb.ac.id/~rinaldi.munir/AljabarGeometri/2024-2025/Algeo-23b-Dekomposisi-QR-2024.pdf>, diakses pada 28/12/2024

C. Alternatif Perhitungan Matriks R

Dalam perhitungan matriks R, terdapat alternatif cara lain dengan sedikit manipulasi persamaan pada Gambar 1 yaitu mengalikan kedua ruas dengan matriks transpose dari Q seperti berikut :

$$\begin{aligned} Q^T A &= Q^T QR \\ &= I R \\ &= R \end{aligned}$$

Gambar 6. Cara alternatif menghitung matriks R

Sumber: <https://informatika.stei.itb.ac.id/~rinaldi.munir/AljabarGeometri/2024-2025/Algeo-23b-Dekomposisi-QR-2024.pdf>, diakses pada 28/12/2024

D. Definisi Alternatif

Pada poin (A), sebuah matriks dapat didekomposisi sebagaimana telah dijelaskan. Selain itu, matriks yang terdekomposisi juga dapat didefinisikan dengan cara lain seperti berikut

$$M \times P = Q \times R$$

Dengan $M \in R^{n \times n}$ adalah matriks yang memiliki kolom-kolom bebas linear dan P adalah matriks permutasi yaitu matriks biner persegi yang tiap baris dan kolomnya memiliki satu entri bernilai 1 serta bernilai 0 pada tempat sisanya [5].

III. METODE

A. Hybrid Multi-resolution Wavelet

Dalam pengenkripsian gambar sidik jari, digunakan suatu metode bernama Hybrid Multi-resolution Wavelet (HMW). HMW ini menggunakan perkalian dot Kronecker dari transformasi orthogonal yang ada dengan [6]. Jika metode ini digunakan pada sebuah gambar, akan diperoleh matriks HWT seperti berikut.

HWT =	$\begin{bmatrix} F_{64} \otimes W_4(1, :) \\ I_2 \otimes (F_{32} \otimes W_4(2, :)) \\ I_4 \otimes (F_{16} \otimes W_4(3, :)) \\ I_8 \otimes (F_8 \otimes W_4(4, :)) \end{bmatrix}$	Resolution:
		Global – level
		Semi – global (first)
		Semi – global (second)
		Local

W_4 adalah matriks transformasi Walsh berukuran 4×4 sedangkan F_8, F_{16}, F_{32} and F_{64} adalah fractional Fourier Transform (*frFT*) yang berukuran $8 \times 8, 16 \times 16, 32 \times 32$, dan 64×64 dengan $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ dan α_4 adalah sebagai masing-masing orde pecahan yang kemudian akan menjadi z

B. Dekomposisi QR

Dalam pengenkripsian sebuah gambar, diperlukan ciphertext dan sebuah key-nya. Dalam dekomposisi QR yang didefinisikan sebagai

$$M \times P = Q \times R$$

Balikan dari matriks P digunakan sebagai ciphertext sedangkan $Q \times R$ berguna sebagai kunci asimetris dekripsinya. Tujuan lain dari dekomposisi ini adalah untuk mengurangi memori dalam penyimpanan dan transmisi karena matriks P adalah *sparse matrix*.

C. Proses Pengenkripsian

1. Pertama, gambar masukan dilakukan proses *masking*. Random Phase Mask (RPM) yang berkorelasi dengan masukan gambar digunakan untuk mendefinisikan terminologi eksponensial dalam suatu fungsi kompleks sebagai berikut :

$$\begin{aligned} f'_m(x) &= |f(x)| RPM_1 \\ RPM_1 &= \exp\{i \times 2\pi \times \text{rand}(x)\} \end{aligned}$$

2. Penerapan HMW pada $f'_n(x)$ yang merupakan fractional Fourier Transformed (FRT) dengan beberapa orde pecahan sembarang α' sehingga didefinisikan sebagai berikut :

$$f'_m(u) = \text{HWT} \{ f'_m(x) \}$$

- Selanjutnya, dilakukan dekomposisi QR pada $f'_m(u)$ untuk mendapatkan kunci key_1 dan intermediet ciphertext $f'_{ie}(u)$

$$\begin{aligned} [Q_1, R_1, P_1] &= \text{QRD} \{ f'_m(u) \} \\ key_1 &= Q_1 \times R_1 \\ f'_{ie}(u) &= \text{inv} (P_1) \end{aligned}$$

