

Analisis Komparatif Metode Interpolasi *Bicubic* dan *Lanczos4* Untuk Peningkatan Resolusi Citra Plat Nomor Kendaraan pada CCTV Publik Kota Yogyakarta

Rifai Ahmad Musthofa ^{1*}, Imam Ainudin Pirmansah ¹, Dhimas Adi Satria ¹

¹ Program Studi Teknologi Informasi, Universitas Amikom Yogyakarta, Indonesia.

* Korespondensi: ramusthofa07@amikom.ac.id

Sitasi: R. A. Musthofa, I. A. Pirmansah, and D. A. Satria, "Analisis Komparatif Metode Interpolasi *Bicubic* dan *Lanczos4* Untuk Peningkatan Resolusi Citra Plat Nomor Kendaraan pada CCTV Publik Kota Yogyakarta", *Jurnal Teknologi Informasi Dan Multimedia*, vol. 8, no. 3, pp. 726-737, 2026.
<https://doi.org/10.35746/jtim.v8i3.1097>

Diterima: 27-06-2026
Direvisi: 09-08-2026
Disetujui: 17-08-2026



Copyright: © 2026 oleh para penulis. Karya ini dilisensikan di bawah Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License. (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

Abstract: Public CCTV image quality in Yogyakarta's tourism areas often suffers from low resolution, complicating automatic vehicle license plate identification. This study contributes an empirical comparative evaluation of classic interpolation methods (*Bicubic Interpolation* and *Lanczos4 Interpolation*) applied to real-world public CCTV traffic scenarios. High-Resolution (HR) reference images were downsampled by 4x to simulate low-resolution (LR) CCTV footage, then upscaled back using both methods. Performance was quantitatively measured using Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) and Structural Similarity Index (SSIM). Experimental results on 10 sample images show that *Bicubic Interpolation* achieves a slightly higher average performance (PSNR 19.47 dB and SSIM 0.5325) compared to *Lanczos4* (PSNR 19.25 dB and SSIM 0.5128). However, qualitative visual analysis confirms that *Lanczos4* produces sharper character edges. Nevertheless, as this qualitative enhancement has not been quantitatively validated through Optical Character Recognition (OCR) testing or statistical analysis, these conventional interpolation methods serve primarily as preliminary preprocessing steps for potential integration into automatic recognition systems.

Keywords: CCTV; License Plate; Interpolation; PSNR; SSIM

Abstrak: Kualitas citra CCTV publik di area wisata Kota Yogyakarta sering mengalami penurunan resolusi, sehingga menyulitkan identifikasi otomatis plat nomor kendaraan. Penelitian ini memberikan kontribusi berupa evaluasi komparatif empiris penggunaan metode interpolasi klasik (*Bicubic Interpolation* dan *Lanczos4 Interpolation*) pada skenario spesifik citra CCTV publik jalan raya. Citra acuan *High-Resolution* (HR) diturunkan resolusinya (*downsampling*) sebesar 4x untuk mensimulasikan tangkapan CCTV resolusi rendah (*Low-Resolution/LR*), lalu dinaikkan kembali (*up-scaling*) menggunakan kedua metode. Performa diukur secara kuantitatif melalui metrik *Peak Signal-to-Noise Ratio* (PSNR) dan *Structural Similarity Index* (SSIM). Hasil pengujian terhadap 10 sampel citra menunjukkan *Bicubic Interpolation* mencapai rata-rata PSNR 19.47 dB dan SSIM 0.5325, sedikit lebih tinggi dibandingkan *Lanczos4* (PSNR 19.25 dB dan SSIM 0.5128). Namun, analisis visual kualitatif mengonfirmasi bahwa *Lanczos4* menghasilkan tepi karakter yang lebih tajam. Meskipun demikian, peningkatan ketajaman kualitatif ini belum teruji secara kuantitatif pada kinerja mesin pengenalan karakter otomatis (OCR) maupun pengujian statistik, sehingga metode interpolasi konvensional ini berpotensi menjadi tahap prapemrosesan awal sebelum diintegrasikan dengan sistem pengenalan otomatis.

Kata kunci: CCTV; Plat Nomor; Interpolasi; PSNR; SSIM.

1. Pendahuluan

Kota Yogyakarta sebagai salah satu destinasi wisata utama memanfaatkan jaringan kamera *Closed Circuit Television* (CCTV) publik untuk pemantauan keamanan dan lalu lintas cerdas [1]. Namun, kendala utama yang sering terjadi adalah rendahnya resolusi citra objek kendaraan akibat keterbatasan perangkat. Hal ini sangat menyulitkan sistem identifikasi otomatis untuk membaca plat nomor secara akurat, terutama saat terjadi pelanggaran lalu lintas pada kondisi objek berjarak jauh [2]. Citra plat nomor hasil tangkapan kamera pengawas di skenario dunia nyata (*real-world scenarios*) seringkali mengalami degradasi yang sangat parah dan membatasi pengenalan pola teks plat [3]. Proses perbesaran digital secara konvensional pada citra resolusi rendah berakibat pada munculnya artefak visual berupa keburaman dan efek kotak-kotak. Untuk memulihkan detail penting tersebut, teknik Image Super-Resolution berbasis pengisian nilai piksel baru sangat diperlukan dalam pengolahan citra [4].

