



Analisis Komparatif HTTP/1.1 vs HTTP/2 dan Klasifikasi Prioritas Migrasi pada *Website* Pemerintah Kepulauan Riau Menggunakan *Ensemble Machine Learning*

Dodik Hadinata¹, Ahmad Zulfan²

^{1,2}Teknik Informatika, Sekolah Tinggi Ilmu Komputer Muhammadiyah Batam
dodikhadinata0904@gmail.com, zulfan99@gmail.com

Abstract

Government digital transformation requires optimal web infrastructure, but the majority of Indonesian government web site s still use the outdated HTTP/1.1 protocol. This study aims to develop a framework for classifying HTTP/2 migration priorities for Riau Islands government web site s through the integration of literature-based simulation with machine learning. Data was collected from 91 government web site s using the Google PageSpeed Insights API [13] [13], covering Core Web Vitals metrics and security header implementation. The simulation model was developed based on a synthesis of improvement factors from academic and industry literature to predict HTTP/2 performance improvements. A multi-criteria decision framework was constructed by integrating performance gaps, improvement potential, security readiness, and modernization needs as target variables for machine learning. The results of the study show that all web site s still use HTTP/1.1, with 98.9% exceeding the recommended performance threshold. The simulation predicts an average performance improvement of 29.3% after migration to HTTP/2. The Random Forest model achieved an F1-score of 0.949 and an accuracy of 0.947, classifying eight high-priority web site s, 26 medium-priority web site s, and 57 low-priority web site s. The study produced recommendations for phased implementation with a 12-18 month timeline. The developed framework can be adapted for planning the adoption of other technologies in the public sector.

Kata kunci: HTTP/2, protocol migration, machine learning, government web site s, priority classification, multi-criteria kerangka kerja, performance simulation.

Abstrak

Transformasi digital pemerintah memerlukan infrastruktur web yang optimal, namun mayoritas *website* pemerintah Indonesia masih menggunakan protokol HTTP/1.1 yang ketinggalan zaman. Penelitian ini bertujuan mengembangkan kerangka kerja klasifikasi prioritas migrasi HTTP/2 untuk *website* pemerintah Kepulauan Riau melalui integrasi simulasi berbasis literatur dengan pembelajaran mesin. Data dikumpulkan dari 91 *website* pemerintah menggunakan *Google PageSpeed Insights API* [13] [13], mencakup *metrik Core Web Vitals* dan implementasi *security headers*. Model simulasi dikembangkan berdasarkan sintesis faktor peningkatan dari literatur akademis dan industri untuk memprediksi peningkatan performa HTTP/2. Kerangka keputusan multi-kriteria dikonstruksi mengintegrasikan kesenjangan performa, potensi peningkatan, kesiapan keamanan, dan kebutuhan modernisasi sebagai variabel target untuk pembelajaran mesin. Hasil penelitian menunjukkan bahwa seluruh *website* masih menggunakan HTTP/1.1 dengan 98.9% melampaui threshold performa yang direkomendasikan. Simulasi memprediksi peningkatan performa rata-rata 29.3% setelah migrasi HTTP/2. Model *Random Forest* mencapai F1-score 0.949 dan akurasi 0.947, mengklasifikasikan delapan *website* prioritas tinggi, 26 prioritas sedang, dan 57 prioritas rendah. Penelitian menghasilkan rekomendasi implementasi bertahap dengan timeline 12-18 bulan. Kerangka kerja yang dikembangkan dapat diadaptasi untuk perencanaan adopsi teknologi lainnya dalam sektor publik.

Kata kunci: HTTP/2, migrasi protokol, pembelajaran mesin, *website* pemerintah, klasifikasi prioritas, kerangka kerja multi-kriteria, simulasi performa.

1. Pendahuluan

Transformasi digital pemerintah telah menjadi agenda prioritas di berbagai negara [1], [7], termasuk Indonesia, sebagai upaya meningkatkan kualitas layanan publik dan

efisiensi administrasi [9]. *Website* pemerintah berperan sebagai antarmuka utama antara pemerintah dan masyarakat dalam mengakses informasi, layanan administrasi, dan partisipasi publik. Performa *website* yang optimal menjadi faktor kritis dalam menentukan



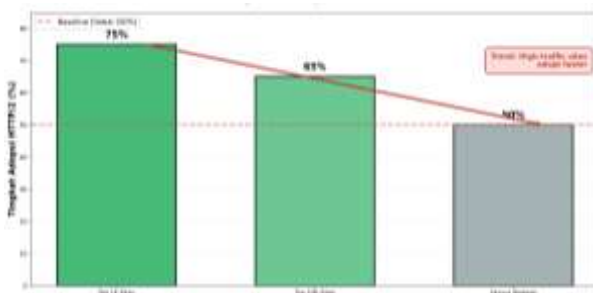
Lisensi

Lisensi Internasional Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0.

keberhasilan transformasi digital, karena berpengaruh langsung terhadap pengalaman pengguna, aksesibilitas layanan, dan kepercayaan publik terhadap institusi pemerintah. Penelitian oleh Tasfiani menunjukkan bahwa kualitas teknis *website* pemerintah, termasuk kecepatan pemuatan, berkorelasi signifikan dengan kepuasan dan kepercayaan publik. Studi yang dilakukan oleh *Google* melaporkan bahwa setiap tambahan satu detik waktu pemuatan dapat mengurangi tingkat konversi hingga 7%, yang dalam konteks layanan publik berimplikasi pada penurunan aksesibilitas dan efektivitas program pemerintah.

