

**KLASIFIKASI KELAYAKAN SEPEDA LOMBA TRIATHLON
MENGUNAKAN ARSITEKTUR *YOU LOOK ONLY ONCE* (YOLOv11)
BERBASIS DATA CITRA SEPEDA**

**Azry Ayu Nabillah¹, Yudha Hamdi Arzi², Radhinka Bagaskara³, Leslie
Anggraini⁴, Sikah Nubuahtul Ilmi⁵, Ahmad Zain Mahmud⁶, Mohammad
Hisyam Alif Setiawan⁷, Dito Aditya Sasongko⁸, Rian Kosasih⁹**

Institut Teknologi Sumatera^{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9}

azry.nabillah@ro.itera.ac.id¹

ABSTRAK

Penelitian ini menetapkan kerangka klasifikasi kelayakan sepeda triathlon yang didasarkan pada YOLOv11 dan YOLOv11-OBB, yang merujuk pada Peraturan Kompetisi Triathlon Dunia 2025, sebagai solusi untuk ketidakefisienan dan subjektivitas yang melekat dalam penilaian manual. Metodologi yang digunakan adalah Penelitian dan Pengembangan (R&D), yang mencakup pelatihan algoritma pembelajaran mendalam menggunakan 427 gambar tampilan samping dan 100 gambar tampilan atas, di samping evaluasi keakuratan pengukuran geometris di lima jenis sepeda yang berbeda. Temuan menunjukkan bahwa model mencapai akurasi klasifikasi visual 100% seperti yang ditentukan oleh Matriks Kebingungan dan mampu menghasilkan pengukuran dimensi makro dan penempatan komponen dengan margin kesalahan rata-rata 1,5-3,3 cm. Namun, pengukuran sudut stang tetap rentan terhadap distorsi perspektif, menghasilkan kesalahan rata-rata 5,21°. Simpulan, sistem ini layak dipertimbangkan sebagai instrumen penyaringan awal yang efektif dalam proses inspeksi sepeda, meskipun dengan peringatan bahwa validasi manual masih diperlukan dalam kasus mendekati ambang batas peraturan. **Kata Kunci:** *Computer Vision, Oriented Bounding Box, Regulasi Sepeda, Triathlon Bike Check, YOLOv11*

ABSTRACT

The study established a triathlon bicycle eligibility classification framework based on YoloV11 and YoloV11-OBB, informed by the World Triathlon Competition Regulations 2025, as a solution for the ineffectiveness and subjectivity inherent in manual assessment. The methodology used is Research and Development (R&D), which includes training of deep learning algorithms using 427 side view images and 100 top view images, in addition to evaluating the accuracy of geometric measurements across five different types of bicycles. Findings showed that the model achieved 100% visual classification accuracy as determined by the Confusion Matrix and was able to produce measurements of macro dimensions and component placement with an average margin of error of 1.5-3.3 cm. However, handlebar angle measurements remain prone to perspective distortion, resulting in an average error of 5.21°. In conclusion, the system deserves to be considered as an effective initial screening instrument in the bicycle inspection process, although with the caveat that manual validation is still necessary in cases approaching the regulatory threshold.

Keywords: *Computer Vision, Oriented Bounding Box, Bicycle Regulations, Triathlon Bike Check, YOLOv11*

PENDAHULUAN

Triathlon merupakan olahraga ketahanan multidisiplin yang menggabungkan renang, bersepeda, dan lari secara berurutan, serta diresmikan sebagai cabang Olimpiade pada tahun 2000 (Triathlon, 2022). Olahraga ini memiliki berbagai variasi jarak lomba mulai dari sprint hingga Ironman, yang masing-masing menuntut kapasitas fisiologis dan strategi khusus dari para atlet (García-Giménez, 2024). Triathlon juga memberikan manfaat kesehatan yang signifikan, sehingga semakin populer di berbagai kalangan (Zajkowska et al., 2024).

Seiring meningkatnya partisipasi atlet, pemeriksaan kelayakan sepeda atau *bike check* menjadi prosedur penting yang harus dilalui oleh seluruh peserta sebelum bertanding. Pemeriksaan ini bertujuan memastikan keselamatan atlet, kepatuhan terhadap regulasi, dan menjaga keadilan kompetisi (Andersen, 2013). Akan tetapi, metode pemeriksaan manual yang dilakukan oleh *technical official* memiliki banyak keterbatasan. Variasi subjektivitas antar-inspektur dapat mencapai 40% untuk kasus yang sama (Triathlon, 2022). Selain itu, rata-rata waktu pemeriksaan mencapai 25 menit per sepeda, sehingga menimbulkan antrean panjang dan berpotensi mengganggu jalannya perlombaan (Triathlon, 2022). Data *International Triathlon Union* (ITU) bahkan menunjukkan bahwa 23% kasus diskualifikasi pada event besar 2022–2023 disebabkan oleh ketidakpatuhan teknis sepeda yang seharusnya dapat terdeteksi sejak proses *bike check* (Wu et al., 2023).

Perkembangan teknologi *artificial intelligence* (AI) dan *computer vision* membuka peluang untuk mengatasi keterbatasan tersebut. Teknologi ini memungkinkan deteksi objek secara *real-time* dengan akurasi tinggi (Pisaniello, 2024). Pada penelitian lain, algoritma *multi-view stereo* berhasil mencapai akurasi 99,1% dalam mengukur geometri sepeda (Wu et al., 2023). Akan tetapi, hingga saat ini belum tersedia sistem yang dirancang khusus untuk mendukung pemeriksaan sepeda dalam olahraga triathlon (Li et al., 2022).

Mengatasi hal tersebut, penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem klasifikasi kelayakan sepeda berbasis YOLOv11 yang mengacu pada standar *World Triathlon Competition Rules 2025* (World Triathlon, 2025). Sistem ini diharapkan dapat meningkatkan efisiensi waktu pemeriksaan, mengurangi subjektivitas, serta meningkatkan akurasi hasil *bike check*. Selain itu, pendekatan ini ditargetkan dapat menekan subjektivitas penilaian dan memberikan hasil inspeksi yang lebih akurat serta konsisten.

