SISTEM FORENSIK CITRA BERBASIS ELA–APD–SSIM UNTUK DETEKSI MANIPULASI DOKUMEN RESMI

Muhammad Ridwan [1], Yunio Fri Hartoto [2], Desiderius Minggu [3], Yohanes Dwi Cahyono [4], Isa Mahfudi [5]
[1,2,4] Rekayasa Keamanan Siber, Politeknik Angkatan Darat
[3] Teknik Telekomunikasi Militer, Politeknik Angkatan Darat
Kesatrian Arhanud Junrejo BatuPO Box 42 Malang
[5] Teknik Telekomunikasi, Politeknik Negeri Malang
Jl. Soekarno Hatta No.9, Jatimulyo, Kec. Lowokwaru, Kota Malang, Jawa Timur
ridwan.mtte20@gmail.com

ABSTRAK

Pemalsuan dokumen resmi dalam bentuk citra digital semakin meningkat seiring kemudahan penggunaan perangkat pengeditan dan distribusi dokumen berformat JPEG. Manipulasi yang bersifat lokal dan halus sering kali sulit dideteksi secara visual, terutama pada dokumen hasil pemindaian. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem forensik citra digital berbasis pendekatan hybrid yang mengintegrasikan *Error Level Analysis* (ELA), *Absolute Pixel Difference* (APD), dan *Structural Similarity Index Measure* (SSIM) guna mendeteksi manipulasi dokumen secara objektif dan terukur. Metode penelitian menggunakan pendekatan eksperimental dengan membandingkan pasangan citra baseline sebagai dokumen asli dan citra target sebagai dokumen uji. Seluruh citra dinormalisasi dan dianalisis menggunakan ELA untuk mendeteksi inkonsistensi artefak kompresi, APD untuk mengidentifikasi perubahan numerik pada tingkat piksel, serta SSIM untuk mengevaluasi perbedaan struktural lokal. Hasil analisis menunjukkan bahwa integrasi ketiga metode melalui peta anomali gabungan menghasilkan deteksi yang lebih stabil dan konsisten dibandingkan metode tunggal. Sistem menghasilkan nilai ambang adaptif sebesar 0,244 dengan persentase area anomali sebesar 6,07% dan mengklasifikasikan tingkat risiko manipulasi pada kategori medium. Selain itu, sistem mampu melokalisasi area manipulasi secara spasial menggunakan bounding box. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan hybrid ELA–APD–SSIM efektif untuk mendeteksi dan melokalisasi manipulasi dokumen resmi

Kata kunci : *Absolute Pixel Difference; Document Forgery Detection; Error Level Analysis; Image Forensics; Structural Similarity Index Measure*

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi manipulasi citra digital menjadikan pemalsuan dokumen resmi, seperti ijazah, sertifikat, surat keputusan, maupun dokumen administrasi, semakin mudah dilakukan. Manipulasi ini dapat berupa *copy–move*, *splicing*, penggantian teks, atau perubahan elemen tertentu yang sulit dikenali secara visual. Kondisi tersebut mendorong perlunya sistem forensik citra digital yang mampu mendeteksi manipulasi secara akurat, objektif, dan otomatis. Penelitian menunjukkan bahwa pemalsuan dokumen digital telah meningkat seiring ketersediaan perangkat editing dan penyebaran dokumen dalam format JPEG. Hal ini ditegaskan oleh studi mengenai pemalsuan dokumen digital yang menunjukkan bahwa rekayasa halus pada dokumen hasil scan dapat sangat sulit diidentifikasi tanpa analisis forensik [1].

Sejumlah survei mengenai forensik citra menegaskan bahwa deteksi manipulasi gambar berbasis analisis artefak JPEG, pemeriksaan noise, dan struktur sangat penting dalam mengidentifikasi perubahan konten digital. Metode klasik seperti Error Level Analysis (ELA) merupakan salah satu pendekatan paling banyak digunakan. ELA bekerja dengan menganalisis perbedaan tingkat error kompresi JPEG antara citra asli dan citra hasil recompress, sehingga area yang dimanipulasi cenderung menampilkan pola error berbeda [2][3][4].

Namun demikian, berbagai penelitian menunjukkan bahwa ELA memiliki keterbatasan ketika digunakan sebagai metode tunggal, terutama pada dokumen yang mengalami kompresi ulang atau berkualitas rendah—yang sering ditemui pada dokumen hasil pemindaian (scan). Oleh karena itu, penggunaan metode pelengkap berupa analisis perbedaan piksel serta pemeriksaan struktur (misalnya *Structural Similarity Index Measure* atau SSIM) menjadi penting untuk meningkatkan akurasi deteksi.

Analisis berbasis perbedaan intensitas piksel (*Absolute Pixel Difference*, APD) telah digunakan dalam berbagai penelitian untuk mendeteksi perubahan halus pada citra hasil manipulasi, termasuk dokumen digital. Pendekatan ini efektif untuk memetakan area yang mengalami perubahan numerik, bahkan ketika perubahan tersebut tidak terlihat secara kasat mata.

Sementara itu, SSIM berperan dalam membandingkan struktur, luminansi, dan kontras antar citra. Metode ini telah terbukti efektif dalam mendeteksi perubahan struktural pada dokumen digital, terutama ketika manipulasi mengubah pola teks, bentuk tanda tangan, atau tata letak dokumen.