Protokol HTTP/2, yang dirilis sebagai standar pada tahun 2015, menawarkan peningkatan signifikan dibandingkan pendahulunya HTTP/1.1 [3], [4] melalui fitur-fitur seperti multiplexing, header compression, server push, dan stream prioritization. Berbagai studi empiris telah memvalidasi manfaat HTTP/2 untuk performa *web*. Dalam analisis skala besar [3], [4] menunjukkan bahwa HTTP/2 mengurangi waktu pemuatan rata-rata 30% pada kondisi jaringan standar. Meskipun demikian, evaluasi komprehensif terhadap performa *website* e-government di Indonesia [5], terutama terkait adopsi protokol modern seperti HTTP/2, masih diperlukan untuk mengidentifikasi potensi peningkatan dan hambatan implementasi. Manfaat terbesar HTTP/2 terlihat pada *website* dengan banyak sumber daya dan kondisi jaringan dengan latensi tinggi, yang relevan untuk konteks Indonesia dengan infrastruktur jaringan yang beragam. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi dan menganalisis performa *website* pemerintah Kepulauan Riau serta mengidentifikasi langkah-langkah optimalisasi berbasis response server awal dan rekomendasi optimalisasi.

Pola adopsi HTTP/2 menunjukkan karakteristik difusi teknologi yang khas [12], dimana pengadopsi awal adalah organisasi dengan sumber daya teknis yang lebih kuat. Gambar 1 menampilkan tingkat adopsi HTTP/2 berdasarkan peringkat *website* global, dengan data dari W3Techs (November 2025) menunjukkan gradien yang jelas: *website* 1.000 teratas mencapai adopsi 75%, 10.000 teratas mencapai 65%, sementara rata-rata seluruh *website* berada di level 50%.



Gambar 1. Pola Adopsi HTTP2 pada *Website* Global
Sumber: W3Techs Usage Statistics (Januari 2024), HTTP Archive (2024)

Pola ini mengkonfirmasi bahwa *website* dengan lalu lintas tinggi cenderung mengadopsi teknologi performa lebih cepat. *Website* tersebut umumnya memiliki tim teknis yang lebih matang dan infrastruktur yang lebih kokoh, memungkinkan implementasi teknologi baru dengan risiko yang lebih terkelola [6].

Dalam konteks *website* pemerintah Indonesia [2], [5], khususnya Kepulauan Riau, observasi awal menemukan bahwa tidak satupun dari 93 *website* yang berhasil diidentifikasi telah mengimplementasikan HTTP/2. Seluruh *website* masih menggunakan protokol HTTP/1.1, menunjukkan tingkat adopsi 0%.

Kesenjangan adopsi ini sangat signifikan dan mengindikasikan hambatan struktural dalam modernisasi infrastruktur *web* pemerintah. Tingkat adopsi 0% pada *website* pemerintah Kepulauan Riau kontras tajam dengan rata-rata global (50%) dan terutama dengan praktik terbaik yang direpresentasikan oleh *website* berkinerja tinggi (75%). Kesenjangan ini dapat disebabkan oleh berbagai faktor: keterbatasan sumber daya teknis, prioritas anggaran yang tidak mengakomodasi modernisasi infrastruktur, ketiadaan kerangka kerja sistematis untuk menentukan prioritas implementasi, atau kombinasi dari faktor-faktor tersebut. Kesenjangan digital antara layanan publik dengan sektor swasta, yang pada akhirnya dapat menghambat pencapaian tujuan transformasi digital pemerintah [7].

Provinsi Kepulauan Riau, sebagai salah satu wilayah dengan pertumbuhan ekonomi digital yang pesat, menghadapi tantangan dalam menyelaraskan infrastruktur digital pemerintah dengan perkembangan teknologi. Observasi menunjukkan bahwa mayoritas *website* pemerintah memiliki performa yang umumnya di bawah standar yang direkomendasikan *Google Core Web Vitals*. Metrik-metrik performa kritis seperti *Largest Contentful Paint (LCP)*, *First Contentful Paint (FCP)*, dan *Time to Interactive (TTI)* [6], [8] pada sebagian besar *website* melampaui ambang batas yang ditetapkan, mengindikasikan pengalaman pengguna yang suboptimal. Kondisi ini menjadi kontradiktif dengan visi pemerintah daerah untuk mewujudkan smart province yang berbasis teknologi digital. Tantangan utama adalah menentukan prioritas migrasi dari ratusan *website* pemerintah yang ada, mengingat keterbatasan sumber daya dan variasi kondisi teknis antar *website*.

Aspek keamanan aplikasi *web* juga menjadi pertimbangan penting dalam penelitian ini melalui analisis implementasi *security headers* [10], [11]. Penelitian menunjukkan bahwa implementasi *security headers* berkorelasi dengan kematangan praktik pengembangan *web* dan kesiapan untuk adopsi teknologi baru. *Website* dengan postur keamanan yang baik cenderung memiliki tim teknis yang kompeten dan infrastruktur yang lebih terstandarisasi, sehingga risiko implementasi migrasi HTTP/2 dapat diminimalkan.

Integrasi aspek keamanan dalam kerangka kerja penentuan prioritas memastikan bahwa proses modernisasi tidak hanya fokus pada peningkatan performa tetapi juga mempertimbangkan kesiapan infrastruktur dan keberlanjutan implementasi jangka panjang.

Tinjauan literatur mengidentifikasi beberapa kesenjangan penelitian yang signifikan. Pertama, studi tentang adopsi HTTP/2 dalam sektor pemerintah masih sangat terbatas, dengan mayoritas penelitian berfokus pada evaluasi teknis protokol atau analisis adopsi pada sektor komersial. Penelitian spesifik untuk *website* pemerintah seperti yang dilakukan oleh Liu [4] dan Armaini [5] mengidentifikasi pentingnya optimalisasi performa berbasis response server, namun belum mengembangkan kerangka kerja untuk prioritas implementasi secara sistematis. Kedua, pendekatan yang ada untuk perencanaan adopsi teknologi umumnya menggunakan penilaian kriteria tunggal, belum ada yang mengintegrasikan berbagai dimensi (performa, potensi manfaat, kesiapan keamanan, kebutuhan modernisasi) secara komprehensif. Ketiga, metodologi yang ada mengasumsikan ketersediaan data empiris untuk perbandingan. Dalam konteks dimana seluruh *website* masih menggunakan teknologi lama (HTTP/1.1), tidak tersedia data dasar HTTP/2 untuk perbandingan, sehingga diperlukan pendekatan alternatif berbasis simulasi. Keempat, aplikasi pembelajaran mesin untuk penentuan prioritas dalam adopsi teknologi masih jarang, terutama yang mengintegrasikan data simulasi dengan kerangka keputusan multi-kriteria.