Berbagai penelitian perbaikan kualitas citra plat nomor belakangan ini didominasi oleh penggunaan arsitektur *Deep Learning* (DL) dan *Generative Adversarial Networks* (GANs) [9][10][11][12]. Metode berbasis DL memang mampu merekonstruksi tekstur berfrekuensi tinggi dengan sangat baik. Namun, pendekatan ini memiliki kelemahan kritis berupa tingginya kebutuhan daya komputasi (*computational cost*) dan memori GPU, kompleksitas pelatihan model, serta adanya *latency* yang dapat menghambat penerapannya pada sistem CCTV publik berdaya rendah (*low-power edge devices*) yang membutuhkan pemrosesan *real-time* [5]. Sebagai alternatif yang lebih efisien untuk kondisi tersebut, metode interpolasi matematika konvensional seperti *Bicubic Interpolation* dan *Lanczos4 Interpolation* menawarkan keunggulan logis berupa kompleksitas komputasi yang sangat ringan, tidak membutuhkan proses *training data*, dan dapat dieksekusi secara instan di tingkat hulu (*edge network*) [5][6][7].

Meskipun metode interpolasi konvensional telah banyak dipelajari, terdapat kesenjangan penelitian (*research gap*) di mana sebagian besar studi terdahulu menguji kinerja interpolasi hanya pada dataset sintesis ideal atau citra umum, tanpa memperhitungkan kompleksitas degradasi spesifik dari infrastruktur CCTV publik di kawasan perkotaan dinamis yang kaya akan gangguan *noise*, fluktuasi pencahayaan, dan bayangan [14][15]. Berdasarkan kesenjangan tersebut, rumusan masalah utama dalam penelitian ini adalah: (1) Bagaimana perbandingan efektivitas metode *Bicubic Interpolation* dan *Lanczos4 Interpolation* dalam merekonstruksi citra plat nomor resolusi rendah langsung dari tangkapan CCTV publik Kota Yogyakarta?; serta (2) Bagaimana kesesuaian (*trade-off*) antara evaluasi metrik kuantitatif secara global (PSNR dan SSIM) dengan kualitas keterbacaan visual secara lokal pada struktur karakter plat nomor?

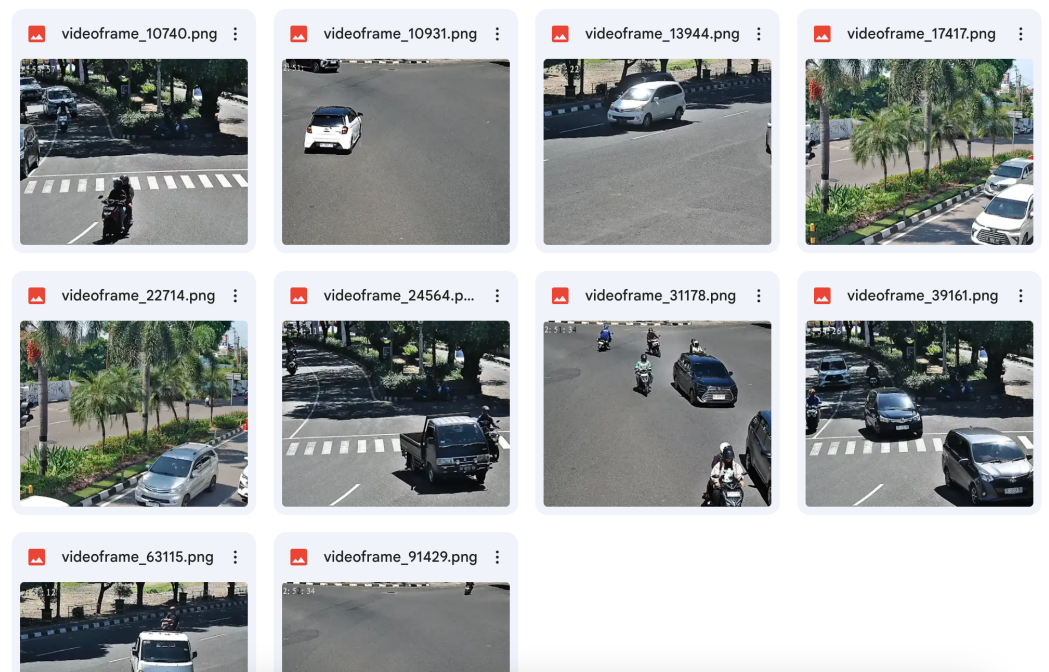
Untuk menjawab rumusan masalah tersebut, penelitian ini menawarkan kontribusi ilmiah dan kebaruan (*novelty*) pada dua aspek utama. Pertama, evaluasi empiris tidak menggunakan citra sintesis, melainkan menguji algoritma interpolasi pada skenario dunia nyata (*real-world scenarios*) dari CCTV publik yang mencerminkan kondisi lapangan sebenarnya di Kota Yogyakarta. Kedua, penelitian ini secara spesifik memetakan fenomena "paradoks metrik" pada kasus rekonstruksi plat nomor, yaitu analisis untuk mengungkap apakah keunggulan nilai efisiensi numerik (PSNR/SSIM) dari fungsi polinomial kubik lokal (*Bicubic*) benar-benar berbanding lurus dengan pelestarian geometri karakter teks yang dihasilkan oleh filter spasial berskala luas (*Lanczos4*). Melalui penelitian ini, diharapkan dapat memberikan rujukan ilmiah yang meyakinkan terkait pemilihan metode prapemrosesan gambar yang paling optimal untuk sistem pemantauan lalu lintas jarak jauh.