Dalam konteks dokumen resmi, berbagai penelitian menunjukkan bahwa pemalsuan dokumen hasil pemindaian (scan) meninggalkan artefak khusus yang dapat dideteksi menggunakan pendekatan

statistik dan struktural. Abramova dan Böhme menunjukkan bahwa teknik *copy–move forgery* pada dokumen pindaian menghasilkan pola noise yang tidak konsisten pada area yang dimodifikasi, sehingga dapat dimanfaatkan sebagai indikator keaslian dokumen. Selain itu, studi seperti *Receipt Forgery Dataset* membuktikan bahwa pemalsuan pada dokumen struk/nota pun dapat dilakukan dengan perubahan numerik halus dan memerlukan metode deteksi berbasis struktur dan tekstur [5]. Penelitian lain menemukan bahwa analisis simetri tepi (edge-aware symmetry) dapat membantu mendeteksi perubahan pada elemen tata letak dokumen resmi [6].

Penelitian terbaru di bidang *hybrid forensic systems* menunjukkan bahwa menggabungkan beberapa sinyal forensik, seperti artefak kompresi, noise pattern, dan deteksi struktur, dapat menghasilkan sistem yang lebih stabil dibandingkan metode tunggal. Misalnya, TruFor menggabungkan beberapa petunjuk forensik sekaligus untuk meningkatkan akurasi deteksi [7], sedangkan pendekatan berbasis *pixel co-occurrence* memperkuat analisis statistik untuk mendeteksi area manipulasi [8].

Sistem forensik lain menerapkan *fusion map* untuk menggabungkan beberapa detektor manipulasi agar menghasilkan lokalisasi area manipulasi yang lebih akurat. Dalam konteks dokumen resmi, pendekatan multi-metode juga terbukti efektif, seperti penelitian Bisri yang menggabungkan ELA, clone detection, dan metadata EXIF dalam satu sistem deteksi [9].

Di sisi lain, metode berbasis *deep learning* berkembang pesat dalam beberapa tahun terakhir. Namun, penelitian menunjukkan bahwa model deep learning sering membutuhkan dataset besar, sulit dijelaskan (kurang *explainable*), dan performanya menurun ketika berhadapan dengan dokumen beresolusi rendah—sehingga pendekatan hybrid berbasis metode klasik tetap diperlukan[10].

Dengan mempertimbangkan seluruh temuan tersebut, masih terdapat kebutuhan untuk membangun sistem forensik citra yang menggabungkan ELA, APD, dan SSIM secara terintegrasi. Pendekatan multi-metode seperti ini dapat meningkatkan akurasi deteksi manipulasi dokumen resmi, memberikan *heatmap* yang stabil, dan memungkinkan analisis kuantitatif seperti persentase area manipulasi. Sistem seperti ini sangat relevan pada lingkungan administrasi, akademik, maupun pemerintahan yang menuntut verifikasi keaslian dokumen secara cepat dan objektif.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Perkembangan teknologi pemrosesan citra dan forensik digital telah mendorong kemajuan signifikan dalam upaya mendeteksi manipulasi pada dokumen digital, khususnya dokumen resmi berformat JPEG yang sering menjadi target pemalsuan. Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mendeteksi inkonsistensi artefak kompresi, perubahan struktur piksel, hingga pergeseran konten yang terjadi akibat proses editing digital. Kajian terhadap penelitian terdahulu sangat diperlukan untuk memahami sejauh mana kemajuan yang telah dicapai, metode yang digunakan, serta keterbatasan yang masih ada pada sistem forensik citra yang sudah dikembangkan.

Penelitian mendasar mengenai deteksi pemalsuan dokumen digital dilakukan oleh Chhabra et al. melalui studi Document Forgery Detection [1]. Penelitian ini meninjau berbagai teknik seperti *Error Level Analysis* (ELA), analisis metadata, dan pemeriksaan ketidakkonsistenan elemen visual pada dokumen hasil scan. Kelebihan penelitian ini adalah cakupan metodenya yang luas, namun kelemahannya terletak pada ketiadaan implementasi yang secara spesifik menggabungkan beberapa teknik secara bersamaan untuk meningkatkan presisi lokalisasi manipulasi.

Sudiatmika et al. mengembangkan pendekatan berbasis ELA yang dikombinasikan dengan Convolutional Neural Network (CNN) untuk deteksi manipulasi citra [11]. Model ini memanfaatkan hasil ELA sebagai input visual bagi CNN sehingga mampu memperkuat pemetaan anomali. Kelebihan pendekatan ini adalah peningkatan akurasi deteksi, namun CNN membutuhkan dataset besar sehingga sulit diterapkan pada citra dokumen resmi yang sangat beragam dalam kualitas hasil scan.

Pada konteks dokumen yang benar-benar hasil pemindaian, penelitian yang dilakukan oleh Abramova dan Böhme meneliti deteksi *copy–move forgery* pada dokumen hasil scan [4]. Penelitian ini unggul karena menyoroti artefak khusus yang muncul akibat proses scanning, namun metode tersebut kurang efektif untuk mendeteksi manipulasi tipe splicing atau penggantian teks langsung.