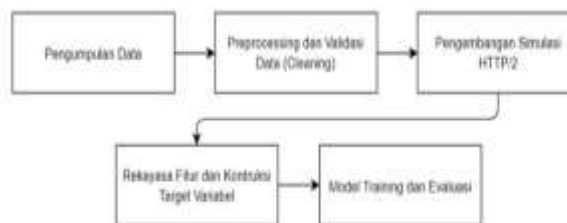
Penelitian ini bertujuan mengembangkan kerangka kerja klasifikasi prioritas migrasi HTTP/2 untuk *website* pemerintah Kepulauan Riau yang mengintegrasikan simulasi berbasis literatur dengan pembelajaran mesin. Pendekatan simulasi digunakan untuk memprediksi peningkatan performa yang dapat dicapai setelah migrasi HTTP/2, mengingat tidak tersedianya data empiris karena seluruh *website* masih menggunakan HTTP/1.1. Model simulasi dikembangkan berdasarkan sintesis faktor peningkatan dari studi akademis dan industri yang tervalidasi [3], [4], kemudian disesuaikan secara dinamis berdasarkan kompleksitas setiap *web site*. Pembelajaran mesin digunakan untuk mengklasifikasikan prioritas migrasi (tinggi, sedang, rendah) berdasarkan kerangka keputusan multi-kriteria yang mengintegrasikan empat dimensi: kesenjangan performa saat ini (40%), potensi peningkatan HTTP/2 (30%), kesiapan keamanan infrastruktur (20%), dan kebutuhan modernisasi keseluruhan (10%). Pembobotan ini dirancang untuk memprioritaskan *website* dengan performa terburuk dan potensi manfaat tertinggi sambil mempertimbangkan kelayakan implementasi.

Kontribusi penelitian ini bersifat teoretis dan praktis. Secara teoretis, penelitian mengusulkan metodologi novel yang mengkombinasikan simulasi berbasis literatur dengan pembelajaran mesin untuk mengatasi

ketiadaan data empiris dalam evaluasi teknologi, pendekatan yang dapat diadaptasi untuk konteks adopsi teknologi lain dalam sektor publik. Pendekatan ini menawarkan solusi untuk dilema umum dalam riset adopsi teknologi dimana keputusan harus dibuat sebelum implementasi aktual dilakukan [12], memberikan kerangka kerja untuk pengambilan keputusan berbasis bukti dalam kondisi keterbatasan data. Secara praktis, penelitian menghasilkan kerangka kerja berbasis bukti untuk pengambilan keputusan prioritas migrasi yang dapat diimplementasikan oleh pemerintah daerah dengan sumber daya terbatas. Kerangka kerja ini mengintegrasikan berbagai dimensi penilaian ke dalam sistem klasifikasi yang sistematis dan transparan, memungkinkan alokasi sumber daya yang efisien dan terukur. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan panduan praktis bagi pemangku kepentingan pemerintah dalam merencanakan modernisasi infrastruktur *web* secara bertahap, efisien, dan terukur, serta dapat diadaptasi untuk wilayah lain di Indonesia dengan karakteristik serupa.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan desain eksploratif untuk mengembangkan kerangka kerja klasifikasi prioritas migrasi HTTP/2 pada *website* pemerintah Kepulauan Riau. Metodologi terdiri dari lima tahapan utama: (1) pengumpulan data performa dan keamanan dari 91 *website* pemerintah menggunakan *Google PageSpeed Insights API* [13] dan analisis security headers, (2) preprocessing dan validasi data untuk memastikan kelengkapan dan kualitas dataset, (3) pengembangan model simulasi berbasis literatur untuk memprediksi peningkatan performa setelah migrasi HTTP/2, (4) rekayasa fitur dan konstruksi target variable menggunakan framework multi-kriteria yang mengintegrasikan empat dimensi penilaian, dan (5) pelatihan dan evaluasi enam algoritma ensemble *machine learning* untuk menghasilkan klasifikasi prioritas yang *robust*. Seluruh tahapan dirancang untuk mengatasi ketiadaan data empiris HTTP/2 sambil memastikan hasil yang terukur dan dapat direplikasi.



Gambar 2. Alur Metodologi Penelitian

Populasi penelitian adalah seluruh *website* resmi pemerintah Provinsi Kepulauan Riau, mencakup *website* tingkat provinsi, kabupaten, dan kota yang teridentifikasi dari portal resmi pemerintah. Dari 107 *website* yang teridentifikasi, sebanyak 93 *website*

(86.9%) berhasil dikumpulkan datanya, sementara 14 *website* (13.1%) gagal diakses karena berbagai kendala teknis seperti server tidak merespons, *SSL certificate error*, atau *website* tidak aktif. Dari 93 *website* yang berhasil dikumpulkan, 91 *website* (97.8%) memiliki data lengkap untuk semua metrik yang dianalisis dan digunakan sebagai sampel final penelitian.

