p-ISSN: 2502-1621
e-ISSN: 2656-1611

Jurnal 7 Samudra
Politeknik Pelayaran Surabaya
Vol. 11, No. 2, 14 November 2026
Hal: 67–72

Prototipe Sistem Monitoring Kapal Sandar di Pelabuhan Berbasis AIS dan Pengolahan Citra

Balqis Kyla Tahira[1], Afif Zuhri Arfianto[2], Muhammad Khoirul Hasin[3]
1,2,3 Program Studi D4 Teknik Otomasi, Jurusan Teknik Kelistrikan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya
Email korespondensi: kylatahira15@student.ppns.ac.id, afif@ppns.ac.id, khoirul.hasin@ppns.ac.id

ABSTRAK

Proses sandar kapal di pelabuhan masih banyak bergantung pada pengawasan manual dan data Automatic Identification System (AIS) yang hanya menyajikan posisi makro kapal tanpa validasi visual jarak dekat, sehingga rawan kesalahan maupun kecurangan penempatan dermaga. Penelitian ini bertujuan merancang prototipe sistem monitoring sandar kapal yang mengintegrasikan AIS dengan pengolahan citra kamera, menerapkan Geofencing dan You Only Look Once (YOLO) sebagai dasar penentuan posisi kapal terhadap dermaga, serta menganalisis kinerja sistem secara menyeluruh. Metode penelitian bersifat eksperimental melalui perancangan arsitektur berlapis (hardware, communication, application, machine learning, geofencing, visualization, dan notification layer) menggunakan kamera CCTV, modul GNSS on-board, ESP32, YOLOv11, serta dashboard web berbasis Leaflet, yang diuji secara parsial pada tiap komponen dan secara terintegrasi melalui beberapa skenario sandar kapal. Hasil penelitian menunjukkan model YOLOv11 mencapai mAP@0,5 sebesar 0,995 dengan precision mendekati 1,00 pada confidence sekitar 0,972 dan F1-score maksimum 1,00 pada threshold 0,850, modul GNSS menghasilkan rata-rata error posisi sebesar 0,000715% (latitude) dan 0,000208% (longitude) terhadap referensi Google Maps, serta pengujian integrasi menunjukkan sistem mampu membedakan kapal yang sandar sesuai izin (indikator hijau) dan yang tidak sesuai izin (indikator merah-kuning) secara konsisten dan real-time.

Kata kunci: *Automatic Identification System (AIS), Pengolahan Citra, Geofencing, YOLOv11, Smart Port.*

PENDAHULUAN

Pelabuhan merupakan tempat kegiatan kapal bersandar, naik-turun penumpang, dan/atau bongkar muat barang yang dilengkapi fasilitas keselamatan dan keamanan pelayaran (Republik Indonesia, 2008). Proses sandar kapal di dermaga adalah tahapan operasional dengan risiko keselamatan tinggi apabila pengawasannya tidak memadai. Kajian keamanan pelabuhan menunjukkan bahwa *human factor* merupakan salah satu titik lemah utama, karena keputusan kritis seperti kontrol akses dan pemanfaatan fasilitas sangat dipengaruhi oleh perilaku dan integritas personel (Port Kusi, 2021). Penurunan *situational awareness*, salah persepsi jarak, beban kerja tinggi, dan gangguan komunikasi menjadi faktor dominan *human error* saat manuver sandar, sehingga peluang kecurangan penempatan dermaga—misalnya kapal yang sandar di dermaga khusus tanpa prosedur

standar—menjadi lebih besar dan sulit dideteksi.

Transformasi menuju konsep *smart port* memanfaatkan sensor, *Internet of Things* (IoT), dan sistem pemantauan terintegrasi untuk meningkatkan visibilitas operasional (Nguyen et al., 2023). *Automatic Identification System* (AIS) telah menjadi teknologi utama pemantauan kapal karena mampu menyediakan identitas, posisi, kecepatan, dan arah kapal secara *real-time* melalui GNSS dan radio VHF (Huang et al., 2024), namun pemanfaatannya lebih berfokus pada pemantauan lalu lintas makro sehingga kurang mendukung validasi visual jarak dekat pada fase kritis sandar. Sebagai pelengkap, kamera CCTV dinilai sebagai sensor pasif yang ekonomis untuk menyediakan informasi visual kontinu (Zhang et al., 2025), dan integrasinya dengan deteksi objek berbasis *You Only Look Once* (YOLO) memungkinkan identifikasi kapal secara otomatis dan *real-time* dengan *metadata* yang lebih rinci dibanding AIS saja, khususnya pada jarak dekat dan lingkungan pelabuhan yang kompleks (Petković & Vujović, 2024).