- Lalu, diulangi langkah pertama dengan random phase mask yang baru sedemikian sehingga,

$$\begin{aligned} f'_{mie}(u) &= |f'_{ie}(u)| RPM_2 \\ RPM_2 &= \exp\{i \times 2\pi \times \text{rand}(u)\} \end{aligned}$$

- Penerapan HMW pada $f'_{mie}(u)$ yang merupakan fractional Fourier Transformed (FRT) sehingga didefinisikan sebagai berikut :

$$f'_{mie}(x) = \text{HWT} \{ f'_{mie}(u) \}$$

- Dilakukan hal yang sama yaitu dekomposisi QR pada $f'_{mie}(x)$ untuk mendapatkan kunci key_2 dan ciphertext $f'_e(x)$

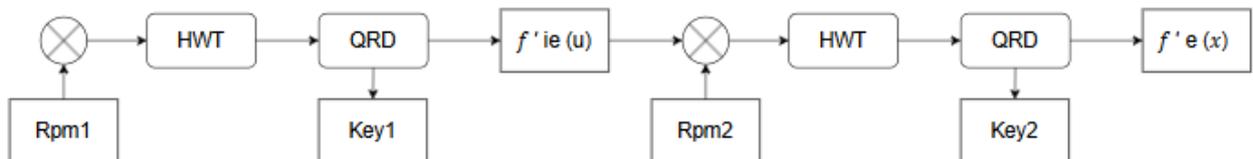
$$\begin{aligned} [Q_2, R_2, P_2] &= \text{QRD} \{ f'_{mie}(x) \} \\ key_2 &= Q_2 \times R_2 \\ f'_e(x) &= \text{inv} (P_2) \end{aligned}$$

dengan demikian didapatkan $f'_{ie}(x)$ sebagai hasil akhir dari pengenkripsian gambar yang sudah terkompresi sebelum dilakukan penyimpanan dan transmisi

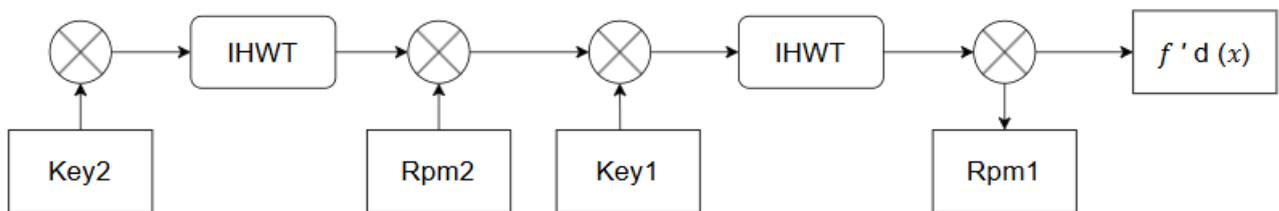
D. Proses Pendekripsian

- Kalikan gambar yang telah terenkripsi dengan kunci privat key_2 untuk mendapatkan $f'_{recmie}(x)$ seperti berikut :

$$f'_{recmie}(x) = f'_e(x) \times key_2$$



Gambar 7. Proses pengenkripsian



Gambar 8. Proses pendekripsian

- Penerapan IHMW atau inverse dari HMW pada $f'_{recmie}(x)$ yang merupakan fractional Fourier Transformed (FRT) dengan beberapa orde pecahan sembarang α' untuk mendapatkan $f'_{recmie}(u)$ sehingga didefinisikan sebagai berikut :

$$f'_{recmie}(u) = \text{IHWT} \{ f'_{recmie}(x) \}$$

- Selanjutnya, kalikan $f'_{recmie}(u)$ dengan konjugat dari RPM_2 untuk mendapatkan $f'_{recie}(u)$