Proses pengumpulan data dilakukan secara otomatis menggunakan skrip *Python* yang mengintegrasikan dua sumber data utama. Pertama, *Google PageSpeed Insights API* [13] digunakan untuk mengumpulkan metrik performa *web site*, mencakup *Core Web Vitals* (*Largest Contentful Paint*, *First Contentful Paint*, *Time to Interactive*, *Total Blocking Time*, *Cumulative Layout Shift*, *Speed Index*), skor performa keseluruhan, serta metadata teknis seperti protokol HTTP yang digunakan dan ukuran resources. Kedua, analisis *security headers* dilakukan dengan melakukan HTTP request langsung ke setiap *website* untuk memeriksa implementasi enam *security headers* utama: *HTTP Strict Transport Security (HSTS)*, *Content Security Policy (CSP)*, *X-Frame-Options*, *X-Content-Type-Options*, *Referrer-Policy*, dan *Permissions-Policy*. Data dikumpulkan pada periode November 2024 untuk memastikan konsistensi temporal dan menghindari bias musiman. Spesifikasi lengkap disajikan pada Tabel 1 berikut:

Aspek	Spesifikasi	Keterangan
Sumber Data	Google Pagespeed Insight API v5	Standar industri untuk audit performa
Populasi	105 <i>website</i> di pemerintahan provinsi kepri	Provinsi, Kab/Kota, DPRD, dan Dinas/Badan
Sampel Valid	93 <i>website</i> (86.9%)	14 gagal diakses/tidak responsive
Data Lengkap	91 <i>website</i> (97.8%)	2 <i>website</i> missing value
Periode	Oktober-November 2025	Single timepoint snapshot
Perangkat	PC/Laptop	Internet provider
Metrik Performa	7 metrik	LCP, FCP, TTI, TBT, CLS, SI, TTFB
Metrik Keamanan	6 security header	HSTS, CSP, X-Frame, X-Content, Referrer, Permissions
Protokol HTTP	HTTP version detection	HTTP/1.1, HTTP/2, atau Unknown

Tabel 1. Spesifikasi Pengumpulan Data *Web site*

Mengingat tidak ada *website* yang menggunakan HTTP/2, dikembangkan model simulasi untuk memprediksi peningkatan performa yang dapat dicapai setelah migrasi. Model simulasi dikembangkan berdasarkan sintesis faktor peningkatan dari literatur akademis dan industri yang tervalidasi [3], [4]. Faktor peningkatan dasar (*baseline improvement factor*) ditetapkan sebesar 35% berdasarkan rata-rata dari berbagai studi empiris, kemudian disesuaikan secara dinamis untuk setiap *website* berdasarkan skor kompleksitas dengan batasan 20-50%. Skor kompleksitas dihitung dari kombinasi skor performa saat

ini dan nilai LCP, dimana *website* dengan performa lebih buruk mendapatkan *adjustment factor* yang lebih tinggi karena potensi benefit HTTP/2 yang lebih besar. Model simulasi menghasilkan prediksi untuk semua metrik *Core Web Vitals* dan skor performa keseluruhan dalam kondisi HTTP/2. Validasi simulasi dilakukan menggunakan uji statistik untuk memastikan prediksi berada dalam rentang yang realistis dan konsisten dengan literatur.

Rekayasa fitur menghasilkan 55 fitur dari 20 fitur awal yang mencakup metrik performa baseline, metrik performa prediksi HTTP/2, *security headers implementation*, dan *derived features* seperti *improvement potential* dan *performance gaps*. Seleksi fitur dilakukan menggunakan analisis korelasi untuk menghilangkan multikolinieritas dan mutual information untuk mengidentifikasi fitur yang paling relevan terhadap prioritas migrasi, menghasilkan 12 fitur final untuk pemodelan [14].

Target variable dikonstruksi menggunakan framework multi-kriteria yang mengintegrasikan empat dimensi dengan pembobotan: kesenjangan performa saat ini (40%), potensi peningkatan HTTP/2 (30%), kesiapan keamanan infrastruktur (20%), dan kebutuhan modernisasi keseluruhan (10%). Setiap dimensi dinormalisasi ke skala 0-100, kemudian dikombinasikan menggunakan *weighted average* untuk menghasilkan skor prioritas gabungan. Klasifikasi prioritas ditentukan berdasarkan threshold: *HIGH* jika skor ≥ 60 atau (*performance score* < 50 DAN *improvement potential* $> 35\%$), *MEDIUM* jika skor < 35 , dan *LOW* untuk kondisi lainnya. Distribusi kelas yang dihasilkan adalah 7 *website* *HIGH* (7.7%), 26 *MEDIUM* (28.6%), dan 58 *LOW* (63.7%). Ketidakseimbangan kelas ini ditangani melalui *stratified sampling* pada pembagian data dan *class weighting* pada algoritma pembelajaran.

Dataset 91 *website* dibagi menggunakan stratified train-test split dengan proporsi 80:20, menghasilkan 72 data latih dan 19 data uji. *Stratified splitting* memastikan distribusi kelas yang proporsional pada kedua subset. Enam algoritma *ensemble machine learning* dievaluasi: *Random Forest*, *XGBoost*, *LightGBM*, *AdaBoost*, *Gradient Boosting*, serta *ensemble Voting* dan *Stacking* [15]. Setiap algoritma dilatih dengan hyperparameter yang telah dioptimasi dan menggunakan *class weighting* untuk mengatasi ketidakseimbangan kelas.

Evaluasi model menggunakan skor F1 tertimbang sebagai metrik utama karena kemampuannya menyeimbangkan *precision* dan *recall* pada dataset tidak seimbang [16], [17], dilengkapi akurasi, *precision* dan *recall* per-kelas, serta matriks konfusi untuk analisis detail kesalahan klasifikasi. Validasi silang 5-fold dilakukan pada data latih untuk menguji stabilitas model dan mendeteksi potensi *overfitting*. Model terbaik dipilih berdasarkan kombinasi kinerja kuantitatif (*F1-*

score tertinggi) dan kriteria kualitatif mencakup interpretabilitas (kemudahan memahami keputusan model), efisiensi komputasi (kecepatan *training* dan prediksi), dan *robustness* (konsistensi performa pada validasi silang). Analisis *feature importance* menggunakan *Gini importance* dilakukan untuk mengidentifikasi faktor-faktor kunci yang mempengaruhi klasifikasi prioritas.