Penelitian ini menawarkan kebaruan berupa pengembangan sistem otomatis berbasis YOLOv11 yang secara khusus dirancang untuk mendeteksi dan mengklasifikasikan kelayakan sepeda triathlon sesuai dengan standar *World Triathlon Competition Rules 2025*. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang berfokus pada pengukuran geometri sepeda secara umum, sistem yang dikembangkan dalam penelitian ini mengintegrasikan deteksi visual berbasis *computer vision* dengan kebutuhan inspeksi teknis dalam konteks kompetisi olahraga. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya berkontribusi pada pengembangan metode deteksi objek, tetapi juga menghadirkan solusi praktis untuk meningkatkan efisiensi dan objektivitas proses *bike check* dalam triathlon.

KAJIAN TEORI

Penerapan *Artificial Intelligence* (AI) telah menunjukkan tren transformatif dalam berbagai bidang olahraga, terutama untuk analisis performa dan strategi (Pisaniello, 2024). Pada ranah pemrosesan visual, *Computer Vision* (CV) berperan sebagai disiplin yang berfokus pada kemampuan sistem komputer untuk mengekstraksi, memahami, dan menginterpretasikan informasi dari citra, sehingga memungkinkan deteksi objek secara akurat dan *real-time*. Kemajuan CV dalam satu dekade terakhir banyak dipacu oleh perkembangan metode *deep learning*, yang meningkatkan kemampuan sistem dalam mengenali objek teknis dengan presisi tinggi. Salah satu metode *deep learning* yang unggul dalam efisiensi pemrosesan visual adalah arsitektur *You Only Look Once* (YOLO) yang mengadopsi mekanisme deteksi satu tahap dan memprediksi bounding box serta probabilitas kelas secara simultan (Redmon et al., 2016).

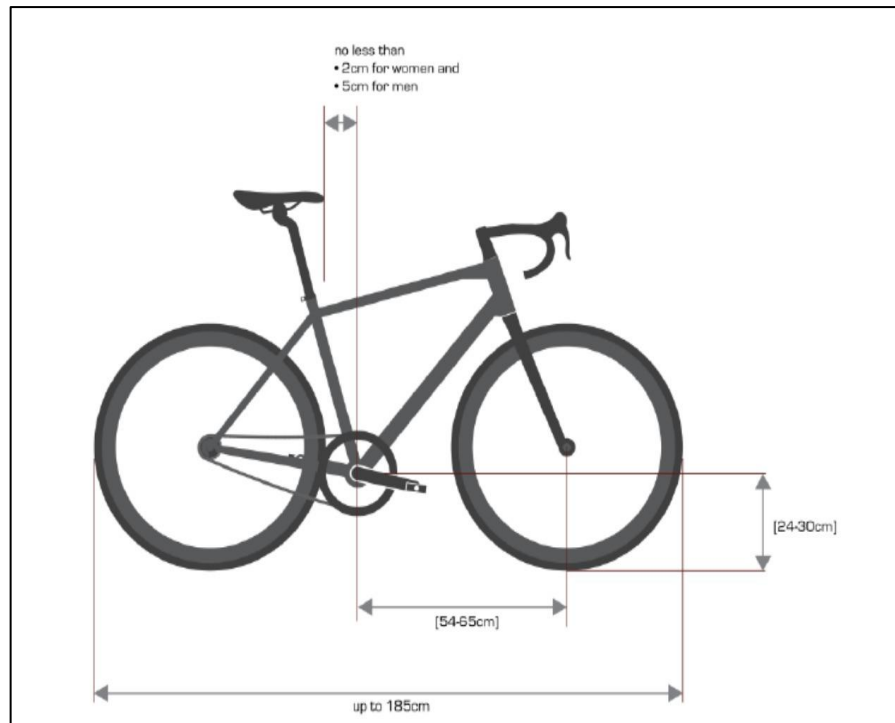
Arsitektur YOLO telah mengalami perkembangan berkelanjutan hingga mencapai iterasi YOLOv11 yang digunakan dalam penelitian ini. Versi terbaru ini menawarkan struktur yang lebih efisien dengan mekanisme *head* yang lebih adaptif dibandingkan generasi sebelumnya. Namun, tantangan dalam deteksi geometri sepeda muncul dari bentuk komponen yang sering berada pada orientasi diagonal atau miring, seperti tube rangka dan bagian setang. Penggunaan kotak deteksi (*bounding box*) konvensional yang tegak lurus (*Axis-Aligned Bounding Box*) cenderung menangkap area latar belakang tambahan, sehingga mengurangi presisi pengukuran. Varian YOLO *Oriented Bounding Box* (OBB) diterapkan untuk mengatasi permasalahan tersebut melalui penambahan parameter sudut rotasi pada prediksi. Pendekatan ini memungkinkan kotak deteksi mengikuti orientasi asli komponen, yang sangat penting untuk analisis geometri teknis secara lebih akurat.

Relevansi penggunaan teknologi *Computer Vision* untuk tugas pengukuran geometri sepeda telah dibuktikan melalui penelitian sebelumnya yang menunjukkan akurasi tinggi pada pemodelan komponen teknis (Wu et al., 2023). Sistem klasifikasi yang dikembangkan pada penelitian ini mengandalkan standar regulasi peralatan sebagai acuan utama dalam proses evaluasi. Regulasi ini diberlakukan secara ketat untuk menjamin keadilan dan keselamatan dalam kompetisi. Standar tersebut diberlakukan secara ketat untuk menjaga aspek keselamatan dan keadilan kompetisi. Klasifikasi kelayakan sepeda dengan demikian tidak dapat dilakukan secara bebas (*arbitrer*), melainkan harus mengikuti ketentuan resmi pada dokumen *World Triathlon Competition Rules 2025* (World Triathlon, 2025).