2.1. Forensik Citra Digital

Forensik citra digital merupakan cabang ilmu yang bertujuan untuk mengidentifikasi perubahan atau manipulasi pada citra tanpa memerlukan *original copy*. Teknik ini berkembang pesat seiring meningkatnya pemalsuan visual, terutama pada dokumen resmi hasil pemindaian seperti ijazah, sertifikat, dan surat keputusan. Manipulasi yang umum meliputi *copy–move forgery*, *image splicing*, penggantian teks, serta modifikasi nilai angka. Metode forensik citra diklasifikasikan menjadi dua kategori utama:

a. *Active Forensics*. Teknik yang membutuhkan watermark, tanda tangan digital, atau embedded code pada dokumen.
b. *Passive Forensics*. Teknik yang tidak membutuhkan informasi tambahan dan hanya menganalisis pola intrinsik citra.

2.2. *Error Level Analysis*

Error Level Analysis (ELA) adalah metode klasik yang menganalisis perbedaan *compression error* antar blok gambar dengan membandingkan citra asli dan citra hasil kompres ulang. Area yang dimodifikasi

biasanya memiliki tingkat error berbeda karena proses editing menghilangkan konsistensi kompresi JPEG. ELA dapat digunakan sebagai fitur visual, pola anomali kompresi dapat diidentifikasi secara jelas dan stabil. Namun, kelemahan ELA adalah sensitivitasnya terhadap:

a. kualitas citra rendah,
b. kompresi ulang yang berulang (re-jpeg),
c. noise scanner pada dokumen hasil pemindaian.

Oleh karena itu, ELA perlu dipadukan dengan metode lain agar akurat.

2.3. *Absolute Pixel Difference*

Absolute Pixel Difference (APD) adalah metode analisis forensik citra digital yang bekerja dengan menghitung selisih absolut nilai intensitas piksel antara dua citra yang dibandingkan. APD digunakan untuk mengidentifikasi adanya perubahan lokal yang terjadi akibat manipulasi, terutama modifikasi halus seperti:

a. Perubahan angka atau nilai numerik,
b. Penggantian tanggal,
c. Perubahan huruf atau teks kecil,
d. Pengeditan tanda tangan,
e. Modifikasi lokal lain yang tidak mengubah struktur objek besar.

Secara matematis, APD menghitung nilai:

$$APD(x, y) = |I_1(x, y) - I_2(x, y)| \quad (1)$$

2.4. *Structural Similarity Index Measure*

Structural Similarity Index Measure (SSIM) adalah metrik perbandingan citra yang dirancang untuk menilai kualitas atau kesamaan antara dua citra dengan meniru persepsi struktur manusia: bukan sekadar menghitung error per-piksel (mis. MSE), tetapi mengevaluasi luminansi, kontras, dan struktur lokal antara dua citra. Konsep ini diperkenalkan oleh Wang dkk. dan menjadi standar luas untuk penilaian kualitas citra. SSIM sangat efektif untuk mendeteksi perubahan struktur pada dokumen digital karena metrik ini menilai kesamaan berdasarkan luminansi, kontras, dan struktur lokal antar dua citra. Ketika terjadi pergeseran posisi elemen dokumen, hubungan kovarians antar piksel berubah sehingga skor SSIM menurun pada area yang mengalami pergeseran. Selain itu, perbedaan bentuk font juga dapat terdeteksi karena perubahan pola tekstur dan tepi pada karakter memengaruhi komponen struktur dan kontras yang dihitung SSIM. SSIM juga sensitif terhadap hilangnya tekstur kertas, misalnya akibat proses smoothing atau retouching, karena tindakan tersebut menurunkan variansi lokal yang secara langsung mengurangi nilai kontras dalam perhitungan SSIM.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental untuk mengembangkan dan mengevaluasi sistem forensik citra berbasis Python yang mampu mendeteksi manipulasi pada dokumen resmi berformat JPEG. Sistem menerapkan pendekatan hybrid melalui kombinasi tiga metode forensik digital, yaitu Error Level Analysis (ELA), Absolute Pixel Difference (APD), dan Structural Similarity Index Measure (SSIM), sehingga mampu mengidentifikasi manipulasi halus maupun manipulasi struktural secara lebih akurat. Seluruh eksperimen dilakukan menggunakan pasangan citra baseline (dokumen asli) dan target (dokumen yang diuji), sehingga perbandingan piksel dan struktur dapat dianalisis secara kuantitatif.

3.1. Dataset

Dataset yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas dua kategori utama, yaitu dokumen baseline dan dokumen target. Dokumen baseline merupakan dokumen asli yang tidak mengalami manipulasi apa pun dan berfungsi sebagai acuan pembanding dalam seluruh proses analisis forensik. Dokumen ini menjadi referensi utama karena setiap perubahan intensitas piksel, pola struktur, maupun tingkat kompresi yang ditemukan pada dokumen target akan dinilai relatif terhadap baseline tersebut. Sementara itu, dokumen target adalah dokumen yang diuji keasliannya, baik berupa dokumen yang diduga dimodifikasi maupun dokumen yang sengaja dimanipulasi sebagai bagian dari skenario eksperimen. Untuk memastikan analisis berjalan akurat, setiap dokumen target dipasangkan dengan baseline yang memiliki format file, ukuran dimensi, dan resolusi yang identik. Penjodohan yang konsisten ini memungkinkan metode ELA, APD, dan SSIM melakukan perhitungan selisih intensitas secara presisi, mengidentifikasi perubahan struktur dokumen, serta menghasilkan estimasi area manipulasi secara akurat tanpa terganggu oleh perbedaan teknis yang tidak terkait manipulasi.