Pendekatan deteksi objek dan *instance segmentation* dinilai relevan untuk objek kapal yang memiliki bentuk geometris tidak beraturan, sedangkan arsitektur YOLO sebagai *single-stage detector* mampu menghasilkan deteksi cepat dan efisien dalam satu tahap inferensi sehingga sesuai untuk aplikasi maritim *real-time* (Xue et al., 2025). Berdasarkan kebutuhan tersebut, penelitian ini mengembangkan prototipe sistem monitoring kapal sandar di pelabuhan yang mengintegrasikan data AIS sebagai sumber informasi navigasi makro dengan citra kamera yang diproses menggunakan YOLO untuk deteksi dan identifikasi kapal pada jarak dekat, dilengkapi *geofencing* berbasis poligon zona dermaga. Fokus penelitian terletak pada perancangan arsitektur sistem, integrasi sensor dan komunikasi data, serta implementasi algoritma deteksi visual sebagai fondasi sistem monitoring sandar yang lebih objektif, mendukung pencegahan kecurangan penempatan dermaga, dan selaras dengan konsep *smart port*.

METODE PENELITIAN

Konsep dan Arsitektur Sistem

Penelitian ini bersifat eksperimental melalui perancangan prototipe yang mengintegrasikan data posisi berbasis AIS dengan pemrosesan citra. Data AIS digunakan untuk memantau posisi kapal secara *real-time* dan menentukan status keberadaan kapal melalui proses *geofencing* berbasis poligon zona pelabuhan menggunakan pendekatan *ray-casting*. Untuk meningkatkan validasi dan mengurangi potensi kesalahan, sistem dilengkapi kamera yang berfungsi sebagai sumber data visual; pada tahap pengambilan keputusan, sistem memanfaatkan model YOLOv11 untuk mengidentifikasi kapal yang sedang melakukan aktivitas sandar. Sistem tersusun atas enam lapisan, yaitu *hardware layer* (AIS receiver dengan modul GNSS, ESP32, kamera webcam, *buzzer*, dan *pilot lamp*), *communication layer* (TCP/IP, HTTP/WebSocket), *application layer* (*backend* Node.js dan Python), *machine learning layer* (YOLOv11), *geofencing layer* (poligon zona), serta *visualization* dan *notification layer* (*dashboard* web berbasis Leaflet dan indikator LED/*buzzer*).

Alur kerja sistem dimulai ketika kamera diaktifkan dalam mode *standby* dan *backend* menerima data AIS secara *real-time*.

Posisi kapal disimpan ke basis data, kemudian modul *geofencing* memeriksa posisi kapal terhadap tiga zona bertingkat: pada Zona 1 lampu merah menyala sebagai peringatan dini, pada Zona 2 lampu kuning menyala, sedangkan pada Zona 3 sistem memicu inferensi YOLO berbasis PyTorch terhadap citra RGB terakhir dari kamera untuk memvalidasi kesesuaian kapal. Apabila kapal terdeteksi sesuai izin sandar, lampu hijau menyala disertai *buzzer* dua kali sebagai konfirmasi positif; apabila tidak sesuai, seluruh lampu menyala bersamaan dengan *buzzer* sebagai peringatan ketidaksesuaian.