$$f'_{recie}(u) = f'_{recmie}(u) \times \text{conj}RPM_2$$

- Lalu, kalikan $f'_{recie}(u)$ dengan kunci privat key_1 untuk mendapatkan $f'_{recm}(u)$ seperti berikut :

$$f'_{recm}(u) = f'_{recie}(u) \times key_1$$

- Penerapan IHMW pada $f'_{recm}(u)$ yang merupakan fractional Fourier Transformed (FRT) untuk mendapatkan $f'_{recm}(x)$ sehingga didefinisikan sebagai berikut :

$$f'_{recm}(x) = \text{IHWT} \{ f'_{recm}(u) \}$$

- Terakhir, dilakukan kalikan $f'_{recm}(x)$ dengan konjugat dari RPM_1 untuk mendapatkan $f'_d(x)$

$$f'_d(x) = f'_{recm}(x) \times \text{conj}RPM_1$$

dengan demikian didapatkan $f'_d(x)$ sebagai hasil akhir dari pendekripsian gambar. $\text{conj}RPM_1$ dan $\text{conj}RPM_2$ berlaku sebagai kunci public sedangkan key_1 dan key_2 sebagai orde pecahan $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ dan α_4 sebagai kunci privat

IV. PEMBAHASAN

A. Pembahasan

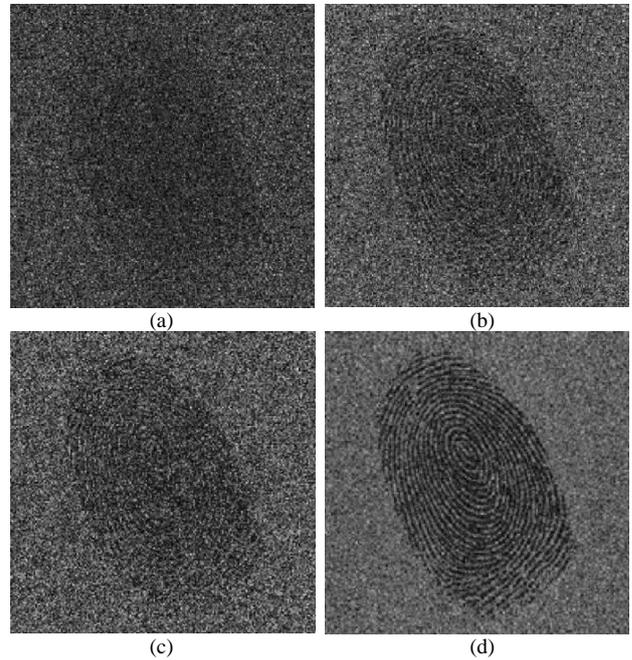


Gambar 9. Sidik jari

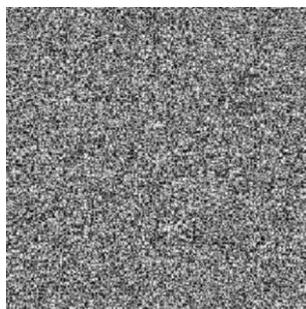
Sumber: <https://i.pinimg.com/736x/d4/86/62/d48662dc91b8b8084db64ddf400ca33.jpg>, diakses pada 31/12/2024

Percobaan untuk menguji metode yang telah dijelaskan sebelumnya dilakukan pada sebuah sampel gambar sidik jari di atas. Gambar tersebut sudah melalui proses *grayscale* terlebih dahulu sehingga memori yang digunakan menjadi lebih sedikit. Dari gambar tersebut dilakukan proses masking dengan random phase masking (RPM). Lalu, proses HMW diterapkan pada gambar dengan $\alpha_1 = 0.2$, $\alpha_2 = 0.5$, $\alpha_3 = 0.8$ dan $\alpha_4 = 0.5$ untuk masing-masing matriks *frFT* berukuran 8×8 , 16×16 , 32×32 , dan 64×64 . Setelah itu, dilanjutkan dengan proses dekomposisi menggunakan metode QR. Setelah proses tersebut, didapat hasil berupa sebuah gambar kunci privat key_1 (Gambar 10) perkalian matriks QR dan intermediet ciphertext dari balikan matriks P. Dengan langkah yang hampir serupa sebelumnya, proses tersebut dilakukan kembali terhadap gambar dengan RPM yang baru. Setelah proses tersebut didapatkan hasil dalam bentuk key_2 dan gambar yang telah terenkripsi (Gambar 11).