Dokumen tersebut menetapkan berbagai parameter kuantitatif dan kualitatif yang spesifik, seperti dimensi maksimal sepeda, jarak antar komponen, hingga kemiringan handlebar. Walaupun teknologi CV terbukti akurat untuk melakukan pengukuran (Wu et al., 2023) dan standar regulasi telah mapan (World Triathlon, 2025), peninjauan *state-of-the-art* menunjukkan bahwa belum ada sistem terintegrasi yang dirancang khusus untuk otomatisasi proses *bike check triathlon*. Sistem berbasis YOLOv11 dan YOLOv11-OBB ini dikembangkan untuk mengisi kesenjangan tersebut, dengan mengaplikasikan standar regulasi resmi sebagai dasar klasifikasi otomatis.

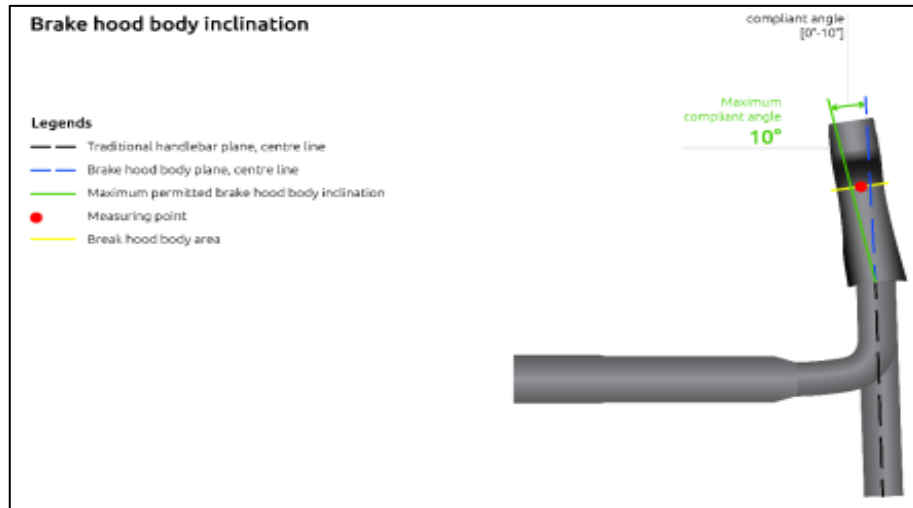
Sebagai dasar klasifikasi tersebut, penelitian ini mengacu secara langsung pada ketentuan teknis dalam *World Triathlon Competition Rules 2025* (World Triathlon, 2025). Regulasi tersebut menetapkan batasan-batasan kuantitatif

terhadap geometri sepeda, seperti panjang maksimal sepeda, rentang jarak antara bottom bracket dan axle roda depan, serta tinggi bottom bracket dari permukaan tanah. Selain itu, regulasi juga mengatur posisi saddle berdasarkan kategori gender dan menetapkan batas kemiringan brake hood pada handlebar, yaitu maksimal 10° . Parameter-parameter ini kemudian digunakan oleh sistem Computer Vision sebagai acuan numerik dalam proses validasi otomatis geometri sepeda. Regulasi dimensi sepeda dan posisi saddle menurut *World Triathlon Competition Rules 2025* dapat dilihat pada Gambar 1 berikut.



Gambar 1. Regulasi dimensi sepeda dan posisi saddle menurut *World Triathlon Competition Rules 2025*

Pada bagian setang (*handlebar area*), aturan menetapkan penggunaan drop handlebar untuk kategori draft-legal serta membatasi konfigurasi kontrol rem, termasuk kemiringan *brake hood* yang tidak boleh melebihi 10° . Ketentuan ini penting karena banyak pelanggaran regulasi terjadi pada komponen bagian depan sepeda yang sulit dinilai secara visual oleh pemeriksa manusia. Integrasi regulasi ini dalam sistem berbasis YOLOv11 dan YOLOv11-OBb memungkinkan proses verifikasi menjadi lebih objektif dan konsisten, sekaligus menegaskan relevansi pendekatan berbasis *Computer Vision* dalam melakukan *bike check* secara otomatis. Regulasi Handlebar & Brake Hood 10° dapat dilihat pada Gambar 2 berikut.



Gambar 2. Regulasi Handlebar & Brake Hood 10°

Pada area setang (*handlebar area*), regulasi mensyaratkan penggunaan *drop handlebar* untuk kategori draft-legal serta membatasi konfigurasi sistem pengereman, termasuk penetapan batas kemiringan *brake hood* yang tidak boleh melampaui 10° (World Triathlon, 2025). Ketentuan ini signifikan karena sebagian besar pelanggaran regulasi ditemukan pada komponen bagian depan sepeda, yang secara visual sering sulit dievaluasi secara akurat oleh pemeriksa manusia. Dengan mengintegrasikan ketentuan tersebut ke dalam model YOLOv11 dan YOLOv11-OBB, proses verifikasi dapat dilaksanakan secara lebih objektif, konsisten, dan terstandar, sehingga semakin menegaskan relevansi pendekatan *Computer Vision* dalam otomasi pemeriksaan kelayakan sepeda pada kompetisi triathlon.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan penelitian dan pengembangan (*Research and Development*) berdasarkan model Borg dan Gall yang terdiri dari sepuluh tahapan berurutan (Gall et al., 2007). Tahapan awal mencakup studi pendahuluan melalui kajian literatur terkait regulasi triathlon dan perkembangan teknologi AI dalam olahraga. Tahapan ini juga meliputi observasi lapangan dan wawancara dengan *National Technical Officer* (NTO) serta pelatih triathlon untuk memperoleh kebutuhan teknis yang relevan terhadap prosedur *bike check*. Informasi tersebut menjadi dasar perumusan tujuan sistem dan spesifikasi fungsional model deteksi komponen sepeda.