Analisis data menggunakan *Python* [18] dengan ekosistem *library scientific computing: pandas* untuk manipulasi data, *NumPy* untuk komputasi numerik, *scikit-learn* untuk pembelajaran mesin dan evaluasi model, *Matplotlib* dan *Seaborn* untuk visualisasi data, serta *SciPy* untuk uji statistik. Seluruh tahapan metodologi didokumentasikan secara sistematis untuk memastikan transparansi dan dapat direplikasi oleh peneliti lain menggunakan spesifikasi yang telah dijelaskan.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Karakteristik Dataset *Website* Pemerintah Kepulauan Riau

Penelitian ini dimulai dengan identifikasi 107 *website* pemerintah di Provinsi Kepulauan Riau yang mencakup *website* tingkat provinsi dan kabupaten/kota. Dari 107 *website* yang teridentifikasi, sebanyak 93 *website* (86.9%) berhasil dikumpulkan datanya menggunakan *Google PageSpeed Insights API* [13] [13], sementara 14 *website* (13.1%) gagal diakses karena berbagai alasan teknis. Dari 93 *website* yang berhasil dikumpulkan, 91 *website* (97.8%) memiliki data lengkap untuk semua metrik yang dianalisis.

Temuan paling signifikan adalah bahwa seluruh *website* masih menggunakan protokol HTTP/1.1, dengan tidak ditemukan satupun implementasi HTTP/2. Temuan ini memvalidasi urgensi penelitian dan menunjukkan kesenjangan teknologi yang signifikan antara praktik saat ini dengan standar industri *web* modern. Distribusi *website* berdasarkan kategori performa menurut standar *Google Core Web Vitals* menunjukkan mayoritas *website* (81.3%) berada pada kategori "Perlu Perbaikan", sebanyak 16 *website* (17.6%) pada kategori "Buruk", dan hanya 1 *website* (1.1%) mencapai kategori "Baik". Skor performa rata-rata adalah 61.05 dengan standar deviasi 12.83, mengindikasikan hampir seluruh *website* memerlukan optimasi performa yang signifikan.

Kategori	Jumlah	Persentase	Performance Score Range
Good	1	1.1%	90-100
Need Improvement	74	81.3%	50-89
Poor	16	17.6%	0-49
Total	91	100%	0-100

Tabel 2. Distribusi Kategori Performa *Web site*

3.2. Analisis Metrik Performa *Web site*

Analisis mendalam terhadap metrik performa menunjukkan kondisi yang mengkhawatirkan. *Largest*

Contentful Paint (LCP) menunjukkan rata-rata 13,625 ms, jauh melebihi *threshold Google* sebesar 2,500 ms, dengan 98.9% *website* berada di atas ambang batas. *First Contentful Paint (FCP)* rata-rata mencapai 4,334 ms dimana *threshold* adalah 1,800 ms, dengan 95.6% *website* melampaui batas. *Time to Interactive (TTI)* menunjukkan kondisi paling kritis dengan rata-rata 16,728 ms, sangat jauh dari *threshold* 3,800 ms, dimana 96.7% *website* melampaui standar. Metrik-metrik ini mengindikasikan bahwa *website* pemerintah Kepulauan Riau umumnya membutuhkan waktu pemuatan yang sangat lama, berpotensi menurunkan pengalaman pengguna secara signifikan.

Metrik	Mean	Threshold Google	% Melampaui Threshold
LCP (ms)	13,625	2,500	98.9%
FCP (ms)	4,334	1,800	95.6%
TTI (ms)	16,728	3,800	96.7%
Speed Index (ms)	9,244	-	-
Performa Score	61.05	-	-

Tabel 3. Statistik Metrik Performa *Web site*

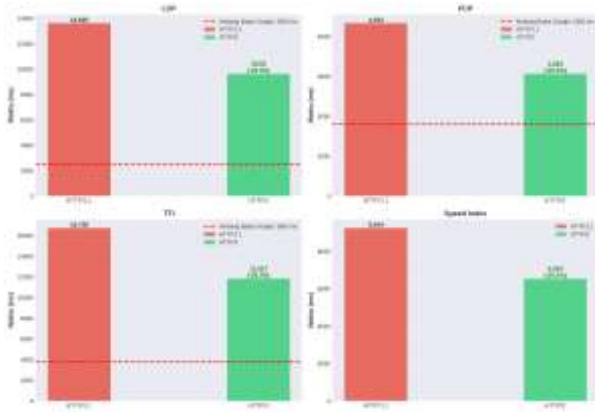
Aspek keamanan *website* dianalisis berdasarkan implementasi *security headers*. Terdapat variasi signifikan dalam implementasi, dimana *X-Frame-Options* mencapai tingkat implementasi tertinggi (84.9%), diikuti oleh HSTS dan *X-Content-Type-Options* (78.5%). Namun, implementasi *Content Security Policy (CSP)* dan *Permissions-Policy* masih rendah (50.5% dan 47.3%). *Security score* rata-rata adalah 69.18 dari 100, mengindikasikan masih terdapat ruang perbaikan signifikan dalam aspek keamanan *website* pemerintah.

3.3. Simulasi dan Prediksi Performa HTTP/2

Mengingat belum ada *website* yang menggunakan HTTP/2, penelitian ini mengembangkan model simulasi untuk memprediksi peningkatan performa yang dapat dicapai setelah migrasi. Model simulasi dikembangkan berdasarkan faktor peningkatan dari literatur akademis dan industri, dengan faktor peningkatan dasar ditetapkan sebesar 35% berdasarkan rata-rata dari berbagai studi, kemudian disesuaikan untuk setiap *website* berdasarkan skor kompleksitas dengan batasan 20-50%.