Prosedur Pengujian

Pengujian sistem dilakukan pada skala prototipe dan lingkungan simulasi menggunakan lima unit miniatur kapal (dua tanker dan tiga kapal penumpang) yang bergerak sesuai skenario. Pengujian dilakukan secara bertahap, meliputi: (a) pengujian parsial sensor dan aktuator (kamera, *decoding* AIS tipe 18, modul GNSS *on-board*, *pilot lamp*, *buzzer*, dan *relay*); (b) pelatihan dan evaluasi model YOLOv11 menggunakan *dataset* citra kapal yang dianotasi pada platform *Roboflow*, dengan skema pembagian data *training*, *validation*, dan *testing* serta augmentasi berupa *horizontal flip*, *cropping*, penyesuaian *saturation/brightness*, dan *blur*; dan (c) pengujian integrasi sistem berupa *geofencing*, notifikasi, dan skenario sandar kapal. Akurasi modul GNSS *on-board* dievaluasi dengan membandingkan koordinat sensor terhadap referensi Google Maps menggunakan persentase error latitude dan longitude sebagai berikut:

$$Lat(\%) = \left|\frac{Lat_{\text{sensor}} - Lat_{\text{ref}}}{Lat_{\text{ref}}}\right| \times 100\% \qquad (1)$$

$$Lon(\%) = \left|\frac{Lon_{\text{sensor}} - Lon_{\text{ref}}}{Lon_{\text{ref}}}\right| \times 100\% \qquad (2)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian Sensor GNSS On-Board

Pengujian modul GNSS *on-board* dilakukan pada sepuluh lokasi berbeda di sekitar lingkungan kampus dengan membandingkan koordinat yang dihasilkan modul terhadap data referensi Google Maps menggunakan Persamaan (1) dan (2). Ringkasan hasil disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Rekapitulasi Pengujian Akurasi Sensor GNSS On-Board

No.	Lokasi	% Error Lat	% Error Lon
1	Gedung J PPNS	0,000055%	0,000089%
2	Telekomunikasi PPNS	0,000688%	0,000027%
3	Lab Anatomi ITS	0,000162%	0,000106%
4	ATM Center ITS	0,000686%	0,000008%
5	Gedung Rektorat ITS	0,000412%	0,001427%
6	Taman ITS	0%	0,000009%
7	Perumahan Dosen ITS	0,000275%	0,000008%
8	InfinITS Park	0%	0,000027%
9	Health Center ITS	0,000411%	0,000344%
10	Sakinah Arif Rahman Hakim	0,001783%	0,000035%
	Rata-rata Error	**0,000715%**	**0,000208%**

Sumber: Dokumentasi Pribadi Penulis, 2026

Hasil pengujian pada Tabel 1 menunjukkan bahwa modul GNSS *on-board* memiliki tingkat akurasi yang sangat baik, dengan rata-rata persentase error sebesar 0,000715% pada latitude dan 0,000208% pada longitude terhadap referensi Google Maps. Nilai error yang sangat kecil tersebut membuktikan bahwa sensor mampu membaca koordinat lokasi dengan presisi tinggi, sehingga layak digunakan sebagai titik referensi tetap bagi seluruh perhitungan *geofencing* pada zona sandar kapal.

Pengujian Fungsional Aktuator

Pengujian fungsional dilakukan terhadap tiga aktuator notifikasi, yaitu *pilot lamp*, *buzzer*, dan *relay*, untuk memastikan setiap komponen dapat diaktifkan dan dinonaktifkan sesuai perintah ESP32. Rekapitulasi hasil pengujian disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Rekapitulasi Pengujian Fungsional Aktuator

Aktuator	Fungsi yang Diuji	Jumlah Uji	Validasi
Pilot Lamp (merah/kuning/hijau)	Nyala/mati sesuai perintah ESP32	6 kali	Benar
Buzzer	Bunyi sesuai kondisi terdeteksi	2 kali	Benar
Relay 4 channel	Kendali independen tiap pilot lamp	4 channel	Benar

Sumber: Dokumentasi Pribadi Penulis, 2026

Seluruh aktuator dinyatakan "Benar" pada setiap kondisi pengujian, yang menunjukkan bahwa *pilot lamp*, *buzzer*, dan *relay* dapat berfungsi sebagai indikator visual dan suara status zona *geofencing* secara akurat dan sinkron dengan perintah dari sistem.

Pelatihan dan Evaluasi Model YOLOv11

Dataset yang digunakan untuk melatih model deteksi terdiri atas 1.561 gambar dengan lima kelas objek kapal, seluruhnya telah dianotasi (unannotated = 0). *Dataset* kemudian dibagi menjadi data *training*, *validation*, dan *testing* sebagaimana dirangkum pada Tabel 3, serta melalui tahap *preprocessing* (*auto-orient*, *resize* 640×640 piksel, *auto-adjust contrast*) dan augmentasi (*horizontal flip*, *cropping*, penyesuaian *saturation/brightness*, *blur*) untuk meningkatkan ketahanan model terhadap variasi kondisi lingkungan.