2. Bahan dan Metode

2.1. Pengumpulan Dataset

Dataset yang akan digunakan untuk merancang penelitian Interpolasi Bicubic dan Lanczos4 ini adalah dataset gambar yang diambil pada website cctv publik yang terpasang di area strategis dan kawasan padat wisata Kota Yogyakarta . Kriteria utama dalam pemilihan 10 citra acuan ini adalah kejelasan fisik karakter pada plat nomor kendaraan yang berfungsi sebagai data kebenaran dasar (*ground truth*) atau citra *High-Resolution* (HR) sebelum diberikan perlakuan simulasi degradasi diterapkan. Karakteristik dataset ini memiliki variasi resolusi spasial asli (1920×1080 piksel dan 1280×720 piksel), mencakup kendaraan roda dua dan roda empat dengan orientasi sudut pandang (*viewing angle*) yang beragam. Seluruh berkas citra hasil ekstraksi kemudian disimpan dalam format standar .png tanpa kompresi (lossless) untuk menjaga integritas nilai piksel asli.

Justifikasi pemilihan jumlah 10 sampel citra dinilai telah memadai untuk kebutuhan evaluasi ini mengingat fokus penelitian bertumpu pada analisis komparatif deterministik tingkat piksel (*deterministic pixel-level evaluation*). Berbeda dengan penelitian berbasis Deep Learning yang membutuhkan ribuan dataset untuk proses training dan generalisasi pola, metode interpolasi konvensional (Bicubic dan Lanczos4) bekerja secara matematis murni menggunakan kernel tetap tanpa tergantung pada proses pembelajaran data (*training-free*).

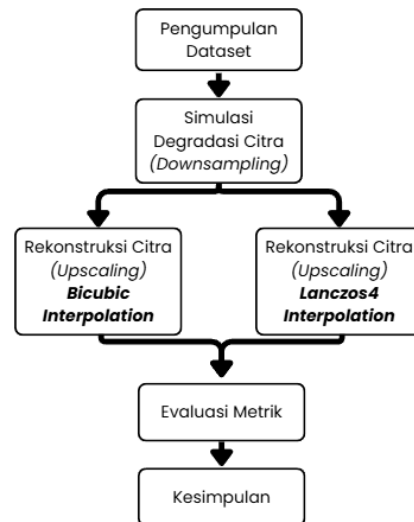


Gambar 1. Sampel dataset CCTV area publik kota Yogyakarta

Oleh karena itu, pengujian pada 10 sampel dengan total puluhan karakter alfanumerik yang mewakili berbagai kondisi kendaraan dan jarak terhadap kamera sudah mencukupi secara statistik deskriptif untuk menguji konsistensi performa metrik PSNR dan SSIM serta mengamati fenomena trade-off visual antara kedua algoritma.

2.2. Alur Eksperimen Data

Dataset yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari 10 citra beresolusi tinggi (*High-Resolution* / HR) berformat .png yang diperoleh dari rekaman visual langsung kendaraan di area publik Kota Yogyakarta.



Gambar 2. Alur Penelitian

Alur penelitian Dimensi citra mula-mula direduksi menggunakan operasi *downsampling* dengan faktor perbesaran 4x menggunakan interpolasi linear untuk mensimulasikan karakteristik citra tangkapan kamera CCTV publik berkualitas rendah. Setelah mendapatkan representasi citra *Low-Resolution* (LR), citra yang telah mengalami degradasi resolusi tersebut kemudian dinaikkan kembali dimensinya (*upsampling*) melalui dua skenario pembandingan utama, yaitu menggunakan metode Bicubic Interpolation dan Lanczos4 Interpolation [5].

2.3. Metode Rekonstruksi

2.3.1 Bicubic Interpolation

Bicubic Interpolation adalah metode yang mengevaluasi intensitas nilai dari 16 piksel tetangga terdekat dalam matriks 4x4 pada citra asal untuk mengestimasi piksel baru menggunakan fungsi polinomial kubik bivariat. Sifat matematis kernel Bicubic ini menghasilkan transisi warna yang sangat halus dan terbukti unggul dalam pemrosesan yang memerlukan tuntutan komputasi rendah. Meskipun algoritma ini efektif dalam meredam distorsi piksel kasar, Bicubic memiliki kecenderungan memicu sedikit efek kabur (*anti-aliasing blur*) pada batas tepi objek dengan kontras tinggi [6]. Secara matematis, permukaan interpolasi kubik dapat dirumuskan melalui:

$$f(x, y) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 a_{ij} x^i y^j$$

di mana a_{ij} merupakan 16 koefisien interpolasi yang harus diselesaikan berdasarkan nilai intensitas piksel tetangga dan turunan parsialnya. Inti dari pembobotan ini bertumpu pada fungsi kernel kubik $W(x)$ yang didefinisikan oleh Keys melalui :

$$W(x) = \begin{cases} (a+2)|x|^3 - (a+3)|x|^2 + 1 & \text{untuk } |x| \leq 1 \\ a|x|^3 - 5a|x|^2 + 8a|x| - 4a & \text{untuk } 1 < |x| < 2 \\ 0 & \text{untuk } |x| \geq 2 \end{cases}$$

Konstanta a umumnya bernilai -0.5 untuk menghasilkan kontinuitas turunan ketiga yang optimal pada batas piksel. Karakteristik utama dari metode Bicubic adalah kemampuannya menghasilkan transisi warna yang sangat halus (*smoothing effect*), sehingga efektif meminimalkan kemunculan noise kasar atau erosi piksel pada area homogen. Namun, proses penghalusan ini memiliki kelemahan inheren berupa hilangnya ketajaman

komponen frekuensi tinggi, yang menyebabkan garis tepi objek (edges) menjadi sedikit baur (anti-aliasing blur).