Metrik	HTTP/1.1	HTTP/2	Improvement
LCP (ms)	13,625	9,633	-29.3%
FCP (ms)	4,334	3,063	-29.3%
TTI (ms)	16,728	11,827	-29.3%
Speed Index (ms)	9,244	6,534	-29.3%
Performa Score	61.05	70.32	+15.2%

Tabel 5. Prediksi Performa HTTP/1.1 vs HTTP/2



Gambar 3. Perbandingan Metrix Performa HTTP/1.1 vs HTTP/2

Hasil simulasi pada 91 *website* menunjukkan bahwa faktor peningkatan rata-rata adalah 29.3% dengan standar deviasi 4.0%, nilai minimum 20.5%, dan maksimum 43.3%. Seluruh *website* berada dalam rentang yang divalidasi literatur. Simulasi memprediksi LCP menurun dari 13,625 ms menjadi 9,633 ms (-29.3%), FCP dari 4,334 ms menjadi 3,065 ms (-29.3%), TTI dari 16,728 ms menjadi 11,826 ms (-29.3%), dan skor performa meningkat dari 61.05 menjadi 70.32 (+15.2%). Validasi statistik menggunakan uji-t berpasangan menunjukkan perbedaan signifikan ($p < 0.001$) dengan effect size medium (Cohen's $d = 0.432$).

Penting untuk ditekankan bahwa meskipun simulasi memprediksi peningkatan signifikan, hasil aktual dapat bervariasi bergantung pada kondisi implementasi spesifik. Model simulasi ini memiliki keterbatasan dan tidak dapat menggantikan pengujian empiris aktual. Bahkan setelah migrasi, nilai LCP prediksi (9,633 ms) masih sekitar empat kali lipat *threshold Google* (2,500 ms), mengindikasikan bahwa migrasi HTTP/2 saja tidak cukup untuk mencapai standar optimal dan perlu dikombinasikan dengan optimasi teknis lainnya.

3.4. Feature Engineering dan Target Variable

Proses rekayasa fitur menghasilkan 55 fitur dari 20 fitur awal, mencakup metrik performa, *security headers*, dan *derived features*. Analisis korelasi dan seleksi fitur menggunakan *mutual information* mengidentifikasi 12 fitur paling relevan untuk klasifikasi prioritas.

Framework multi-kriteria dikonstruksi mengintegrasikan empat dimensi: kesenjangan performa (40%), potensi peningkatan (30%), kesiapan keamanan (20%), dan kebutuhan modernisasi (10%). Klasifikasi prioritas ditentukan berdasarkan skor gabungan, menghasilkan distribusi: 7 *website* prioritas HIGH (7.7%), 26 *website* prioritas MEDIUM (28.6%), dan 58 *website* prioritas LOW (63.7%). Ketidakseimbangan kelas ini ditangani melalui stratified sampling dan class weighting dalam proses pelatihan model.

3.5. Performance Model Machine Learning

Dataset 91 *website* dibagi menggunakan pembagian latih-uji berstrata dengan proporsi 80:20, menghasilkan 72 data latih dan 19 data uji. Enam algoritma ensemble [15] dievaluasi: *Random Forest*, *XGBoost*, *LightGBM*, *AdaBoost*, *Gradient Boosting*, dan *ensemble Voting dan Stacking*.

Model	F1-Score	Accuracy	Precision	Recall
Random Forest	0.949	0.947	0.956	0.947
XGBoost	0.949	0.947	0.956	0.947
LightGBM	0.949	0.947	0.956	0.947
Voting Ensemble	0.949	0.947	0.956	0.947
Stacking Ensemble	0.949	0.947	0.956	0.947
Gradient Boosting	0.894	0.895	0.925	0.895

Tabel 6. Perbandingan Performa Model *Machine Learning*

Hasil evaluasi menunjukkan lima model mencapai performa identik dengan skor F1 sebesar 0.949 dan akurasi 0.947 pada data uji. *Random Forest* [15] dipilih sebagai model final berdasarkan pertimbangan interpretabilitas, efisiensi komputasi, dan *robustness*. Matriks konfusi menunjukkan total kesalahan hanya 1 dari 19 prediksi pada data uji, dengan akurasi 94.7%. *Classification report* menunjukkan kelas TINGGI dan RENDAH mencapai *precision* dan *recall* sempurna (100%), sementara kelas SEDANG mencapai *precision* 83% dan *recall* 100%. Validasi silang 5-fold menghasilkan skor rata-rata 0.841 dengan standar deviasi 0.075, menunjukkan stabilitas model.

Metrik	Predicted HIGH	Predicted LOW	Predicted MEDIUM
Actual HIGH	2	0	0
Actual LOW	0	11	1
Actual MEDIUM	0	0	5

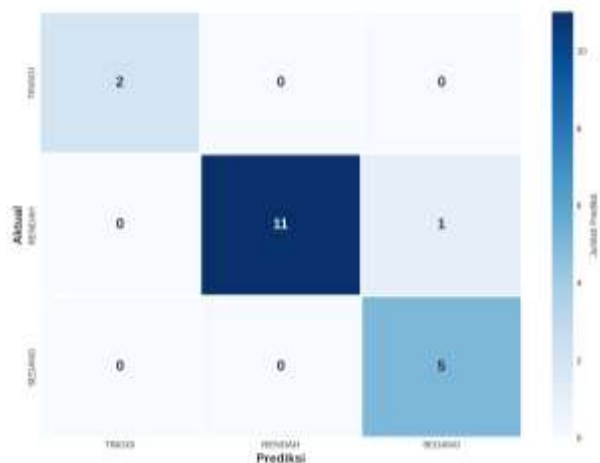
Tabel 7. Matrik Konfusi (*Confusion Matrix*) Model *Random Forest*