Tabel 3. Pembagian Dataset Pelatihan Model YOLOv11

No.	Jenis Kapal	Jumlah Dataset
1	Kapal Tanker 1	1.521
2	Kapal Tanker 2	1.478
3	Kapal Penumpang 1	1.580
4	Kapal Penumpang 2	1.506
5	Kapal Penumpang 3	1.512

Sumber: Dokumentasi Pribadi Penulis, 2026

Model dilatih menggunakan platform *Google Colab* dengan akselerasi GPU melalui pustaka *Ultralytics*. Evaluasi performa dilakukan dengan *Recall-Confidence Curve* dan *Confusion Matrix*. Seluruh kelas kapal mempertahankan nilai *recall* 1,0 pada rentang *confidence threshold* 0,0 hingga sekitar 0,8, dan pada *confusion matrix* seluruh prediksi benar terkonsentrasi pada diagonal utama tanpa kesalahan klasifikasi silang antar kelas kapal maupun false positive dari latar belakang. Model mencapai *mAP@0,5* sebesar 0,995, *precision* mendekati 1,00 pada *confidence* sekitar 0,972, dan *F1-score* maksimum 1,00 pada *threshold* 0,850. Pengujian deteksi langsung pada *dashboard* web dilakukan sebanyak 10 kali percobaan untuk tiap kelas kapal; ringkasan tingkat kepercayaan (*confidence level*) deteksi disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Ringkasan Hasil Pengujian Deteksi YOLOv11 per Kelas Kapal (10 percobaan/kelas)

Kelas Kapal	Conf. Min	Conf. Maks	Rata-rata	Keberhasilan
Tanker 1	64%	90%	79,3%	10/10
Tanker 2	50%	92%	71,9%	10/10
Penumpang 1	52%	85%	66,8%	10/10
Penumpang 2	90%	95%	93,6%	10/10
Penumpang 3	90%	95%	93,0%	10/10

Sumber: Dokumentasi Pribadi Penulis, 2026

Berdasarkan Tabel 4, model berhasil mendeteksi objek kapal pada seluruh percobaan (10/10) di setiap kelas tanpa kesalahan klasifikasi. Variasi nilai *confidence* dipengaruhi oleh posisi dan sudut

pandang kamera, jarak objek, ukuran kapal dalam *frame*, serta kondisi pencahayaan saat pengambilan gambar; kelas Penumpang 2 dan Penumpang 3 memperoleh *confidence* tertinggi dan paling stabil, sedangkan kelas Penumpang 1 memperoleh *confidence* relatif lebih rendah yang diduga akibat ukuran objek yang lebih kecil dalam *frame*.

Pengujian Geofencing, Notifikasi, dan Skenario Integrasi

Pengujian *geofencing* menunjukkan bahwa status zona (aman/hijau, waspada/kuning, bahaya/merah) yang ditampilkan sistem selalu sesuai dengan kondisi lampu indikator yang disimulasikan pada seluruh pengujian. Pengujian notifikasi berbasis AIS dilakukan sebanyak 10 kali percobaan yang mencakup kapal model (Tanker 1, Tanker 2, Penumpang 1, Penumpang 2) maupun kapal nyata (di antaranya Clipper Medway dan Andhika Paramesti); seluruh notifikasi berhasil ditampilkan secara *real-time* dengan informasi nama kapal, status pergerakan, nama zona, dan kecepatan kapal. Pengujian skenario integrasi terhadap 10 percobaan yang melibatkan Tanker 1 dan Tanker 2 menunjukkan bahwa sistem konsisten mengintegrasikan data AIS, hasil deteksi YOLO, dan respons aktuator lampu indikator secara sinkron, mampu membedakan kondisi kapal sandar sesuai izin (indikator hijau) dari kondisi tidak sesuai izin (indikator merah-kuning) secara *real-time*.