2.3.2 Lanczos4 Interpolation

Lanczos4 Interpolation merupakan metode rekonstruksi spasial tingkat lanjut yang didasarkan pada penerapan filter *sinc* yang terpotong (*windowed sinc filter*). Berbeda dengan *Bicubic* yang membatasi radius pencarian pada 16 piksel, algoritma *Lanczos4* menggunakan ukuran jendela kernel sebesar 8x8 (total 64 piksel) dengan parameter ukuran spasial $a = 4$. Filter tipe Lanczos ini banyak diakui dalam pemrosesan citra tingkat ahli karena performanya yang superior dalam mempertahankan detail serta ketegasan garis batas antar objek. Karakteristik tersebut membuat algoritma Lanczos4 sangat presisi untuk merekonstruksi bentuk geometri rumit seperti teks alfanumerik pada plat nomor [7] [5]. Fungsi kernel penyaringan Lanczos, $L(x)$ didefinisikan sebagai perkalian antara fungsi *sinc* dasar dengan fungsi *sinc* ter-skala yang bertindak sebagai jendela peredam (*windowing function*), seperti yang ditunjukkan pada :

$$L(x) = \begin{cases} \text{sinc}(x) \cdot \text{sinc}\left(\frac{x}{4}\right) = \frac{4 \sin(\pi x) \sin\left(\frac{\pi x}{4}\right)}{\pi^2 x^2} & \text{untuk } -4 < x < 4 \\ 0 & \text{untuk } |x| \geq 4 \end{cases}$$

Melalui keterlibatan 64 piksel tetangga secara simultan, kernel Lanczos4 bertindak sebagai filter *low-pass* teoritis yang sangat mendekati kondisi ideal (*Nyquist-Shannon reconstruction principle*). Keunggulan utama dari metode ini adalah kemampuannya yang luar biasa dalam mempertahankan detail frekuensi tinggi pada citra, seperti pola tekstur rapat dan ketegasan garis batas antar objek [12]. Karakteristik ini membuat *Lanczos4* sangat unggul dalam merekonstruksi struktur geometris yang rumit, seperti guratan karakter alfanumerik pada plat nomor kendaraan. Meskipun demikian, akibat pemotongan tajam pada fungsi jendela matematika tersebut, metode ini rentan memicu munculnya artefak visual berupa riak gelombang di sekitar area kontras tinggi yang dikenal dengan fenomena *Gibbs* atau *ringing artifacts* [13].

2.4. Parameter Evaluasi Metrik Kualitas Citra

Untuk mengukur dan membuktikan keberhasilan kualitas perbesaran dari kedua algoritma, penelitian ini menggunakan dua parameter pengujian objektif yang umum dipakai pada studi *Super-Resolution* [4], yaitu:

1. Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR)

Metrik ini digunakan untuk menghitung rasio matematis logaritmik antara sinyal intensitas citra asli maksimal terhadap nilai sisa rata-rata kesalahan kuadrat (noise) hasil rekonstruksi [6]. Nilai PSNR dihitung berdasarkan nilai *Mean Squared Error* (MSE) melalui:

$$PSNR = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{MAX_I^2}{MSE} \right)$$

Teks yang mengikuti persamaan ini tidak membentuk paragraf baru, di mana MAX_I melambangkan nilai intensitas piksel maksimum (255 untuk citra 8-bit).

2. Structural Similarity Index (SSIM):

Berbeda dengan PSNR yang hanya berfokus pada kesalahan erosi berbasis piksel individual, SSIM Metrik perseptual ini mengevaluasi kualitas gambar secara lebih komprehensif berdasarkan tingkat kemiripan luminans, kontras, dan struktur spasial citra. Pendekatan SSIM dinilai lebih sejalan dengan kemampuan sistem dalam membaca struktur geometri teks secara nyata [1] [14], melalui formulasi matematis pada

$$SSIM(x,y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + c_1)(2\sigma_{xy} + c_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2)}$$