Hasil akhir dari seluruh proses pengenkripsian gambar sidik jari sebelumnya yang berupa kunci privat dan gambar terenkripsi itu sendiri menjadi modal yang sangat penting untuk proses selanjutnya. Proses tersebut adalah pendekripsian gambar yang telah terenkripsi. Dengan metode yang telah dijelaskan sebelumnya, perlu dilakukan sebuah pengujian. Dengan mengubah nilai orde pecahan sedemikian sehingga $\alpha_1 = 0.65$, $\alpha_2 = 0.45$, $\alpha_3 = 0.5$ dan $\alpha_4 = 0.7$ akan memengaruhi hasil akhir dari gambar yang didekripsi (Gambar 12)



Gambar 12. (a) $\alpha_1 = 0.65$, (b) $\alpha_2 = 0.45$, (c) $\alpha_3 = 0.5$, (d) $\alpha_4 = 0.7$

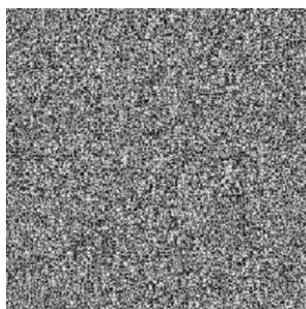


(a)



(b)

Gambar 10. (a) Kunci privat key_1 , (b) Intermediet ciphertext $f'_{ie}(u)$



(a)

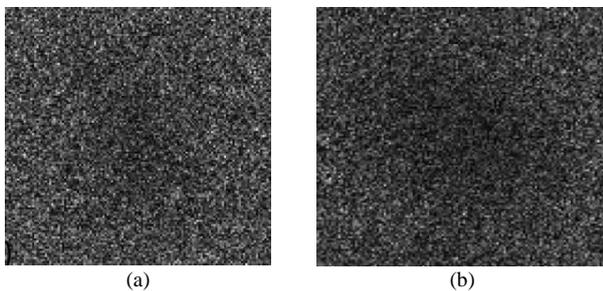


(b)

Gambar 11. (a) Kunci privat key_2 , (b) Gambar sidik jari yang telah terenkripsi

Dari gambar tersebut terlihat bahwa mengganti orde dengan nilai-nilai yang berbeda akan menghasilkan gambar terdekripsi yang tidak sama dengan gambar masukan. Hal ini juga menambah nilai dari keamanan pengenkripsian ini sehingga tidak dapat dipecahkan dengan mudah. Akan tetapi hasil akhirnya masih sedikit serupa dengan gambar aslinya sehingga diperlukan cara lain untuk menguji proses pendekripsian

Hal lain yang dapat memengaruhi hasil akhir pendekripsian adalah penggunaan kunci privat. Mengingat terdapat dua buah kunci privat sebagai hasil dari pengenkripsian gambar, maka diujilah pendekripsian gambar apabila menggunakan kunci privat sembarang yang berbeda. Seperti yang terlihat pada Gambar 13, hasil akhir pendekripsian sangat berbeda dengan masukan gambar. Dengan kunci privat ini, sangat sulit bagi seseorang untuk mendekripsi sebuah gambar sidik jari karena harus mendapatkan kunci privat untuk masing-masing gambar terlebih dahulu. Hal ini mengindikasikan bahwa kunci privat memiliki peran yang sangat penting untuk menjaga keamanan sidik jari.



Gambar 13. (a) hasil dekripsi dengan key1 yang salah (b) hasil dekripsi dengan key2 yang salah

B. Analisis Kelemahan

Pengkripsian yang hanya menggunakan metode Hybrid Multi-resolution Wavelet dan dekomposisi QR memiliki beberapa kekurangan. Pada makalah ini, belum dijelaskan bagaimana cara menyimpan gambar yang telah terenkripsi serta kunci privat. Dengan memanfaatkan metode dasar ini, dapat dibuat program yang secara otomatis mampu melakukan pengenkripsian dan pendekripsian dengan baik sehingga dapat dikomersialisasikan.