Pengumpulan dataset dilakukan dengan menghimpun citra sepeda road bike dari berbagai sumber yang mencakup dokumentasi lapangan dan dataset publik. Total 427 citra digunakan untuk model deteksi tampak samping dan 100 citra digunakan untuk model deteksi tampak atas yang berfokus pada handlebar. Setiap citra diambil dari sudut samping atau atas untuk memperoleh struktur geometris utama yang dibutuhkan dalam proses pengukuran komponen sepeda. Variasi sudut, latar, dan jenis sepeda dikumpulkan untuk meningkatkan generalisasi model yang dikembangkan.

Tahapan pra-pemrosesan dilakukan terhadap seluruh dataset untuk memastikan format data seragam dan kompatibel dengan YOLOv11. Citra samping dianotasi menggunakan empat kelas komponen, yaitu saddle, crank, r_tire, dan

f_tire, kemudian dibagi ke dalam dataset pelatihan dengan proporsi 80% untuk train dan 20% untuk validation sesuai konfigurasi pada berkas YAML. Dataset citra atas melalui proses konversi polygon ke *oriented bounding box* (OBB) menggunakan transformasi PCA, dan anotasi disesuaikan ke dalam dua kelas, yaitu bar dan brake. Dataset OBB dibagi dengan rasio yang sama (80% train dan 20% val) dan menghasilkan 100 gambar pelatihan dengan 398 OBB serta 26 gambar validasi dengan 104 OBB.

Proses pelatihan model YOLOv11 untuk citra samping dilakukan menggunakan model pre-trained yolo11l-seg.pt dengan konfigurasi epoch sebanyak 100, ukuran citra 960 piksel, dan batch size sebesar 8. Pelatihan dilaksanakan secara deterministik untuk menjaga konsistensi hasil dan menggunakan berbagai augmentasi seperti mosaic, flip, dan hsv transform untuk meningkatkan keragaman data. Parameter pelatihan disesuaikan menggunakan learning rate awal 0,01, weight decay sebesar 0,0005, serta mekanisme warmup selama tiga epoch untuk stabilisasi gradien. Seluruh proses pelatihan dijalankan pada perangkat lokal dengan GPU yang mendukung pengolahan paralel.

Pelatihan model YOLOv11-OBB difokuskan pada deteksi orientasi handlebar dan tuas rem melalui model pre-trained yolo11m-obb.pt. Konfigurasi pelatihan mencakup 100 epoch, ukuran citra 960 piksel, batch size 8, serta mekanisme cosine learning rate schedule dengan nilai awal 0,001. Proses pelatihan dilengkapi dengan augmentasi khusus seperti mixup, copy-paste, shear transform, dan perspective shift untuk mengoptimalkan ketahanan model terhadap variasi sudut handlebar. Parameter patience sebesar 25 digunakan untuk menghentikan pelatihan lebih awal apabila tidak terjadi peningkatan kinerja. Pelatihan model OBB dijalankan pada Google Colab dengan GPU T4 untuk memastikan pengolahan berjalan efisien.

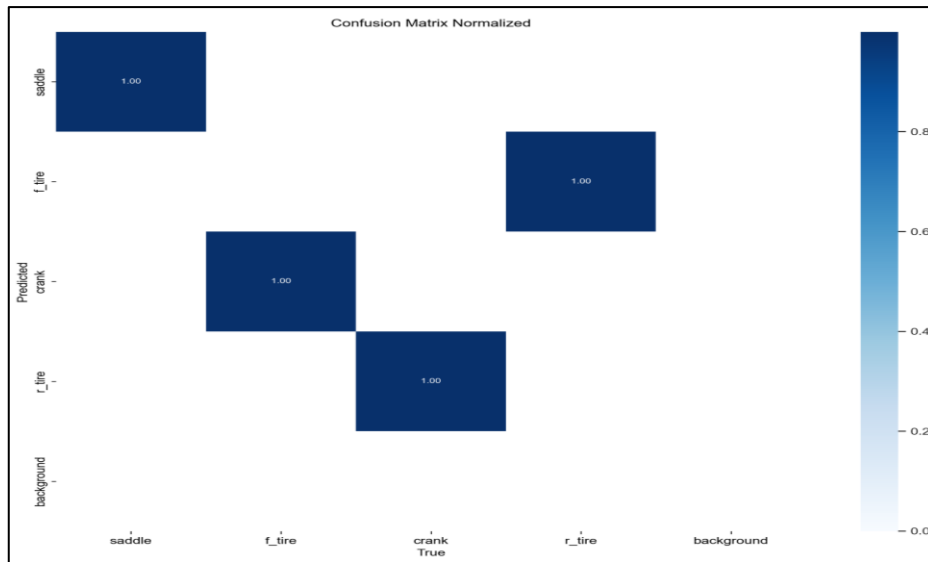
Evaluasi model dilakukan menggunakan dataset validasi yang telah dipisahkan sejak awal untuk memastikan penilaian objektif. Model YOLOv11 dievaluasi melalui confusion matrix untuk memperoleh nilai akurasi, presisi, recall, dan F1-score sesuai metodologi evaluasi deteksi objek. Model OBB dievaluasi berdasarkan konsistensi orientasi kotak deteksi dan kesesuaian bentuk hasil prediksi terhadap struktur handlebar. Seluruh keluaran model digunakan sebagai dasar perhitungan parameter geometri sepeda dan dipetakan terhadap aturan *World Triathlon Competition Rules 2025* untuk menghasilkan klasifikasi kelayakan.