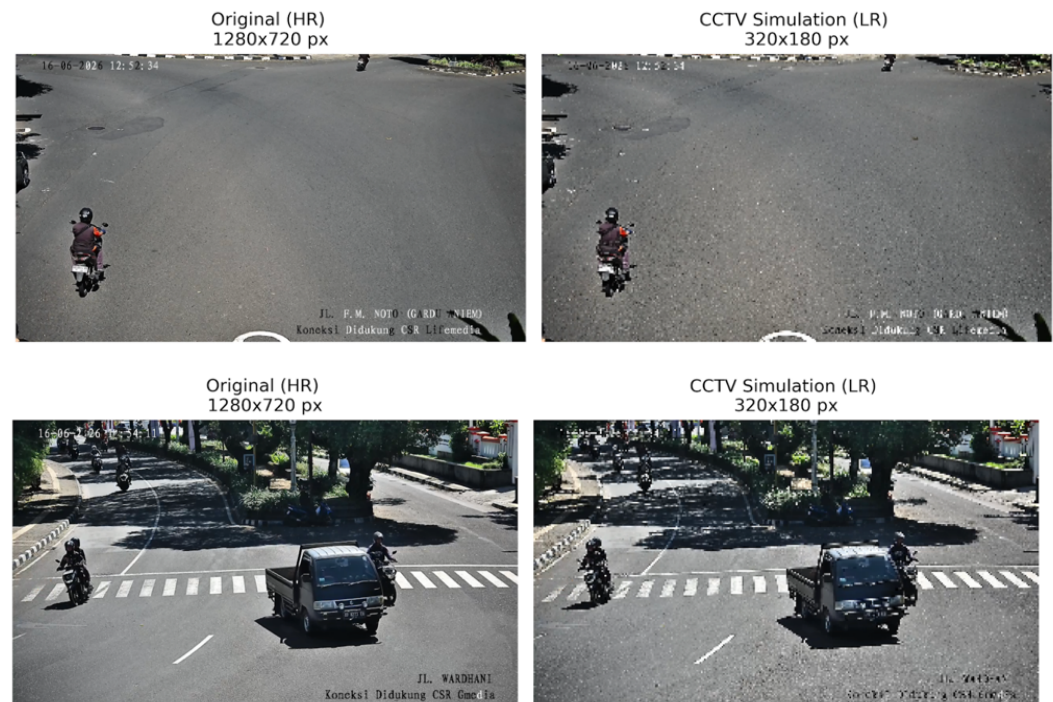
3. Hasil

Eksperimen peningkatan resolusi citra plat nomor ini dilakukan menggunakan bahasa pemrograman Python 3 di lingkungan Google Colab dengan memanfaatkan pustaka utama OpenCV untuk manipulasi piksel dan scikit-image untuk kalkulasi metrik kualitas citra.

3.1. Simulasi Degradasi Citra (Downsampling)

Tahap pertama eksperimen adalah melakukan degradasi pada 10 citra asli *High-Resolution* (HR) area publik Yogyakarta yang bertindak sebagai ground truth. Melalui penerapan fungsi *cv2.resize* dengan parameter *cv2.INTER_LINEAR*, dimensi spasial seluruh citra diperkecil menjadi 1/4 dari ukuran semula (4 X downsampling).





Gambar 3. Gambar sampel perbandingan original dan sesudah downsampling

Proses ini berhasil mensimulasikan karakteristik citra Low-Resolution (LR) khas kamera CCTV publik. Secara visual, seluruh objek plat nomor mengalami penurunan kualitas yang ekstrem; garis tegas pada karakter alfanumerik menghilang, timbul efek kotak-kotak (pixelated), dan terjadi penyatuan warna (color bleeding) antara karakter dengan warna dasar plat nomor, sehingga teks menjadi tidak dapat diidentifikasi sama sekali oleh mata telanjang maupun sistem otomatis

3.2. Rekonstruksi Citra (Upscaling)

Citra beresolusi rendah (*Low Resolution* = LR) tersebut kemudian dinaikkan kembali dimensinya menuju ukuran spasial semula (*High Resolution* = HR) menggunakan dua skenario algoritma pembeding. Jalur pertama menggunakan Bicubic Interpolation (*cv2.INTER_CUBIC*), dan jalur kedua menggunakan Lanczos4 Interpolation (*cv2.INTER_LANCZOS4*). Proses pengisian piksel baru ini menghasilkan dua variasi citra rekonstruksi untuk setiap sampel. Secara visual global, kedua metode berhasil memperbesar kembali ukuran gambar dan mengembalikan bentuk umum kendaraan. Namun, pada area lokal plat nomor, kedua algoritma memberikan karakteristik visual yang berbeda secara konsisten di seluruh sampel. Metode Bicubic menghasilkan citra plat yang tampak lebih halus namun memiliki efek kabur (blurring) di sekitar tepian huruf. Sementara itu, metode Lanczos4 menghasilkan citra yang memperlihatkan kontras tepi karakter alfanumerik yang lebih tajam dan tegas, meskipun memicu sedikit kemunculan pola riak halus (*ringing artifact*) pada area latar belakang plat nomor yang homogen.

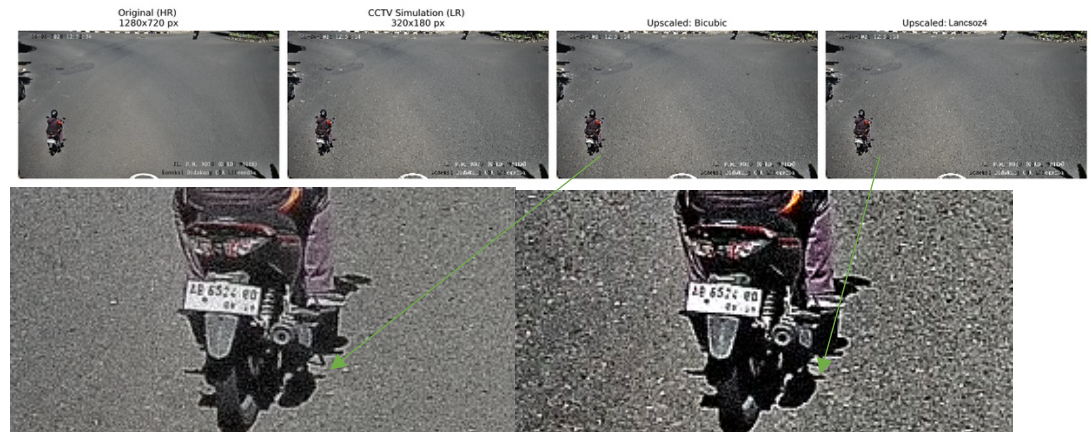
4. Pembahasan

4.1. Analisis Perbandingan karakteristik Per Gambar (Individual)

Analisis individual terhadap 10 sampel berkas *frame video* pada Tabel 1 menunjukkan sebuah pola matematis yang sangat konsisten. Di setiap gambar tunggal yang diuji, metode *Bicubic Interpolation* selalu mencatatkan nilai metrik kuantitatif PSNR dan SSIM yang mengungguli metode rekonstruksi berbasis Lanczos4.