Selain kelemahan yang terdapat pada pemanfaatan metode ini lebih lanjut, terdapat kelemahan lain yaitu bisa saja seseorang melakukan *brute force* mencoba berbagai kombinasi nilai-nilai orde pecahan untuk mendekripsi sebuah gambar. Meskipun tetap diperlukan waktu dan cukup sulit untuk menyelesaikan dengan algoritma tersebut.

V. KESIMPULAN

Dalam makalah ini, digunakan sebuah metode yang melibatkan kombinasi antara Hybrid Multi-resolution Wavelet dan dekomposisi QR untuk mengenkripsi gambar atau secara spesifik gambar sidik jari sebagai salah satu opsi proteksi keamanan berbasis biometrik. Kombinasi tersebut memberikan suatu nilai positif karena dapat mengurangi kompleksitas memori saat melakukan transmisi atau penyimpanannya. Di saat yang bersamaan, metode Hybrid Multi-resolution Wavelet memberikan suatu pengamanan berupa empat nilai orde pecahan yang bisa diatur secara mandiri. Sementara itu, dekomposisi QR menghasilkan suatu kunci privat sekaligus mengenkripsi gambar sehingga menambah sisi keamanan pengenkripsian.

VI. SARAN

Terlepas dari keamanan yang ditawarkan oleh metode kombinasi antara Hybrid Multi-resolution Wavelet dan dekomposisi QR, masih terdapat beberapa celah sehingga berpotensi mengancam keamanan gambar sidik jari yang terenkripsi. Dengan melakukan percobaan penyerangan menggunakan algoritma tertentu, memungkinkan seseorang untuk mengambil data sidik jari seseorang. Hal ini sangat berbahaya mengingat sidik jari adalah sesuatu yang hanya dimiliki oleh masing-masing orang saja dan dapat digunakan untuk melakukan berbagai tindakan kriminal seperti perampokan dan perampasan. Maka, perlu upaya lebih lanjut untuk menanggulangi celah tersebut. Selain itu, makalah ini belum menjelaskan bagaimana sebuah gambar yang telah terenkripsi dapat disimpan. Hal tersebut membuka peluang untuk penambahan lapisan keamanan sidik jari dengan menyimpan data tersebut secara baik.

REFERENCES

- [1] W. Qin, X. Peng, Asymmetric cryptosystem based on phase-truncated Fourier transforms, *Opt. Lett.* 35 (2) (2010) 118–120.
- [2] X. Wang, D. Zhao, Double image self encoding and hiding based on phase-truncated Fourier transform, *Opt. Commun.* 284 (19) (2011) 4441–4445, W.-K. Chen, *Linear Networks and Systems* (Book style). Belmont, CA: Wadsworth, 1993, pp. 123–135.
- [3] Cerebras Systems Unveils the Industry's First Trillion Transistor Chip. www.businesswire.com (dalam bahasa Inggris). 2019-08-19. Diakses tanggal 2023-12-31.
- [4] H.E. Hwang, H.T. Chang, W.N. Lie, Multiple-image encryption and multiplexing using a modified gerchberg–saxton algorithm and phase modulation in fresnel transform domain, *Opt. Lett.* 34 (2009) 3917–3919.
- [5] Brualdi, Richard A. (2006). *Combinatorial matrix classes*. *Encyclopedia of Mathematics and Its Applications*. 108. Cambridge:
- [6] H.B. Kekre, T.K. Sarode, R. Vig. A new multi-resolution hybrid wavelet for analysis and image compression. (12) (2015), 2108–2126.
- [7] P. Rakheja, P. Singh, R. Vig, An asymmetric image encryption mechanism using QR decomposition in hybrid multi-resolution wavelet domain, *Opt. Lasers Eng.* 134 (2020) 106177.

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa makalah yang saya tulis ini adalah tulisan saya sendiri, bukan saduran, atau terjemahan dari makalah orang lain, dan bukan plagiasi.

Bandung, 2 Januari 2025



Hanif Kalyana Aditya
13523041