Uji coba lapangan dilaksanakan bersama komunitas road bike yang memiliki karakteristik sepeda serta praktik teknis yang sepadan dengan kebutuhan bike check triathlon. Uji coba ini menilai kecepatan pemrosesan, akurasi deteksi komponen, serta kecocokan hasil klasifikasi terhadap pengukuran manual. Umpan balik dari pengguna dan pemerhati sepeda dikumpulkan untuk menilai aspek kegunaan dan kepraktisan penerapan sistem di kondisi nyata. Tahap finalisasi dilakukan dengan mengintegrasikan hasil evaluasi teknis dan uji lapangan guna menghasilkan sistem klasifikasi kelayakan sepeda yang lebih stabil, objektif, dan siap dikembangkan pada tahap implementasi lanjutan.

HASIL PENELITIAN

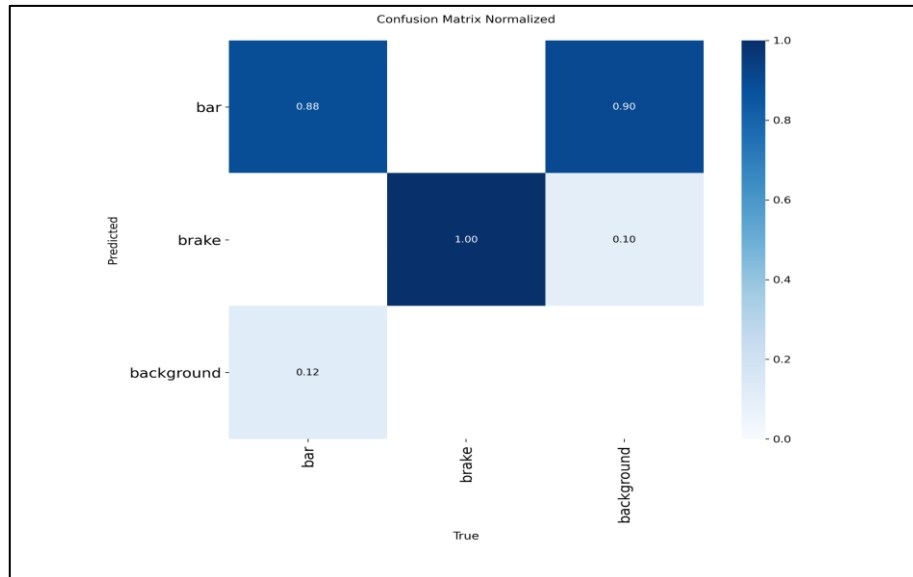
Evaluasi performa model YOLOv11 dilakukan melalui analisis kuantitatif berbasis training logs dan visualisasi performa menggunakan *confusion matrix*. Riwayat pelatihan menunjukkan terjadinya penurunan *loss* yang konsisten hingga

epoch ke-100, sedangkan *validation loss* mencapai titik konvergensi sekitar 0.17. Stabilitas nilai kerugian menunjukkan bahwa model berhasil mempelajari representasi fitur komponen sepeda dengan baik meskipun dataset relatif terbatas. Hasil klasifikasi komponen sepeda pada citra tampak samping ditunjukkan pada Gambar 3, yang menggambarkan bahwa model mampu mengenali empat kelas utama (*saddle*, *crank*, *f_tire*, *r_tire*) dengan akurasi sempurna tanpa terjadi pertukaran label (Establish a Dynamic, 2022). Confusion Matrix Normalized YOLOv11 (Tampilan Samping) dapat dilihat pada Gambar 3 berikut.



Gambar 3. Confusion Matrix Normalized YOLOv11 (Tampilan Samping)

Evaluasi lanjutan menggunakan YOLOv11-OBB pada citra tampak atas disajikan pada Gambar 4. Matriks tersebut menunjukkan bahwa kelas brake berhasil terdeteksi dengan akurasi sempurna (1.00), sedangkan kelas bar mencapai akurasi 0.88 dengan sebagian kecil prediksi yang bergeser ke background. Pola ini wajar pada objek tipis dan bercabang seperti handlebar, yang memiliki kontur lebih kompleks dibandingkan komponen pada tampilan samping. Tidak ditemukannya misclassification antara bar dan brake memperkuat bahwa model mampu menangkap orientasi dan struktur handlebar dengan konsisten, sehingga dapat mendukung pengukuran sudut stang pada tahap analisis geometri (Ryu et al., 2024). Confusion Matrix Normalized YOLOv11-OBB (Tampilan Atas – Handlebar & Brake) dapat dilihat pada Gambar 4 berikut.



Gambar 4. Confusion Matrix Normalized YOLOv11-OB (Tampilan Atas – Handlebar & Brake)

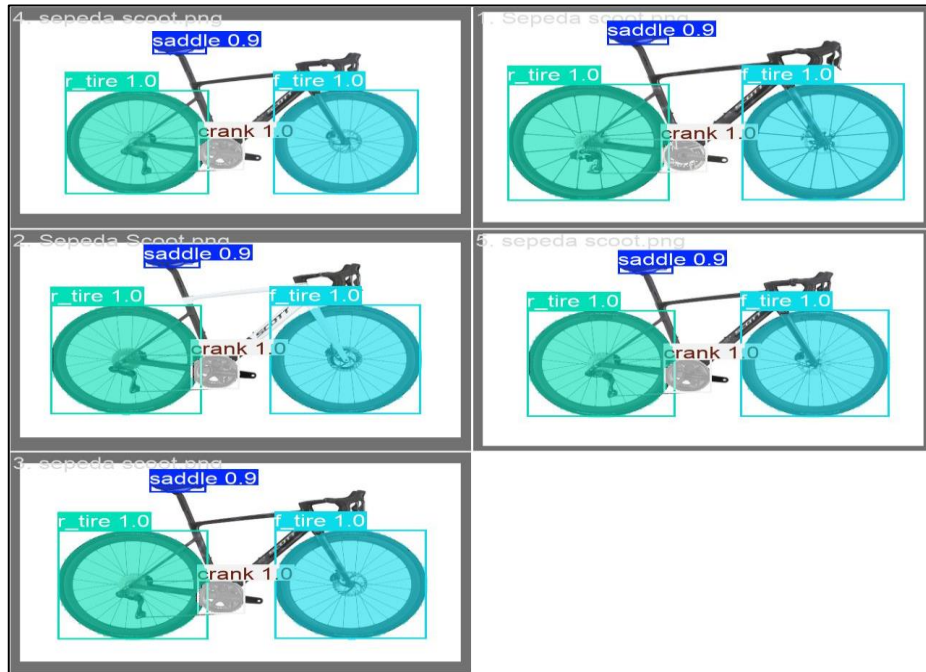
Ringkasan performa deteksi model YOLOv11 dalam bentuk metrik kuantitatif disajikan pada Tabel 1. Nilai precision sebesar 0.78 menunjukkan bahwa sebagian besar prediksi positif bersifat benar, sementara recall sebesar 0.50 mencerminkan kecenderungan model menahan prediksi untuk mengurangi false positive. Metrik mAP@50 berada pada rentang 0.37–0.50, yang menunjukkan kemampuan lokalisasi yang memadai untuk kebutuhan pengukuran geometris. Nilai validation box loss sebesar 0.172 menunjukkan bahwa model mampu menghasilkan kotak prediksi yang tepat pada lokasi objek. Performa Deteksi Model YOLOv11 (Epoch 100) dapat dilihat pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Performa Deteksi Model YOLOv11 (Epoch 100)