Sebagai contoh, nilai metrik tertinggi untuk parameter PSNR dicapai pada sampel **Gambar F** (*Bicubic* = 22.37 dB; *Lanczos4* = 22.15 dB) diikuti oleh sampel **Gambar D** (*Bicubic*

= 22.11 dB; Lanczos4. = 21.89 dB). Tingginya nilai PSNR pada kedua citra ini secara visual mengindikasikan bahwa kondisi tangkapan kamera berada pada posisi pencahayaan yang cukup dengan kontras global yang baik. Namun uniknya, meskipun nilai PSNR tinggi, nilai SSIM pada kedua berkas ini justru tergolong rendah jika dibandingkan sampel lainnya (berada di kisaran 0.48 hingga 0.50).



Gambar 4. Sampel Gambar F yang sudah diproses Bicubic dan Lanczos4



Gambar 5. Sampel Gambar D yang sudah diproses Bicubic dan Lanczos4

Tabel 1. Tabel Perbandingan Rata-rata Gambar D dan Gambar F

Nama File Sampel	PSNR Bicubic	PSNR Lanczos4	SSIM Bicubic	SSIM Lanczos4
Gambar D	22.11	21.89	0.4970	0.4821
Gambar F	22.37	22.15	0.5038	0.4897

Sebaliknya, nilai struktur kemiripan perseptual tertinggi diraih oleh sampel **Gambar C** dengan nilai SSIM mencapai 0.6316 untuk *Bicubic* dan 0.6092 untuk *Lanczos4*, meskipun nilai PSNR sampel ini relatif rendah (18.22 dB dan 17.96 dB). Pola anomali ini membuktikan bahwa nilai kedekatan piksel secara matematis (PSNR) tidak selalu berbanding lurus dengan nilai kestabilan struktur geometri objek (SSIM).



Gambar 6. Sampel Gambar C yang sudah diproses Bicubic dan Lanczos4

Tabel 2. Tabel Rata-rata Gambar C

Nama File Sampel	PSNR Bicubic	PSNR Lanczos4	SSIM Bicubic	SSIM Lanczos4
Gambar C	18.22	17.96	0.6316	0.6092

Penurunan metrik paling ekstrem pada pengujian individual ini ditemukan pada sampel **Gambar B** yang menyentuh nilai PSNR terendah yaitu 17.53 dB (*Bicubic*) dan 17.27 dB (*Lanczos4*), serta sampel **Gambar H** yang memiliki nilai SSIM terendah (0.4794 untuk *Bicubic* dan 0.4575 untuk *Lanczos4*). Rendahnya performa pada berkas-berkas tersebut disebabkan oleh adanya gangguan artefak lingkungan nyata pada CCTV seperti getaran kendaraan (*motion blur*) dan bayangan objek jalanan.



Gambar 7. Sampel Gambar B yang sudah diproses Bicubic dan Lanczos4



Gambar 8. Sampel Gambar H yang sudah diproses Bicubic dan Lanczos4

Tabel 3. Tabel Rata-rata Gambar B dan Gambar H

Nama File Sampel	PSNR Bicubic	PSNR Lancsoz4	SSIM Bicubic	SSIM Lancsoz4
Gambar B	17.53	17.27	0.5933	0.5712
Gambar H	18.16	17.96	0.4794	0.4575

4.2. Analisis Perbandingan Citra Secara Keseluruhan (Agregat)

Jika dievaluasi secara keseluruhan berdasarkan kumulatif nilai rata-rata dari ke-10 sampel, metode *Bicubic Interpolation* secara absolut memenangkan uji kuantitatif matematika dengan rata-rata PSNR **19.47 dB** (unggul selisih tipis +0.22 dB dari metode Lancsoz4 yang bernilai 19.25 dB) dan rata-rata SSIM **0.5325** (unggul +0.0197 dari metode Lancsoz4 yang bernilai 0.5128).

Tabel 4. Tabel Perbandingan Rata-rata

Nama File Sampel	PSNR Bicubic	PSNR Lancsoz4	SSIM Bicubic	SSIM Lancsoz4
Gambar A	19.21	19.02	0.5226	0.5025
Gambar B	17.53	17.27	0.5933	0.5712
Gambar C	18.22	17.96	0.6316	0.6092
Gambar D	22.11	21.89	0.4970	0.4821
Gambar E	20.94	20.72	0.6064	0.5883
Gambar F	22.37	22.15	0.5038	0.4897
Gambar G	18.40	18.19	0.4903	0.4680
Gambar H	18.16	17.96	0.4794	0.4575
Gambar I	18.20	18.00	0.4947	0.4732
Gambar J	19.50	19.35	0.5063	0.4868
Rata-Rata Total	19.47	19.25	0.5325	0.5128