KESIMPULAN

Prototipe sistem monitoring kapal sandar berbasis integrasi AIS dan pengolahan citra berhasil direalisasikan, terbukti dari keberhasilan pengujian tiap komponen: *decoding* sinyal AIS sesuai standar NMEA 0183, modul GNSS *on-board* dengan rata-rata error 0,000715% (lat) dan 0,000208% (lon), serta ketiga aktuator (*pilot lamp*, *buzzer*, *relay*) yang seluruhnya tervalidasi "Benar". Metode *geofencing* berbasis poligon terbukti mampu memetakan posisi kapal ke zona sandar secara bertingkat, sedangkan model YOLOv11 yang dilatih dari 1.561 citra lima kelas kapal mencapai *mAP@0,5* sebesar 0,995 dan *F1-score* maksimum 1,00 pada *threshold* 0,850 tanpa kesalahan klasifikasi silang. Pengujian skenario integrasi menunjukkan seluruh subsistem—AIS, *geofencing*, YOLO, dan notifikasi aktuator—bekerja sinkron dan responsif dalam membedakan kapal sandar sesuai izin dari yang tidak sesuai izin secara *real-time*, sehingga prototipe berpotensi meningkatkan *situational awareness* operator dan mengurangi *human error* dalam pengawasan sandar kapal.

Pengembangan selanjutnya disarankan memperluas skenario pengujian integrasi dengan variasi kombinasi jenis kapal dan tingkat kesesuaian data disertai perhitungan persentase keberhasilan sistem secara kuantitatif, meningkatkan ketahanan model deteksi terhadap kondisi pencahayaan dan cuaca yang beragam (malam hari, hujan, kabut), memperluas dukungan data AIS Class A di samping Class B yang digunakan saat ini, serta melakukan pengujian pada skala operasional yang lebih besar untuk merepresentasikan kesiapan implementasi nyata di pelabuhan sesuai konsep *smart port*.

DAFTAR PUSTAKA

Firmansyah, H., Gunarto, M., & Andriyansah, A. (2024). Synergy of occupational safety and work environment to support productivity and sustainable well-being in the port sector. *Society*, *12*(2), 859–882. https://doi.org/10.33019/society.v12i2.716

Huang, I. L., Lee, M. C., Nieh, C. Y., & Huang, J. C. (2024). Ship classification based on AIS data and machine learning methods. *Electronics*, *13*(1). https://doi.org/10.3390/electronics13010098

Kementerian Perhubungan Republik Indonesia. (2019). *Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor PM 7 Tahun 2019*.

Murat, A. A., & Kiran, M. S. (2025). A comprehensive review on YOLO versions for object detection. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, *70*. https://doi.org/10.1016/j.jestch.2025.102161

Nawawi, C. I., Santoso, R., & Purnomo, B. (2024). *Analisis faktor yang mempengaruhi keselamatan operasional kapal di Pelabuhan Merak*.

Nguyen, H. P., Nguyen, P. Q. P., Nguyen, D. K. P., Bui, V. D., & Nguyen, D. T. (2023). Application of IoT technologies in seaport management. *J. Innov. Value*.

Petković, M., & Vujović, I. (2024). Distance estimation approach for maritime traffic surveillance using instance segmentation. *Journal of Marine Science and Engineering*.

Port Kusi, T. (2021). *Port security: Threats and vulnerabilities*.

Republik Indonesia. (2008). *Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 17 Tahun 2008 tentang Pelayaran*.

Sturgis, R., Emiya, V., Couetoux, B., & Garreau, P. (2023). *Beyond geofencing: Behavior detection using AIS*. https://ssrn.com/abstract=4453331

Xiang, J., Blanco-Davis, E., Xin, X., Li, H., Hifi, N., Wang, J., & Yang, Z. (2025). A systematic literature review of human-machine cooperation in maritime autonomous surface ships. *Auton. Transp. Res.* https://doi.org/10.1016/j.atres.2025.10.001

Xue, Y., Zhan, L., Liu, Z., & Bing, X. (2025). SAR ship target instance segmentation based on SISS-YOLO. *Remote Sensing*, *17*(17). https://doi.org/10.3390/rs17173118

Zhang, B., Liu, J., Liu, R. W., & Huang, Y. (2025). Deep-learning-empowered visual ship detection and tracking: Literature review and future direction. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, *141*. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.109754