Rank	Feature	Importance	Interpretation
1	modernization_model	29.8%	Overall urgency composite
2	improvement_potential	12.5%	Expected HTTP/2 benefit
3	performace-score	12.0%	Current performance baseline
4	readiness_score	9.0%	Infrastructure readiness
5	lcp_improvement_ms	8.4%	Absolute time saving

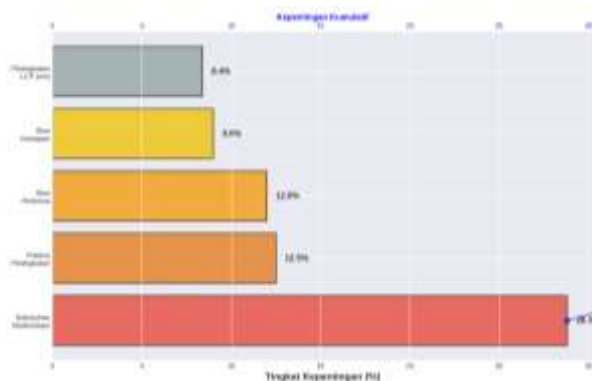
Tabel 8. Lima fitur terpenting dalam Klasifikasi Prioritas Migrasi

Analisis *feature importance* [14] menggunakan Gini *importance* mengidentifikasi lima fitur terpenting: *modernization_need* (28.8%), *improvement_potential* (12.5%), *performance_score* (12.0%), *readiness_score* (9.0%), dan *lcp_improvement_ms* (8.4%). Lima fitur teratas berkontribusi 70.7% dari total *importance*, mengindikasikan kebutuhan modernisasi dan potensi

peningkatan sebagai faktor utama dalam penentuan prioritas.



Gambar 4. Matriks Konfusi Model Random Forest



Gambar 5. Lima fitur terpenting dalam Klasifikasi Prioritas Migrasi

3.6. Hasil Prediksi dan Rekomendasi Prioritas Migrasi

Model *Random Forest* diterapkan pada seluruh 91 *website* menghasilkan distribusi prediksi: 8 *website* prioritas TINGGI (8.8%), 26 prioritas SEDANG (28.6%), dan 57 prioritas RENDAH (62.6%). Tingkat kesesuaian antara prediksi dan label training mencapai 97.8% (89 dari 91 *web site*), menunjukkan konsistensi model.

Tiga *website* prioritas tertinggi yang direkomendasikan untuk pilot program adalah: (1) dinkes.kepriprov.go.id dengan skor performa 19, *improvement potential* 42.7%, dan *confidence score* 85.9%; (2) diskominfo.bintankab.go.id dengan skor performa 37, *improvement potential* 43.3%, dan *confidence score* 84.6%; (3) rsudtpi.kepriprov.go.id/baru dengan skor performa 41, *improvement potential* 39.4%, dan *confidence score* 78.3%. Ketiga *website* ini merepresentasikan kombinasi optimal antara kebutuhan urgent untuk perbaikan dan potensi peningkatan yang tinggi.

3.7. Pembahasan

Hasil penelitian memberikan dasar berbasis bukti untuk kebijakan modernisasi *website* pemerintah. Temuan bahwa seluruh *website* masih menggunakan HTTP/1.1 dengan mayoritas memiliki performa di bawah standar mengindikasikan perlunya intervensi sistematis. *Framework* multi-kriteria yang dikembangkan memungkinkan prioritisasi yang objektif dan terukur, mengintegrasikan berbagai dimensi penting dalam keputusan migrasi.

Performa model machine learning yang *excellent* (*F1-score* 0.949) menunjukkan bahwa pendekatan berbasis data dapat menghasilkan klasifikasi prioritas yang *reliable*. Konvergensi performa dari lima algoritma ensemble [15] berbeda mengkonfirmasi robustness hasil klasifikasi. Rekomendasi untuk memulai dengan pilot program pada tiga *website* prioritas tertinggi memberikan pendekatan pragmatis yang meminimalkan risiko sambil membangun pembelajaran untuk implementasi skala penuh.

Keterbatasan utama penelitian adalah ketiadaan validasi empiris melalui implementasi HTTP/2 aktual. Meskipun model simulasi dikembangkan berdasarkan literatur tervalidasi, hasil aktual dapat bervariasi. Penelitian mendatang perlu melakukan *actual deployment* untuk membandingkan *predicted versus actual improvements*. Dataset yang relatif kecil dengan ketidakseimbangan kelas juga merupakan keterbatasan, meskipun telah dimitigasi melalui teknik sampling dan weighting yang tepat.

4. Kesimpulan

Penelitian ini mengembangkan kerangka kerja klasifikasi prioritas migrasi HTTP/2 untuk *website* pemerintah Kepulauan Riau dengan menggunakan simulasi berbasis literatur dan pembelajaran mesin. Hasil analisis terhadap 91 *website* pemerintah menunjukkan bahwa seluruh *website* masih menggunakan HTTP/1.1 dan memiliki metrik Core Web Vitals yang buruk. Simulasi memprediksi bahwa migrasi ke HTTP/2 dapat meningkatkan performa sebesar 29.3%, namun belum cukup untuk mencapai standar optimal. Kerangka kerja multi-kriteria menghasilkan klasifikasi prioritas dengan delapan *website* prioritas tinggi, 26 sedang, dan 57 rendah. Model *Random Forest* mencapai akurasi 94.7%, menunjukkan klasifikasi yang sangat baik.

Kontribusi teoretis penelitian ini adalah pengembangan metodologi baru yang menggabungkan simulasi dan pembelajaran mesin untuk evaluasi teknologi tanpa data empiris. Secara praktis, penelitian ini memberikan rekomendasi implementasi dengan mengidentifikasi tiga *website* prioritas tertinggi untuk pilot program. Pendekatan bertahap ini memungkinkan alokasi sumber daya yang efisien dan implementasi dalam waktu 12-18 bulan.