3.2. Tahap Pra-Pemrosesan

Tahap pra-pemrosesan dilakukan untuk memastikan seluruh pasangan dokumen baseline dan target berada dalam kondisi teknis yang seragam sebelum dianalisis menggunakan metode ELA, APD, dan SSIM. Proses ini diawali dengan konversi citra ke format RGB menggunakan pustaka PIL agar kedua dokumen memiliki jumlah saluran warna yang sama, sehingga perhitungan selisih intensitas dan struktur dapat dilakukan secara konsisten. Selanjutnya, normalisasi ukuran diterapkan agar baseline dan target memiliki dimensi identik pada setiap koordinat piksel, sehingga perbandingan nilai piksel tidak menghasilkan kesalahan akibat perbedaan resolusi atau skala. Tahap terakhir adalah kompresi ulang dokumen target ke JPEG dengan kualitas tertentu, yang diperlukan untuk menghasilkan citra referensi pada *analisis Error Level Analysis* (ELA). Rangkaian pra-pemrosesan ini bertujuan mencegah munculnya *false positive* akibat perbedaan teknis seperti format warna, resolusi, atau parameter kompresi yang tidak berhubungan dengan manipulasi digital pada dokumen.

3.3. Tahap *Error Level Analysis*

Tahap *Error Level Analysis* (ELA) diterapkan untuk mendeteksi adanya perbedaan tingkat kompresi pada dokumen target. Prinsip ELA adalah bahwa citra JPEG yang belum dimodifikasi akan mengalami pola error kompresi yang relatif konsisten di seluruh area, sedangkan citra yang sudah dimanipulasi memiliki bagian-bagian dengan tingkat error berbeda akibat proses penyuntingan ulang. Metode ini memungkinkan identifikasi area manipulasi melalui analisis perbedaan antara citra asli dengan citra hasil kompresi ulang.

a. Kompresi Ulang
   Proses dimulai dengan mengompresi ulang dokumen target menggunakan format JPEG dengan kualitas tertentu, misalnya 85%. Kompresi ulang ini menghasilkan citra rekonstruksi (*I_rec*) yang mengandung pola error kompresi baru. Citra rekonstruksi ini kemudian dibandingkan dengan citra target asli (*I_ori*). Pemilihan kualitas JPEG harus konsisten karena kualitas kompresi memengaruhi tingkat error yang muncul; kualitas yang terlalu tinggi menghasilkan sedikit perbedaan, sementara kualitas terlalu rendah dapat menutupi detail penting. Dengan melakukan kompresi ulang yang terkontrol, ELA dapat menyoroti area pada dokumen yang mengalami manipulasi digital, karena area manipulasi biasanya memiliki riwayat kompresi yang berbeda dari keseluruhan dokumen.
b. Perhitungan Selisih
   Setelah kompresi ulang dilakukan, tahap berikutnya adalah menghitung perbedaan intensitas piksel antara dokumen asli dan dokumen hasil kompresi ulang. Perhitungan dilakukan per piksel pada koordinat (i,j) dan per saluran warna c (merah, hijau, biru). Rumus dasar yang digunakan adalah:

$$\mathrm{Ea}(i, j, c) = |\mathrm{Iori}(i, j, c) - \mathrm{Irec}(i, j, c)| \quad (2)$$

   Di mana:
   - *I_ori(i,j,c)* adalah nilai intensitas piksel asli,
   - *I_rec(i,j,c)* adalah nilai intensitas piksel setelah kompresi ulang,
   - *E_a(i,j,c)* merupakan nilai error awal pada piksel tersebut.

   Perbedaan yang lebih besar mengindikasikan adanya ketidakkonsistenan kompresi yang berpotensi disebabkan oleh manipulasi. Tahap ini membentuk dasar dari deteksi ELA, karena area yang dimodifikasi biasanya menunjukkan nilai error yang lebih tinggi dibandingkan area yang tidak dimodifikasi.
c. Skala dan Normalisasi
   Nilai error awal (*E_a*) kemudian dinormalisasi dan diskalakan agar lebih mudah dibaca secara visual. Normalisasi menggunakan faktor maksimum dari seluruh nilai error, lalu dikalikan dengan faktor skala *S* (misal 250 atau 400), sehingga nilai error yang kecil tetap dapat terlihat dalam bentuk citra. Rumus normalisasi adalah:

$$E_{\text{scaled}}(i, j, c) = \text{clip}\left(E_a(i, j, c) \times \frac{S}{\max(E_a)}, 0{,}255\right) \quad (3)$$

   Di mana fungsi *clip()* memastikan nilai berada dalam rentang 0–255, sesuai format citra 8-bit. Normalisasi ini bertujuan memperjelas perbedaan antar area sehingga pola error kompresi dapat divisualisasikan sebagai peta intensitas yang lebih kontras.
d. Konversi ke Grayscale
   Karena output ELA dalam bentuk RGB dapat memuat banyak informasi redundan, citra hasil scaling kemudian dikonversi ke grayscale menggunakan transformasi luminansi standar:

$$ELA_{\text{gray}}(i, j) = 0.299R + 0.587G + 0.114B \quad (4)$$

   Konversi ini menghasilkan sebuah peta tunggal yang menampilkan tingkat error pada setiap piksel secara lebih fokus dan mudah dianalisis. Nilai grayscale yang lebih terang menunjukkan tingkat error lebih tinggi, yang sering kali berkaitan dengan area manipulasi seperti penyuntingan teks, penempelan objek baru, atau perubahan lokal pada dokumen.

