

BAB V PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Penelitian ini menganalisis perbandingan metode *parity* dalam *watermarking* antara *single-channel* dan *multi-channel* pada citra Al-Qur'an, dengan evaluasi kinerja berdasarkan *Peak Signal to Noise Ratio* (PSNR), *Mean Square Error* (MSE), *Bit Error Rate* (BER), dan waktu ekstraksi.

1. Kualitas Visual (*Imperceptibility*)

Seluruh metode *watermarking* yang diterapkan (baik *single-channel* maupun *multi-channel*) mampu mempertahankan kualitas citra dengan sangat baik, ditunjukkan oleh nilai PSNR yang konsisten di atas ambang batas 59 dB [12], yang secara visual dianggap tidak terdeteksi (*imperceptible*). Fluktuasi nilai PSNR antar *channel* juga tergolong kecil (sekitar 0,3 hingga 0,4 dB), menunjukkan stabilitas dan keseragaman kualitas visual di seluruh *channel* warna. Meskipun demikian, *blue-channel* menunjukkan rata-rata nilai PSNR tertinggi (59,14 dB), diikuti oleh *green-channel* (59,12 dB), dan *multi-channel* (59,13 dB), sementara *red-channel* memiliki PSNR terendah (59,11 dB).

2. Performa Kesalahan (*Error Performance*)

Performa kesalahan terbaik dengan nilai MSE terendah didapatkan pada *blue-channel* (0,0791), diikuti oleh *multi-channel* (0,0794), dan *green-channel* (0,0794). *Red-channel* menunjukkan MSE tertinggi (0,0797). Nilai MSE yang lebih tinggi pada *red-channel* disebabkan oleh dominasi piksel dengan intensitas mendekati maksimum (255) dan dominasi bit "1" dalam *watermark*, yang mengakibatkan lebih banyak modifikasi bit pada *channel* ini. Meskipun *multi-channel* memodifikasi ketiga *channel*, akumulasi *bit flips* menyebabkan MSE gabungan berada di antara nilai *blue-channel* dan *green-channel*. Fluktuasi MSE antar *channel* relatif kecil, mendukung *imperceptibility watermark*.

3. Ketahanan Terhadap Kompresi JPEG (*Robustness*)

Dalam pengujian BER terhadap berbagai tingkat kualitas kompresi JPEG, *green-channel* menunjukkan nilai rata-rata BER terbaik (0,543), diikuti oleh *multi-channel* (0,553), *blue-channel* (0,573), dan *red-channel* (0,584). Meskipun BER secara keseluruhan cenderung tinggi (di atas 0,2) akibat sifat *lossy* kompresi JPEG yang merusak informasi di domain spasial, *green-channel* konsisten memberikan BER yang relatif lebih rendah. Hal ini disebabkan kontribusi *green-channel* yang paling besar terhadap komponen *luminance* (sekitar 58,7%), yang mana JPEG memprioritaskan ketajaman *Luminance* dan kurang mengorbankan kualitasnya selama *subsampling*. Metode *multi-channel* menunjukkan ketahanan yang hampir setara dengan

green-channel, karena penyebaran informasi *watermark* ke ketiga *channel* menciptakan redundansi yang bermanfaat untuk meningkatkan daya tahan, meskipun ada potensi akumulasi kesalahan dari *channel* R dan B yang lebih terpengaruh oleh *noise* kuantisasi.

4. Rekomendasi

Rekomendasi pilihan jika dilihat dari aspek visual, *blue-channel* menunjukkan performa terbaik, disusul oleh *multi-channel*. Namun, dari sisi ketahanan (*robustness*), *green-channel* berada di posisi teratas, diikuti oleh *multi-channel*. Secara keseluruhan, dengan mempertimbangkan aspek *imperceptibility* dan *robustness*, *multi-channel* dapat dianggap sebagai pilihan yang paling unggul.

5. Waktu ekstraksi

Metode *multi-channel* membutuhkan waktu ekstraksi yang secara signifikan lebih lama dibandingkan *single-channel*. Ini karena *multi-channel* melibatkan penyebaran dan ekstraksi *watermark* dari ketiga *channel* secara bersamaan, yang meningkatkan jumlah total bit yang diproses.

5.2. Saran

1. Uji Ketahanan Lebih Lanjut

Disarankan untuk melakukan pengujian ketahanan *watermark* terhadap jenis serangan digital lainnya selain kompresi JPEG, seperti *cropping*, *resizing*, rotasi, penambahan *noise* (Gaussian, Salt & Pepper), dan serangan gabungan, untuk mendapatkan gambaran yang lebih komprehensif tentang *robustness* metode *parity* ini.

2. Optimalisasi Pemilihan Channel

Meskipun *green-channel* menunjukkan performa BER terbaik, penelitian lebih lanjut dapat mengeksplorasi strategi pemilihan *channel* yang dinamis atau adaptif berdasarkan karakteristik citra dan jenis serangan yang diprediksi, untuk mengoptimalkan keseimbangan antara *imperceptibility* dan *robustness*.

3. Peningkatan Efisiensi Waktu Ekstraksi

Mengingat waktu ekstraksi yang lebih lama pada metode *multi-channel*, penelitian selanjutnya dapat fokus pada pengembangan algoritma ekstraksi yang lebih efisien untuk mengurangi waktu pemrosesan.

4. Kombinasi dengan Teknik Lain

Menggabungkan metode *parity* dengan teknik *watermarking* lain yang beroperasi di domain frekuensi (misalnya, DCT atau DWT) dapat menjadi area penelitian yang menarik untuk meningkatkan *robustness* terhadap kompresi *lossy* sambil tetap menjaga *imperceptibility*.