Metrik Evaluasi	Nilai Rata-rata	Keterangan
Precision	0.78	Model sangat akurat saat memprediksi positif (sedikit false positive).
Recall	0.50	Model mampu menemukan kembali objek yang relevan dengan stabil.
mAP@50	0.37 - 0.50	Akurasi rata-rata pada threshold IoU 0.50 cukup memadai untuk lokalisasi.
Box loss (Val)	0.172	Tingkat kesalahan posisi kotak prediksi sangat rendah.

Validasi kualitatif dilakukan untuk memastikan kesesuaian antara metrik kuantitatif dan performa nyata pada citra. Hasil visualisasi pada Gambar 5 menunjukkan bahwa model mampu menghasilkan bounding box yang presisi pada

area ban depan, ban belakang, sadel, dan *crankset*. Ketepatan lokalisasi ini penting karena koordinat objek menjadi dasar konversi ke satuan metrik pada tahap pengukuran dimensi sepeda. Konsistensi visual ini sejalan dengan hasil confusion matrix dan metrik evaluasi sehingga menunjukkan bahwa model layak digunakan pada tahap analisis berikutnya. Visualisasi hasil deteksi YOLOv11 pada tampilan samping sepeda dapat dilihat pada Gambar 5 berikut.

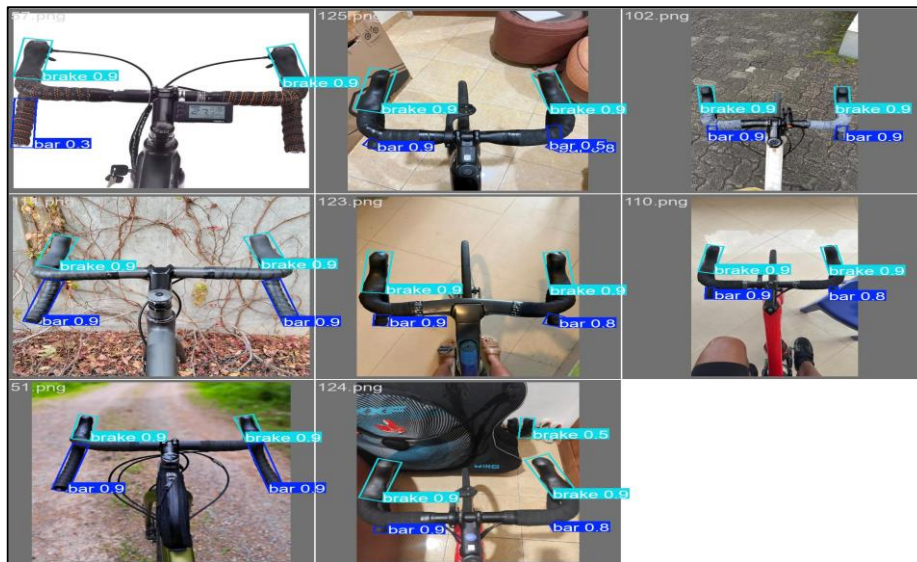


Gambar 5. Visualisasi hasil deteksi YOLOv11 pada tampilan samping sepeda

Visualisasi pada Gambar 5 merupakan keluaran train batch yang dihasilkan selama proses pelatihan model YOLOv11. Visualisasi ini digunakan untuk memantau apakah model telah mampu mengenali pola awal pada komponen sepeda seperti ban depan, ban belakang, sadel, dan crankset. Kotak prediksi yang terbentuk menunjukkan bahwa model mulai mengidentifikasi posisi objek secara konsisten, bahkan ketika data mengalami augmentasi warna, skala, dan rotasi. Informasi ini penting untuk memastikan bahwa proses pembelajaran berlangsung dengan benar sebelum dilakukan evaluasi akhir pada dataset validasi. Kinerja deteksi yang stabil pada train batch ini mendukung temuan kuantitatif bahwa model mencapai akurasi klasifikasi yang baik setelah pelatihan selesai.

Gambar 6 menampilkan keluaran train batch dari model YOLOv11-OBB yang digunakan untuk mendeteksi orientasi komponen handlebar. Visualisasi tersebut menunjukkan bahwa model berhasil membentuk kotak berorientasi (OBB) pada komponen bar dan brake, meskipun citra mengalami augmentasi seperti perubahan sudut atau pencahayaan. Konsistensi bentuk OBB menandakan bahwa model mampu memahami arah dan orientasi geometri handlebar sejak tahap pelatihan awal. Informasi orientasi yang stabil ini menjadi dasar penting sebelum model diuji pada citra validasi yang lebih kompleks (Gohar et al., 2024). Hasil visualisasi train batch memperlihatkan bahwa proses pelatihan berjalan sesuai harapan dan bahwa model mampu menangkap karakteristik utama komponen stang secara efektif.