3.4. Tahap Metode *Absolute Pixel Difference*

Metode *Absolute Pixel Difference* (APD) digunakan untuk mengukur perbedaan numerik pada setiap piksel antara dokumen target dan dokumen baseline. Berbeda dengan ELA yang berfokus pada pola kompresi JPEG, APD memeriksa perubahan intensitas secara langsung sehingga sangat efektif untuk mendeteksi modifikasi halus seperti perubahan angka, pemindahan karakter, penggantian tanggal, atau pengeditan tanda tangan. Karena analisis dilakukan secara piksel-per-piksel, APD memerlukan baseline yang identik secara dimensi dan saluran warna agar perbandingan dapat dilakukan tanpa menghasilkan kesalahan.

a. Perhitungan APD
   Tahap pertama APD dimulai dengan menghitung selisih absolut antara nilai intensitas piksel pada dokumen target (*I_target*) dan baseline (*I_baseline*). Perhitungan dilakukan untuk setiap koordinat piksel (i, j), menggunakan persamaan:

$$D(i, j) = | I_{\text{target}}(i, j) - I_{\text{baseline}}(i, j) | \quad (5)$$

   Nilai *D(i,j)* menunjukkan seberapa besar perubahan yang terjadi pada setiap titik piksel.
   - Jika *D(i,j)* mendekati nol → area tersebut identik, tidak ada indikasi manipulasi.
   - Jika *D(i,j)* tinggi → terdapat perubahan numerik yang signifikan pada piksel tersebut.

   Karena APD bekerja secara langsung pada citra, metode ini sangat peka terhadap perubahan kecil

yang sering kali tidak dapat dilihat oleh mata manusia, misalnya perubahan satu piksel pada digit angka atau perubahan intensitas akibat pengeditan lokal.

b. Normalisasi
Setelah selisih absolut dihitung, nilai perbedaan piksel dinormalisasi agar dapat divisualisasikan dalam skala standar 0–255. Normalisasi penting karena rentang nilai *D(i,j)* bisa berbeda untuk setiap pasangan dokumen. Dengan melakukan normalisasi, seluruh nilai dibawa ke rentang intensitas yang sama sehingga perbedaan halus tetap dapat terlihat jelas. Rumus normalisasinya adalah:

$$D_{norm}(i,j) = \frac{D(i,j)-D_{min}}{D_{max}-D_{min}} \times 255 \quad (6)$$

Di mana:
- *D_min* = nilai perbedaan paling kecil dalam citra
- *D_max* = nilai perbedaan paling besar

Hasil *D_norm(i,j)* akan memiliki rentang 0 hingga 255, sesuai format citra grayscale. Normalisasi ini memastikan bahwa piksel yang awalnya memiliki perbedaan kecil tetapi penting tetap terlihat setelah divisualisasikan.

c. Peta APD (Pixel Difference Map)
Nilai hasil normalisasi kemudian disusun ke dalam sebuah citra baru yang disebut pixel difference map. Karena APD murni berbasis nilai intensitas, peta APD sering kali memberikan deteksi yang lebih sensitif daripada ELA untuk perubahan yang tidak mengubah pola kompresi JPEG tetapi tetap memengaruhi nilai piksel.

3.5. Analisis *Structural Similarity Index Measure*

Analisis *Structural Similarity Index Measure* (SSIM) dilakukan untuk menilai kesamaan struktural antara dokumen baseline dan dokumen target berdasarkan persepsi visual manusia. Proses SSIM berlangsung melalui tahapan berikut:

a. Input Citra. Dua citra dokumen digunakan sebagai masukan, yaitu dokumen asli (baseline) dan dokumen uji (target).

b. Analisis Lokal dengan Jendela Geser
Citra dianalisis secara lokal menggunakan *sliding window* untuk menangkap perubahan detail pada setiap wilayah dokumen.

c. Perhitungan Komponen SSIM
Pada setiap jendela lokal, dihitung tiga komponen utama:
- Luminansi (l), mengukur kesamaan tingkat kecerahan rata-rata.
- Kontras (c), mengukur kesamaan variasi intensitas piksel.
- Struktur (s), mengukur kesamaan pola dan hubungan antar piksel.

d. Kombinasi Nilai SSIM
Ketiga komponen digabungkan untuk memperoleh nilai SSIM lokal:

$$SSIM(x,y) = l(x,y) \cdot c(x,y) \cdot s(x,y) \quad (7)$$

Nilai SSIM berada pada rentang 0–1, di mana nilai mendekati 1 menunjukkan kesamaan tinggi.

e. Pembentukan SSIM Map
Nilai SSIM dari seluruh jendela digabungkan menjadi SSIM map, yang merepresentasikan tingkat kesamaan struktural pada setiap area dokumen.

f. Inversi SSIM untuk Deteksi Manipulasi
Untuk menonjolkan perbedaan, SSIM map diubah menjadi peta invers:

$$SSIM_{inv}(i,j) = (1 - SSIM(i,j)) \times 255 \quad (8)$$

Area dengan perubahan struktur akan tampak lebih terang, sedangkan area identik tampak gelap.