Secara teoretis ilmiah, keunggulan menyeluruh dari metode *Bicubic* ini terjadi karena karakteristik dasar dari algoritmanya yang melakukan pengisian nilai piksel baru berdasarkan interpolasi polinomial kubik dua dimensi berskala lokal (4x4 piksel). Sifat matematika dari kernel *Bicubic* adalah memotong frekuensi tinggi citra dan memberikan efek penghalusan (*smoothing effect*) yang merata pada seluruh matriks. Efek penghalusan ini secara mekanis menekan nilai selisih kuadrat rata-rata atau *Mean Squared Error* (MSE) global. Karena nilai MSE global ditekan sekecil mungkin, maka secara otomatis kalkulasi nilai PSNR (yang berbanding terbalik dengan nilai MSE) akan terangkat naik secara artifisial. Hal serupa terjadi pada metrik SSIM global, di mana kemiripan aspek luminans dan kontras pada area latar belakang jalan raya, trotoar jalan wisata, atau badan mobil yang homogen dinilai lebih stabil dan minim distorsi oleh *Bicubic*.

Namun, dari sudut pandang fungsional sistem deteksi plat nomor kendaraan otomatis (ANPR), visualisasi hasil keseluruhan membuktikan adanya paradoks metrik. Meskipun metode usulan Lanczos4 kalah secara angka rata-rata global di Tabel 1, rekonstruksi lokal khusus pada area karakter alfanumerik plat nomor justru jauh lebih unggul secara kualitatif. Kernel Lanczos4 yang menggunakan jendela spasial lebih luas (8x8 piksel) berbasis fungsi *windowed sinc filter* berhasil mempertahankan kontinuitas kelengkungan garis dan ketajaman sudut dari huruf serta angka pada plat nomor kendaraan. Karakter pada citra hasil rekonstruksi Lancsoz4 terbebas dari efek kabur berbayang (*anti-aliasing blur*) yang dialami citra hasil *Bicubic*.

Berdasarkan analisis visual tersebut, metode Lanczos4 memiliki potensi untuk memberikan tingkat keterbacaan (readability) struktur karakter yang lebih baik secara kasat mata untuk kebutuhan praktis pemantauan CCTV publik Kota Yogyakarta. Meskipun

Bicubic memberikan kontribusi metrik kuantitatif global yang sedikit lebih tinggi, ketajaman tepi teks yang dihasilkan oleh Lanczos4 menjadikannya kandidat metode prapemrosesan yang menjanjikan. Namun demikian, hipotesis mengenai keunggulan ini masih terbatas pada evaluasi visual kualitatif dan inferensi teoretis. Mengingat penelitian ini tidak melibatkan pengujian langsung menggunakan sistem Optical Character Recognition (OCR), belum dapat dipastikan secara definitif bahwa Lanczos4 akan selalu meningkatkan akurasi sistem Automatic Number Plate Recognition (ANPR). Diperlukan pengujian eksperimental lanjutan dengan mengintegrasikan sistem OCR di tingkat hilir untuk memvalidasi secara empiris apakah peningkatan ketajaman visual dari Lanczos4 berbanding lurus dengan keberhasilan identifikasi teks secara otomatis.

5. Kesimpulan

Penelitian ini telah berhasil merancang, mensimulasikan, dan mengevaluasi komparasi performa rekonstruksi piksel menggunakan metode tradisional *Bicubic Interpolation* dan pendekatan algoritma usulan berbasis Lanczos4 pada 10 sampel citra *frame video* dari kamera CCTV publik kawasan wisata Kota Yogyakarta. Berdasarkan hasil pengujian kuantitatif objektif, metode *Bicubic Interpolation* mencatatkan nilai performa rata-rata tertinggi sebesar 19.47 dB untuk metrik PSNR dan 0.5325 untuk metrik SSIM, mengungguli metode usulan Lanczos4 yang memperoleh rata-rata PSNR 19.25 dB dan SSIM 0.5128. Keunggulan numerik global ini didorong oleh karakteristik matematika kernel *Bicubic* yang melakukan interpolasi polinomial 4×4 piksel secara halus (*smoothing effect*), sehingga mampu mereduksi nilai *Mean Squared Error* (MSE) pada area latar belakang citra yang homogen.

Namun demikian, dari tinjauan analisis visual kualitatif pada area lokal plat nomor, ditemukan adanya fenomena paradoks metrik di mana hasil kuantitatif global tidak sepenuhnya mencerminkan kualitas ketajaman visual. Secara kasat mata, algoritma Lanczos4 teramati lebih mampu mempertahankan ketegasan garis batas, kelengkungan, dan kontras tepi karakter alfanumerik pada plat nomor kendaraan. Penerapan fungsi *windowed sinc filter* pada jendela spasial 8×8 piksel yang dimiliki Lanczos4 berhasil meminimalisasi efek kabur berbayang (*anti-aliasing blur*) yang sering muncul pada hasil interpolasi *Bicubic*. Meskipun secara visual karakter plat nomor tampak lebih tegas, kesimpulan penelitian ini dibatasi hanya pada evaluasi metrik PSNR, SSIM, dan analisis observasi visual. Klaim bahwa Lanczos4 lebih baik untuk sistem Automatic Number Plate Recognition (ANPR) belum dapat dipastikan karena ketiadaan pengujian menggunakan mesin pengenalan teks otomatis (Optical Character Recognition/OCR) secara langsung di tingkat hilir.