Visualisasi hasil deteksi YOLOv11-OBb pada tampilan atas (*bar dan brake*) dapat dilihat pada Gambar 6 berikut.



Gambar 6. Visualisasi hasil deteksi YOLOv11-OBb pada tampilan atas (*bar dan brake*)

Evaluasi akurasi pengukuran geometri dilakukan pada lima sampel sepeda triathlon untuk menilai stabilitas performa sistem pada variasi desain rangka. Hasil pengujian dibagi ke dalam dua kategori, yaitu dimensi makro dan dimensi detail, yang masing-masing disajikan pada Tabel 2 dan Tabel 3. Dimensi makro mencakup panjang total sepeda, diameter ban depan, serta tinggi crank terhadap permukaan tanah, sedangkan dimensi detail mencakup jarak horizontal antar komponen serta sudut handlebar. Struktur pengelompokan ini memudahkan analisis generalisasi sistem terhadap perbedaan geometri sepeda yang digunakan atlet triathlon. Perbandingan Hasil Ukur Dimensi Geometri Utama dapat dilihat pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2.
Perbandingan Hasil Ukur Dimensi Geometri Utama (Satuan: cm)

Sampel Sepeda	Pjg Total (Sistem)	Pjg Total (Asli)	Selisih	Dia. Ban (Sistem)	Dia. Ban (Asli)	Selisih	T. Crank (Sistem)	T. Crank (Asli)	Selisih
Bike 1 (Cannondale)	172.3	167.0	5.3	70.11	68.5	1.61	28.35	26.8	1.55
Bike 2 (Cervelo)	172.58	166.0	6.58	70.35	68.9	1.45	23.94	27.0	3.06
Bike 3 (Giant)	172.59	167.7	4.89	69.54	67.8	1.74	28.35	26.9	1.45
Bike 4 (Trek)	172.6	166.0	6.6	69.2	68.0	1.2	28.3	27.5	0.8
Bike 5 (Polygon)	166.2	168.0	1.8	67.5	69.0	1.5	24.7	26.5	1.8
Rata-rata			5.03			1.5			1.73

Error (MAE)

Perbandingan Hasil Ukur Posisi Komponen dan Sudut dapat dilihat pada Tabel 3 berikut.

Tabel 3.
Perbandingan Hasil Ukur Posisi Komponen dan Sudut

Sampel Sepeda	Crank-Front (Sistem)	Crank-Front (Asli)	Selisih	Saddle-Front (Sistem)	Saddle-Front (Asli)	Selisih	Sudut Stang (Sistem)	Sudut Stang (Asli)	Error (°)
Bike 1 (Cannondale)	89.1	91.7	2.6	1.16	3.2	2.04	16.75°	24.5°	7.75°
Bike 2 (Cervelo)	88.4	91.0	2.6	2.43	3.6	1.17	6.65°	10.0°	3.35°
Bike 3 (Giant)	89.7	92.2	2.5	5.9	7.7	1.8	19.90°	12.0°	7.90°
Bike 4 (Trek)	61.2	58.5	2.7	3.36	5.0	1.64	23.30°	20.0°	3.30°
Bike 5 (Polygon)	57.1	59.5	2.4	4.0	2.0	2.0	3.75°	0.0°	3.75°
Rata-rata Error			2.56			1.73			5.21°

Hasil pengukuran pada Tabel 2 menunjukkan bahwa model mampu mempertahankan akurasi yang stabil dalam estimasi dimensi makro sepeda, dengan nilai *mean absolute error* (MAE) sebesar 5,03 cm pada panjang total dan 1,50 cm pada diameter ban. Nilai kesalahan tersebut mengindikasikan bahwa sistem dapat merekonstruksi proporsi utama rangka secara konsisten meskipun terdapat variasi geometri antar sampel. Sementara itu, Tabel 3 menampilkan kinerja model pada dimensi detail, di mana deviasi pengukuran *Crank-ke-Depan* dan *Saddle-ke-Depan* masing-masing mencapai MAE sebesar 2,56 cm dan 1,73 cm. Performa yang relatif stabil pada kedua kategori pengukuran menggambarkan bahwa model memiliki kemampuan adaptasi terhadap berbagai konfigurasi rangka tanpa ketergantungan pada jenis atau merek sepeda tertentu. Temuan ini menunjukkan bahwa pendekatan yang digunakan memiliki potensi yang kuat untuk diterapkan dalam pengujian kelayakan dimensi pada sepeda triathlon secara komputasional.

PEMBAHASAN

Efektivitas Deteksi dan Analisis Stabilitas Pelatihan Hasil penelitian menunjukkan bahwa arsitektur YOLOv11 sangat andal dalam mendeteksi batas luar objek geometri sepeda, dibuktikan dengan kemampuan pengukuran panjang total sepeda (*bike length*) dengan rata-rata kesalahan sekitar 3% dari dimensi asli. Dalam konteks stabilitas pelatihan, fluktuasi yang teramati pada grafik *validation loss* selama proses training dianalisis sebagai dampak dari volatilitas data pada *batch* validasi yang berukuran kecil, bukan indikasi *overfitting* fungsional. Hal ini diperkuat dengan bukti *Confusion Matrix* yang sempurna (100% akurasi klasifikasi)

dan visualisasi deteksi yang presisi pada data uji. Dengan demikian, meskipun metrik *loss* menunjukkan varians (*noise*), kemampuan generalisasi model pada data riil (pengukuran fisik sepeda) terbukti robust dan dapat diandalkan.