g. Integrasi dengan Metode Lain
Peta SSIM invers kemudian dikombinasikan dengan metode ELA dan APD untuk menghasilkan heatmap manipulasi dokumen yang lebih komprehensif.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sistem forensik citra berbasis *Error Level Analysis* (ELA), *Absolute Pixel Difference* (APD), dan *Structural Similarity Index Measure* (SSIM) telah berhasil diimplementasikan untuk mendeteksi indikasi manipulasi pada dokumen digital berformat JPEG. Sistem bekerja dengan membandingkan citra baseline sebagai referensi dokumen asli dan citra target sebagai dokumen yang diuji keasliannya. Seluruh citra dinormalisasi ke ukuran 1000 × 800 piksel untuk menjamin kesesuaian analisis pada tingkat piksel dan struktur. Output sistem berupa peta hasil analisis ELA, peta APD, peta SSIM invers, peta anomali gabungan (*combined anomaly map*), serta visualisasi lokalisasi area manipulasi menggunakan *bounding box*. Selain visualisasi, sistem juga menghasilkan parameter kuantitatif berupa nilai SSIM global, nilai ambang (*threshold*) adaptif, persentase area anomali, dan klasifikasi tingkat risiko manipulasi dokumen.

4.1. Hasil ELA

Hasil analisis ELA menunjukkan adanya distribusi error kompresi JPEG yang tidak seragam pada citra target dibandingkan dengan citra baseline. Pada citra baseline, pola error kompresi relatif homogen, yang mencerminkan konsistensi proses kompresi JPEG secara menyeluruh. Sebaliknya, pada citra target ditemukan beberapa area dengan intensitas error yang lebih tinggi.

Area dengan intensitas ELA yang meningkat mengindikasikan adanya ketidakkonsistenan riwayat kompresi JPEG. Secara teoritis, kondisi ini berkaitan dengan proses penyuntingan lokal, di mana bagian tertentu dari citra mengalami kompresi ulang yang berbeda dari area sekitarnya. Temuan ini menunjukkan bahwa ELA efektif dalam mengidentifikasi indikasi

awal manipulasi berbasis artefak kompresi, khususnya pada area yang mengalami perubahan sebagian. Citra dokumen baseline sebagai referensi ditampilkan pada Gambar 1, sedangkan hasil analisis ELA pada dokumen target ditunjukkan pada Gambar 2. Pada peta ELA terlihat area dengan intensitas lebih terang yang tersebar pada bagian tertentu dokumen, yang mengindikasikan adanya inkonsistensi kompresi lokal dan berpotensi merupakan hasil penyuntingan digital.

Gambar 1. Citra dokumen baseline sebagai referensi dokumen asli

Gambar 2. Hasil *Error Level Analysis* (ELA) pada dokumen target

Namun demikian, hasil ELA juga memperlihatkan bahwa metode ini sensitif terhadap noise hasil pemindaian dan variasi kualitas citra. Oleh karena itu, interpretasi hasil ELA perlu dikonfirmasi menggunakan metode forensik lain agar tidak menghasilkan deteksi positif semu (*false positive*).

4.2. Hasil APD

Metode APD digunakan untuk mengukur perbedaan intensitas piksel secara langsung antara citra baseline dan citra target. Berbeda dengan Error Level Analysis yang berfokus pada artefak kompresi, APD menilai perubahan numerik pada tingkat piksel sehingga mampu mendeteksi modifikasi lokal secara lebih sensitif.

Hasil analisis APD menunjukkan adanya area dengan nilai perbedaan piksel yang tinggi pada beberapa bagian dokumen. Area-area tersebut mengindikasikan adanya perubahan numerik signifikan yang dapat disebabkan oleh perubahan warna, tekstur, atau keberadaan elemen tertentu pada citra target. Perubahan semacam ini sering kali sulit dikenali secara visual oleh pengamat manusia, namun dapat terdeteksi secara jelas melalui analisis perbedaan intensitas piksel. Citra dokumen baseline sebagai referensi ditampilkan pada Gambar 1, sedangkan hasil analisis APD ditunjukkan pada Gambar 3. Pada peta APD terlihat area dengan intensitas lebih terang yang menandakan perbedaan piksel yang tinggi, khususnya pada bagian tertentu dokumen. Temuan ini menunjukkan bahwa APD efektif dalam mengungkap manipulasi halus, seperti penghapusan atau penambahan elemen kecil, yang tidak selalu memengaruhi struktur global dokumen.

Gambar 3. Hasil analisis Absolute Pixel Difference (APD) antara dokumen baseline dan dokumen target

Namun demikian, hasil APD juga memperlihatkan bahwa metode ini sensitif terhadap variasi teknis kecil, seperti perbedaan noise akibat proses pemindaian. Oleh karena itu, penggunaan APD menjadi lebih andal ketika dikombinasikan dengan metode forensik lain yang berfokus pada artefak kompresi dan perubahan struktur, sehingga potensi deteksi positif semu dapat diminimalkan.

4.3. Hasil SSIM

Analisis SSIM dilakukan untuk menilai kesamaan struktural antara citra baseline dan citra target berdasarkan komponen luminansi, kontras, dan struktur lokal. Hasil perhitungan menunjukkan nilai SSIM global sebesar 0,947, yang menandakan bahwa secara keseluruhan citra target masih memiliki tingkat kemiripan yang tinggi terhadap citra baseline. Meskipun demikian, peta SSIM lokal yang telah diinversi menunjukkan adanya beberapa area dengan perbedaan struktural yang cukup menonjol. Area tersebut mencerminkan perubahan pada struktur lokal dokumen, seperti pergeseran posisi elemen, perubahan tekstur, atau modifikasi bentuk objek. Temuan ini menegaskan bahwa nilai SSIM global yang tinggi tidak serta-merta menandakan ketiadaan manipulasi, karena manipulasi lokal berskala kecil tetap dapat terdeteksi melalui analisis SSIM berbasis peta lokal.