Selain itu, penelitian ini memiliki keterbatasan dalam hal jumlah data. Penggunaan 10 sampel citra membatasi kemampuan generalisasi hasil penelitian terhadap berbagai variabilitas gangguan lingkungan di jalan raya secara komprehensif. Sebagai rekomendasi untuk penelitian selanjutnya, diperlukan pengujian menggunakan dataset yang lebih masif serta validasi tingkat akurasi menggunakan OCR. Guna melampaui limitasi matematis dari filter interpolasi konvensional dalam mengatasi noise berat akibat fluktuasi cahaya dan motion blur, penerapan arsitektur Deep Learning Super-Resolution (seperti SRCNN atau ESRGAN) sangat disarankan untuk mengembalikan detail frekuensi tinggi yang hilang secara lebih optimal.

Referensi

- [1] M. Hijji, A. Khan, M. M. Alwakeel, R. Harrabi, F. Aradah, F. A. Cheikh, M. Sajjad, and K. Muhammad, "Intelligent Image Super-Resolution for Vehicle License Plate in Surveillance Applications," *Mathematics*, vol. 11, no. 4, hlm. 892, 2023. <https://doi.org/10.3390/math11040892>
- [2] Y.-W. Lee and B.-G. Kim, "Stroke-Aware Flow for License Plate Recognition," *Journal of Multimedia Information System*, vol. 13, no. 1, hlm. 13-20, 2026. <https://doi.org/10.33851/JMIS.2026.13.1.13>

- [3] V. Nascimento, G. E. Lima, R. O. Ribeiro, W. R. Schwartz, R. Laroca, and D. Menotti, "Toward Advancing License Plate Super-Resolution in Real-World Scenarios: A Dataset and Benchmark," *Journal of the Brazilian Computer Society*, vol. 31, no. 1, hlm. 435–448, 2025. <https://doi.org/10.5753/jbcs.2025.5159>
- [4] C. Dong, C. C. Loy, K. He, and X. Tang, "Image super-resolution using deep convolutional networks," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 38, no. 2, hlm. 295–307, 2016. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2015.2439281>
- [5] Ş. Sağlam and A. Çelik, "Solution Proposal for Accelerating Interpolation Algorithms in Image Scaling: A Comparative Application," *ESTUDAM Bilişim Dergisi*, vol. 1, no. 1, hlm. 24–30, 2026. <https://doi.org/10.53608/estudambilisim.1844275>
- [6] T. Tinaliah and T. Elizabeth, "Analisis Hasil Resolusi Citra Dengan Metode Interpolasi Nearest Neighbor, Interpolasi Bilinear, dan Interpolasi Bicubic," *JuSiTik: Jurnal Sistem dan Teknologi Informasi Komunikasi*, vol. 2, no. 1, hlm. –, 2022. <https://doi.org/10.32524/jusitik.v2i1.428>
- [7] L. Orellano-Benancio, R. Muñoz-Canales, D. Humpire-Molina, and E. L. Huamani, "Identification of alphanumeric characters in license plates based on image processing with commercial software as a complement or alternative to image processing with Amped FIVE forensic software," *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, vol. 8, no. 5, hlm. 4920–4926, 2020. <https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/05892020>
- [8] N. Cahyadi, S. Salsabila, S. Raniprima, and V. Monita, "Tinjauan Literatur Teknik Pengenalan Plat Nomor Berbasis Deep Learning," *Jurnal Teknologika*, vol. 14, no. 2, hlm. 458–469, 2024. <https://doi.org/10.51132/teknologika.v14/2>
- [9] S. Sugeng and N. Widyanto, "Perbaikan Kualitas Gambar untuk Deteksi Plat Nomor Kendaraan dengan Metode Super Resolution GANs," *Jurnal Buana Informatika*, vol. 16, no. 2, hlm. –, 2025. <https://doi.org/10.24002/jbi.v16i2.11483>
- [10] V. Nascimento, R. Laroca, J. A. Lambert, W. R. Schwartz, and D. Menotti, "Super-resolution of license plate images using attention modules and sub-pixel convolution layers," *Computers & Graphics*, vol. 113, no. –, hlm. 69–76, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2023.05.005>
- [11] Y. Pan, J. Tang, and T. Tjahjadi, "LPSRGAN: Generative adversarial networks for super-resolution of license plate image," *Neurocomputing*, vol. 580, no. –, hlm. 127426, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2024.127426>
- [12] M. Lin, L. Liu, F. Wang, J. Li, and J. Pan, "License plate image reconstruction based on generative adversarial networks," *Remote Sensing*, vol. 13, no. 15, hlm. 3018, 2021. <https://doi.org/10.3390/rs13153018>
- [13] A. Hamdi, Y. K. Chan, and V. C. Koo, "A new image enhancement and super resolution technique for license plate recognition," *Heliyon*, vol. 7, no. 11, hlm. e08341, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08341>
- [14] K. Mehrgan, A. R. Ahmadyfard, and H. Khosravi, "Super-resolution of License-plates Using Weighted Interpolation of Neighboring Pixels from Video Frames," *International Journal of Engineering, TRANSACTIONS B: Applications*, vol. 33, no. 5, hlm. 992–999, 2020. <https://doi.org/10.5829/ije.2020.33.05b.33>
- [15] S. Pan, S.-B. Chen, and B. Luo, "A super-resolution-based license plate recognition method for remote surveillance," *Journal of Visual Communication and Image Representation*, vol. 94, no. –, hlm. 103844, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jvcir.2023.103844>