Keterbatasan penelitian termasuk penggunaan simulasi tanpa validasi HTTP/2 aktual, data yang dikumpulkan hanya pada satu titik waktu, serta cakupan geografis yang terbatas. Penelitian lebih lanjut perlu melibatkan validasi empiris, studi longitudinal, serta pengembangan framework yang mencakup metrik pengalaman pengguna dan dampak lingkungan.

Daftar Rujukan

- [1] O. Tsatsani, Z. Patergiannaki, and Y. Pollalis, "Unraveling the Dynamics of e-Government Digitization, Penetration and User Experience: A Case Study of Greek Municipalities."
- [2] K. Palacios-Zamora, J. Cordova-Moran, D. Mendoza-Cabrera, and S. Pacheco-Mendoza, "INTERNATIONAL JOURNAL ON INFORMATICS VISUALIZATION journal homepage: www.joiv.org/index.php/joiv INTERNATIONAL JOURNAL ON INFORMATICS VISUALIZATION Measurement on University *Web* site s: A Perspective of Effectiveness." [Online]. Available: www.joiv.org/index.php/joiv
- [3] D. Saif, C.-H. Lung, and A. Matrawy, "An Early Benchmark of Quality of Experience Between HTTP/2 and HTTP/3 using Lighthouse," Oct. 2020, doi: 10.1109/ICC42927.2021.9500258.
- [4] F. Liu, B. Farkiani, J. Dehart, J. Parwatarikar, and P. Crowley, "Performance Comparison of HTTP/3 and HTTP/2 with Proxy Integration," Aug. 2025, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2409.16267>
- [5] I. Armaini, M. H. Dar, and B. Bangun, "Evaluation of Labuhanbatu Regency Government *Website* based on Performance Variables," *Sinkron*, vol. 7, no. 2, pp. 760–766, May 2022, doi: 10.33395/sinkron.v7i2.11404.
- [6] C. Xilogianni, F. R. Doukas, I. C. Drivas, and D. Kouis, "Speed Matters: What to Prioritize in Optimization for Faster *Web* sites," *Analytics*, vol. 1, no. 2, pp. 175–192, Dec. 2022, doi: 10.3390/analytics1020012.
- [7] R. Wagola, A. Nurmandi, and D. Subekti, "Government Digital Transformation in Indonesia."
- [8] N. Wehner, M. Seufert, R. Schatz, and T. Hofffeld, "Do you agree? Contrasting *Google's* Core *Web* Vitals and the impact of cookie consent banners with actual *web* QoE," *Qual User Exp*, vol. 8, no. 1, Dec. 2023, doi: 10.1007/s41233-023-00058-3.
- [9] A. David et al., "Understanding Local Government Digital Technology Adoption Strategies: A PRISMA Review," Jun. 01, 2023, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), doi: 10.3390/su15129645.
- [10] D. Rohmaniah, W. Miftahul Ashari, and A. Dwi Putra, "Enhancing *Website* Security Using Vulnerability Assessment and Penetration Testing (VAPT) Based on OWASP Top Ten," 2025. [Online]. Available: <http://jurnal.polibatam.ac.id/index.php/JAIC>
- [11] A. Ilmi, H. B. Seta, I. Wayan, and W. Pradnyana, "Evaluasi Risiko Celah Keamanan Menggunakan Metodologi Open-Source Security Testing Methodology Manual (OSSTMM) Pada Aplikasi *Web* Terbaru Fakultas Ilmu Komputer UPN Veteran Jakarta", [Online]. Available: <http://new-fik.upnvj.ac.id>
- [12] J. Xiao, Z. Xu, A. Xiao, X. Wang, and M. Skare, "Overcoming barriers and seizing opportunities in the innovative adoption of next-generation digital technologies," *Journal of Innovation and Knowledge*, vol. 9, no. 4, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.jik.2024.100622.
- [13] F. Junior Wangsa, S. Informasi, and S. Kharisma Makassar, "OPTIMASI *WEBSITE* TOKO KERJA MENGGUNAKAN UJI PERFORMA *GOOGLE* PAGESPEED INSIGHTS", [Online]. Available: <https://tech.kharisma.ac.id>
- [14] R. M. Haris, K. M. Khan, A. Nhlabatsi, and M. Barhamgi, "A Machine Learning-based Optimization Approach for Pre-copy Live Virtual Machine Migration," Feb. 07, 2023. doi: 10.21203/rs.3.rs-2550741/v1.
- [15] Sindhu, "Stacking Ensemble Learning: Combining XGBoost, LightGBM, CatBoost, and AdaBoost with Random Forest Meta Model," Oct. 30, 2025. doi: 10.21203/rs.3.rs-7944070/v1.
- [16] I. I. A. Nadhiroh, M. Z. Sarwani, and M. Udin, "Mendeteksi Emosi Berdasarkan Postingan Sosial Media X Menggunakan Algoritma Long Short-Term Memory," *Techno.Com*, vol. 24, no. 3, pp. 745–755, Aug. 2025, doi: 10.62411/tc.v24i3.13509.
- [17] Y. H. Chang et al., "Machine learning-based triage to identify low-severity patients with a short discharge length of stay in emergency department," *BMC Emerg Med*, vol. 22, no. 1, Dec. 2022, doi: 10.1186/s12873-022-00632-6.
- [18] M. A. Kabir, F. Ahmed, M. M. Islam, and Md. R. Ahmed, "Python For Data Analytics: A Systematic Literature Review Of Tools, Techniques, And Applications," *ACADEMIC JOURNAL ON SCIENCE, TECHNOLOGY, ENGINEERING & MATHEMATICS EDUCATION*, vol. 4, no. 04, pp. 134–154, Nov. 2024, doi: 10.69593/ajsteme.v4i04.146.