Citra dokumen baseline sebagai referensi ditampilkan pada Gambar 1, sedangkan hasil analisis SSIM pada dokumen target ditunjukkan pada Gambar 4. Pada peta SSIM terlihat beberapa area dengan intensitas yang berbeda dari latar belakang sekitarnya, yang mengindikasikan adanya perubahan struktural lokal pada dokumen. Hasil ini memperkuat peran

SSIM sebagai metode pelengkap yang efektif dalam mendeteksi manipulasi yang tidak selalu menghasilkan perbedaan intensitas piksel yang signifikan.

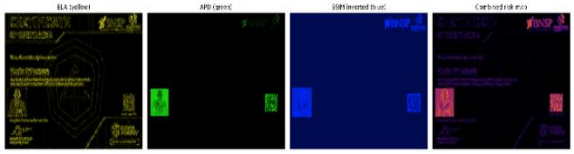
Gambar 4. Hasil analisis Structural Similarity Index Measure (SSIM) pada dokumen target

4.4. Integrasi ELA, APD, dan SSIM

Untuk meningkatkan keandalan deteksi manipulasi, hasil Error Level Analysis (ELA), Absolute Pixel Difference (APD), dan Structural Similarity Index Measure (SSIM) dinormalisasi dan digabungkan dalam sebuah peta anomali gabungan (*combined anomaly map*). Proses penggabungan dilakukan dengan pemberian bobot 0,4 untuk ELA, 0,3 untuk APD, dan 0,3 untuk SSIM, yang dirancang untuk menyeimbangkan kontribusi analisis artefak kompresi, perbedaan numerik piksel, dan perubahan struktural.

Hasil integrasi menunjukkan nilai ambang adaptif sebesar 0,244, dengan persentase area anomali sebesar 6,07%. Berdasarkan parameter tersebut, tingkat risiko manipulasi diklasifikasikan dalam kategori medium, yang mengindikasikan adanya manipulasi lokal pada dokumen, namun tidak bersifat global. Nilai median gabungan sebesar 0 dan standar deviasi 0,111 menunjukkan bahwa distribusi anomali terbatas pada area tertentu dan tidak menyebar ke seluruh dokumen.

Visualisasi hasil integrasi ELA, APD, dan SSIM ditunjukkan pada Gambar 5, yang memperlihatkan perbandingan peta hasil masing-masing metode serta peta anomali gabungan sebagai keluaran akhir sistem.



Gambar 5. Hasil integrasi ELA, APD, dan SSIM serta peta risiko gabungan (*combined anomaly map*) pada dokumen uji

.

4.5. Lokalisasi Area Manipulasi

Berdasarkan nilai ambang adaptif yang diperoleh dari peta risiko gabungan, sistem melakukan proses lokalisasi untuk mengidentifikasi area-area dengan tingkat anomali tinggi. Hasil deteksi menunjukkan bahwa terdapat 26 area yang terindikasi sebagai kandidat manipulasi, yang kemudian ditandai menggunakan *bounding box* pada citra dokumen.

Setiap *bounding box* merepresentasikan wilayah dengan nilai anomali yang melampaui threshold, yang menunjukkan adanya perbedaan signifikan dibandingkan citra baseline. Contoh koordinat beberapa area yang terdeteksi meliputi (599, 762, 10, 13), (36, 732, 8, 11), (851, 473, 96, 107), (19, 441, 141, 168), dan (733, 37, 139, 49). Informasi koordinat ini menunjukkan bahwa sistem mampu melakukan lokalisasi manipulasi secara spasial dan terukur.

Visualisasi hasil lokalisasi area anomali ditunjukkan pada Gambar 6. Pada citra tersebut, area yang terindikasi manipulasi disorot menggunakan warna kuning. Terlihat bahwa blok anomali terbesar berada pada bagian kanan-atas dan sisi kiri-tengah dokumen, yang konsisten dengan pola anomali yang sebelumnya terdeteksi oleh metode ELA, APD, dan SSIM secara terpisah. Temuan ini menegaskan bahwa sistem forensik citra yang dikembangkan tidak hanya mampu mendeteksi keberadaan manipulasi, tetapi juga menentukan lokasi spesifik manipulasi secara jelas dan informatif.

Gambar 6. Hasil lokalisasi area anomali pada dokumen uji menggunakan *bounding box* berwarna kuning

4.6. Pembahasan

Berdasarkan hasil analisis yang diperoleh dari penerapan Error Level Analysis (ELA), Absolute Pixel Difference (APD), dan Structural Similarity Index Measure (SSIM), terlihat adanya pola temuan yang saling melengkapi dalam mendeteksi manipulasi dokumen digital. Metode ELA berhasil mengidentifikasi ketidakkonsistenan artefak kompresi JPEG yang tersebar pada area-area tertentu, yang juga terdeteksi oleh metode APD dan SSIM. Hal ini menunjukkan bahwa area tersebut memiliki riwayat kompresi yang berbeda akibat proses penyuntingan lokal.