Analisis Disparitas Metrik Deteksi Terdapat temuan menarik terkait disparitas antara Confusion Matrix yang sempurna (100%) dengan grafik Precision yang fluktuatif selama pelatihan. Hal ini mengindikasikan bahwa model memiliki karakteristik klasifikasi yang sangat kuat (*high class-separability*), artinya model tidak pernah salah mengenali jenis objek (misalnya, ban tidak pernah tertukar dengan sadel). Namun, fluktuasi pada nilai Precision menunjukkan sensitivitas model terhadap ambang batas kepercayaan (*confidence threshold*) dan ketepatan posisi kotak (*IoU*) pada dataset yang terbatas. Dalam konteks pengukuran geometri, karakteristik ini justru menguntungkan karena model cenderung "konservatif"; ia lebih memilih memberikan deteksi yang pasti benar daripada menebak-nebak dengan risiko *False Positive* yang tinggi, sehingga menjaga validitas data pengukuran (Choate et al., 2023)

Konsistensi pengukuran geometri antar model berdasarkan hasil pengujian pada dataset yang telah divalidasi (Tabel 3) menunjukkan tingkat konsistensi yang tinggi pada pengukuran jarak antar komponen. Parameter jarak Crank-ke-Depan (*Front Center*), yang krusial untuk menentukan karakteristik pengendalian sepeda, berhasil diukur dengan deviasi rata-rata hanya 2,56 cm pada kelima sampel sepeda. Konsistensi ini terlihat baik pada sepeda dengan geometri *race* (seperti Cannondale dan Giant) maupun sepeda dengan geometri berbeda (seperti Trek dan Polygon). Hal ini mengindikasikan bahwa sistem deteksi *keypoint* yang dikembangkan mampu beradaptasi dengan berbagai variasi desain rangka sepeda triathlon tanpa mengalami kegagalan identifikasi komponen yang signifikan, menjadikannya andal untuk penggunaan umum (Wang et al., 2024)

Tantangan Distorsi Perspektif pada Pengukuran Sudut Tantangan terbesar yang teridentifikasi dalam penelitian ini adalah pengukuran sudut stang (*Handlebar Angle*) yang memiliki rata-rata error sebesar $5,21^\circ$. Kesalahan ini bersifat sistematis dan terjadi pada hampir seluruh sampel uji. Penyebab utama deviasi ini adalah distorsi perspektif pada citra 2D. Karena sistem saat ini mengukur kemiringan stang relatif terhadap bingkai foto (*image frame*), sedikit saja kemiringan kamera saat pengambilan gambar akan diterjemahkan sebagai kesalahan sudut oleh sistem. Sebagai solusi untuk pengembangan selanjutnya, disarankan penerapan algoritma orientasi relatif (*Relative Orientation*), yaitu metode pengukuran sudut stang terhadap garis horizontal sepeda (*top tube*) alih-alih terhadap garis horizontal foto, guna mengeliminasi bias perspektif kamera.

SIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan sistem klasifikasi kelayakan sepeda triathlon berbasis YOLOv11 yang diuji pada beberapa varian sepeda. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa sistem memiliki presisi yang handal untuk pengukuran dimensi makro maupun posisi komponen, dengan tingkat kesalahan yang relatif kecil. Model terbukti memiliki status *Good Fit* secara fungsional dengan akurasi klasifikasi visual yang sangat baik pada Confusion Matrix. Meskipun demikian, pengukuran parameter mikro, khususnya sudut stang, masih menghadapi kendala akurasi akibat distorsi perspektif. Secara keseluruhan, sistem ini direkomendasikan untuk diimplementasikan sebagai alat bantu skrining awal yang efisien dalam

proses *bike check*, dengan catatan perlunya verifikasi manual untuk kasus-kasus yang hasil ukurnya berada di perbatasan ambang batas regulasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Andersen, C. A. (2013). *Injuries and illnesses among iron-distance triathletes: A prospective study*.
- Choate, J., Worth, D., Nykl, S., Taylor, C., Borghetti, B. J., & Schubert Kabban, C. (2023). An analysis of precision: Occlusion and perspective geometry's role in 6D pose estimation.
- Establish a dynamic detection system for metal bicycle frame defects based on YOLO object detection. (2022). In *2022 IET International Conference on Engineering Technologies and Applications (IET-ICETA)*.
- Gall, M. D., Gall, J. P., & Borg, W. R. (2007). *Educational research: An introduction* (8th ed.). Pearson Education, Inc.
- García-Giménez, A. (2024). Triathlon performance: Physiological and training strategies from super sprint to long distance events. *Physical Education and Sport Through the Centuries*, 11(2), 87–93.
- Gohar, I., Halimi, A., Yew, W. K., & See, J. (2024). Optimizing wind turbine surface defect detection: A rotated bounding box approach.
- Li, J., Li, M., & Li, H. (2022). Analysis of developments and hotspots of international research on sports AI. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 43(4), 4227–4241.
- Pisaniello, A. (2024). The game changer: How artificial intelligence is transforming sports performance and strategy. *Geopolitical, Social Security and Freedom Journal*, 7(1), 75–84.
- Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., & Farhadi, A. (2016). You only look once: Unified, real-time object detection. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (pp. 779–788).
- Ryu, H., Park, M., & Kim, D.-Y. (2024). Object prediction and detection of ground-based weapon with an improved YOLO11 approach. *Journal of Advances in Military Studies*.
- Triathlon. (2022). *Triathlon* (pp. 168–172).
- Wang, H., Li, J. H., Wang, J., Li, Z., & Steven, X. (2024). A transformer-based cycle posture detection system using 3D pose estimation algorithm.
- World Triathlon. (2025). *World Triathlon competition rules*.
- Wu, H., Dong, Y., & Xi, J. (2023). Measurement based on geometry and feature shape by weighted multi-view stereo.
- Zajkowska, A., Cąkała, M., Koziół, M., Podgórnjak, K., Szymchel, M., & Grzegorzak, F. (2024). Benefits of triathlon disciplines in maintaining good health: A review of the literature. *Quality in Sport*, 22, 54322.