Metode APD mengungkap adanya perubahan intensitas warna dan tekstur yang signifikan pada tingkat piksel. Temuan ini menegaskan keunggulan APD dalam mendeteksi manipulasi halus, seperti perubahan elemen kecil atau pengeditan lokal, yang

tidak selalu menyebabkan perubahan struktur global dokumen. Sementara itu, SSIM memperkuat dugaan manipulasi dengan menunjukkan adanya perbedaan struktural pada area yang sama, terutama pada bagian dokumen yang mengalami perubahan tata letak atau bentuk elemen visual.

Integrasi ketiga metode melalui *combined anomaly map* menghasilkan visualisasi anomali yang lebih stabil dan konsisten dibandingkan penggunaan metode tunggal. Hasil integrasi ini selaras dengan klasifikasi tingkat risiko manipulasi pada kategori medium, yang mengindikasikan bahwa manipulasi yang terjadi bersifat lokal dan tidak memengaruhi keseluruhan struktur dokumen. Dengan demikian, sistem forensik citra yang dikembangkan mampu memberikan indikasi yang kuat terhadap keberadaan manipulasi lokal, sekaligus membedakannya dari manipulasi berskala global secara objektif dan terukur.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan dan mengimplementasikan sistem forensik citra digital berbasis pendekatan hybrid yang mengintegrasikan Error Level Analysis (ELA), Absolute Pixel Difference (APD), dan Structural Similarity Index Measure (SSIM) untuk mendeteksi manipulasi pada dokumen resmi berformat JPEG. Hasil pengujian menunjukkan bahwa masing-masing metode memiliki peran yang saling melengkapi, di mana ELA efektif dalam mengidentifikasi inkonsistensi artefak kompresi, APD sensitif terhadap perubahan numerik pada tingkat piksel, dan SSIM mampu mendeteksi perbedaan struktural lokal yang tidak selalu terlihat secara visual. Integrasi ketiga metode melalui peta anomali gabungan menghasilkan visualisasi deteksi yang lebih stabil dan konsisten, serta memungkinkan analisis kuantitatif berupa nilai ambang adaptif, persentase area anomali, dan klasifikasi tingkat risiko manipulasi. Berdasarkan hasil integrasi, sistem mengidentifikasi adanya manipulasi bersifat lokal dengan tingkat risiko kategori medium, yang dikonfirmasi melalui proses lokalisasi area anomali menggunakan bounding box. Dengan demikian, sistem forensik citra yang dikembangkan mampu memberikan indikasi keberadaan dan lokasi manipulasi dokumen secara objektif, terukur, dan dapat diandalkan, sehingga berpotensi diterapkan sebagai alat bantu verifikasi keaslian dokumen pada lingkungan administrasi, akademik, dan pemerintahan.

DAFTAR PUSTAKA

[1] N. Nandini, K. J. K, C. Madhura, and V. M. Ladwani, “Document Forgery Detection,” *IJEAT Int. J. Eng. Adv. Technol.*, vol. 8958, no. 5, pp. 39–42, 2023.

[2] N. Nida, A. Campus, A. Irtaza, and N. Ilyas, “Forged Face Detection using ELA and Deep Learning Techniques,” in *International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technologies (IBCAST)*, 2021, pp. 12–16.

[3] R. Gorle and A. Guttavelli, “Enhanced Image Tampering Detection using Error Level Analysis and a CNN,” *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 15, no. 1, pp. 19683–19689, 2025.

[4] M. N. Baihaqi, A. Sugiharto, and H. Tantyoko, “Classification of Real and Fake Images using Error Level Analysis Technique and MobileNetV2 Architecture,” *J. Masy. Inform.*, vol. 16, no. 1, 2025.

[5] Y. Bae and D. Cho, “Enhancing Document Forgery Detection with Edge-Focused Deep Learning,” *Symmetry (Basel).*, vol. 17, 2025.

[6] D. Li, J. Zhu, M. Wang, J. Liu, X. Fu, and Z. Zha, “Edge-aware Regional Message Passing Controller for Image Forgery Localization,” *IEEE/CVF Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit.*, pp. 8222–8232, 2023.

[7] S. Sharma, B. K. Singh, and H. Garg, “Robust Image Forgery Localization Using Hybrid CNN-Transformer Synergy Based Framework,” *Comput. Mater. Contin.*, vol. 83, no. 3, 2025.

[8] J. Sun, “Research on Image Copy-paste Tamper Detection Based on Gray Scale Co-occurrence Matrix and Graph Neural Network,” *Int. J. ofNetwork Secur.*, vol. 25, no. 6, pp. 1002–1009, 2023.

[9] H. Bisri and M. I. Marzuki, “Forensik Citra Digital Menggunakan Metode Error Level Analysis, Clone Detection dan Exif Untuk Deteksi Keaslian Gambar,” *G-Tech J. Teknol. Terap.*, vol. 7, no. 2, pp. 586–595, 2023.

[10] E. Ul, H. Qazi, and T. Zia, “Deep Learning-Based Digital Image Forgery Detection System,” *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 6, 2022.

[11] A. H. Saber, M. A. Khan, and B. G. Mejbel, “A Survey on Image Forgery Detection Using Different Forensic Approaches,” *ASTESJ Adv. Sci. Technol. Eng. Syst. J.*, vol. 5, no. 3, pp. 361–370, 2020.