

Implementasi Fuzzy Logic untuk Mendeteksi Kelelahan Pengemudi Mobil

Heliawati Hamrul^{*1}, Muh. Rafly Rasyid², Nur Aynun³, Nurdina Rasyid⁴

^{1,2,3,4}Program Studi Teknik Informatika, Universitas Sulawesi Barat

E-mail: ^{*1}heliawatyhamrul@unsulbar.ac.id, ²muhraflyrasyid@unsulbar.ac.id, ³nuraynun@gmail.com,

⁴nurdinarasyid@unsulbar.ac.id

Abstrak

Penelitian ini mengusulkan sistem pendeteksi kelelahan pengemudi berbasis computer vision yang memanfaatkan kamera webcam untuk memperoleh gambar secara real-time. Data wajah yang terekam kemudian diproses menggunakan library Python Mediapipe Face Mesh untuk memetakan 468 titik wajah 3D, yang selanjutnya dianalisis menggunakan algoritma fuzzy logic guna mengidentifikasi indikasi kelelahan. Sistem difokuskan pada pendeteksian area mata dan mulut melalui variabel input berupa frekuensi kedipan, tingkat keterbukaan mulut, serta kondisi wajah normal yang dikombinasikan dengan rule fuzzy yang telah dirumuskan. Skor deteksi dihasilkan untuk menggambarkan tingkat kelelahan pengemudi, dan alarm otomatis aktif ketika kondisi mengantuk terdeteksi. Proses evaluasi mencakup kesesuaian prediksi dengan tingkat kewaspadaan pengemudi, konsistensi antara prediksi dan skor deteksi, serta analisis kemungkinan kelelahan yang tidak terdeteksi. Hasil pengujian pada delapan skenario dengan variasi pencahayaan dan posisi wajah menunjukkan bahwa sistem mampu mengidentifikasi tiga kondisi utama, yaitu normal, mengantuk, dan menguap, berdasarkan ambang EAR dan MAR yang telah ditetapkan. Penurunan EAR hingga $\leq 50-55$ terbukti secara konsisten menandai kondisi mengantuk, sedangkan kenaikan MAR ≥ 60 mengindikasikan aktivitas menguap. Temuan ini diperkuat melalui analisis grafik EAR dan MAR yang menunjukkan pola perubahan stabil sehingga menegaskan bahwa kedua parameter merupakan indikator yang sensitif dan akurat dalam merepresentasikan tingkat kelelahan pengemudi.

Kata kunci— Computer Vision, Eye Aspect Ratio (EAR), Fuzzy Logic, Mouth Aspect Ratio (MAR), real-time.

Abstract

This study proposes a driver fatigue detection system based on computer vision using a webcam to capture real-time facial images. The captured data are processed using the Python Mediapipe Face Mesh library to map 468 three-dimensional facial landmark points, which are then analyzed using a fuzzy logic algorithm to detect signs of driver fatigue. The system focuses on monitoring facial regions, particularly the eyes and mouth, by using input variables such as blink frequency, mouth opening level, and normal facial conditions combined with predefined fuzzy rules. A detection score is generated to represent the driver's fatigue level, and an alarm is activated when drowsiness is detected. The evaluation includes assessing the consistency between system predictions and the driver's actual alertness level, the agreement between predictions and detection scores, and the analysis of potential fatigue conditions that may not be detected. Experimental results from eight scenarios with variations in lighting and face orientation show that the system can accurately identify three main conditions—normal, drowsy, and yawning—

based on EAR and MAR thresholds. A decrease in EAR to ≤ 50 –55 consistently indicates drowsiness, while an increase in MAR to ≥ 60 identifies yawning behavior, supported by EAR and MAR graphs showing stable patterns as reliable indicators of driver fatigue.

Keywords— *Computer Vision, Eye Aspect Ratio (EAR), Fuzzy Logic, Mouth Aspect Ratio (MAR), real-time.*

1. PENDAHULUAN

Jumlah pengguna kendaraan khususnya mobil meningkat dari tahun ke tahun khususnya di Indonesia. Hal ini disebabkan karena semakin baiknya sistem transportasi dan semakin meningkatkan daya beli masyarakat akan kebutuhan kendaraan. Peningkatan ini juga diikuti dengan peningkatan permasalahan yang disebabkan oleh kecelakaan. Jumlah kecelakaan lalu lintas pada tahun 2022 mengalami peningkatan signifikan sebesar 34,6 persen dibandingkan tahun sebelumnya. Berdasarkan data Polri, tercatat 94.617 kasus kecelakaan pada tahun tersebut, melonjak tajam dari angka sekitar 70 ribu kasus yang terjadi pada periode yang sama pada tahun 2021[1]. Peningkatan jumlah kecelakaan disebabkan oleh berbagai faktor diantaranya faktor manusia, kendaraan, kontur jalan dan faktor lingkungan. Faktor manusia merupakan salah satu faktor yang paling sering menyebabkan kecelakaan. Faktor manusia yang dimaksud dalam hal ini adalah kondisi pengemudi yang kelelahan, mengantuk, mabuk dan mengebut. Rasa lelah dan mengantuk menyebabkan pengemudi mengalami *microsleep*[2].

Banyak teknik yang telah diterapkan untuk mendeteksi kelelahan pengemudi. Fuzzy logic telah digunakan dalam berbagai penelitian khususnya mendeteksi kelelahan. Teknik pemrosesan gambar dan inferensi menggunakan fuzzy logic untuk menentukan tingkat kelelahan dengan mengukur durasi kebutaan dan frekuensinya[3]. Akan tetapi penelitian ini tidak diujicoba pada kondisi gelap. *Face detection* menggunakan kamera dan algoritma juga telah banyak diteliti. Penerapan metode viola jones dapat menentukan posisi wajah dan mata serta metode *circular hough transform* untuk menganalisis mata mengantuk[2]. Penggunaan algoritma fuzzy logic juga terdapat pada beberapa penelitian diantaranya yaitu sistem evaluasi keberhasilan pembelajaran online di SMK Negeri 1 Tapalang Barat menggunakan metode fuzzy Mamdani dengan melibatkan data angket guru dan siswa kelas XII Teknik Audio Video, dan hasilnya menunjukkan bahwa sistem evaluasi yang dikembangkan berfungsi efektif, membantu sekolah mengatasi kendala selama masa renovasi, serta memberikan kontribusi penting bagi optimalisasi pembelajaran online pada situasi transisi[4]. Selain itu, penelitian mengenai deteksi kelelahan pengemudi berdasarkan kedipan mata menggunakan video dan *computer vision real-time* menentukan tingkat kelelahan melalui pengukuran durasi penutupan mata selama 0,3 detik[5]. Variabilitas detak jantung juga dapat digunakan untuk mendeteksi kelelahan pengemudi[6]. sistem deteksi kantuk melalui analisis ekspresi wajah (PERCLOS, PEER, dan frekuensi menguap) berbasis deep learning yang diuji pada simulasi dan kondisi nyata selama ± 3 jam serta mencapai akurasi 0,89, yang kemudian dipadukan dengan pendekatan Fuzzy Type-2 berbasis variabel subjek (postural tubuh dan heart rate dari palm ECG yang menyerupai ECG konvensional), variabel kendaraan (perubahan throttle, RPM, dan kecepatan), serta variabel lingkungan (jarak berkendara) dengan batas parameter hasil enam pengujian yang menunjukkan pola khas kantuk, penurunan variabilitas kecepatan, heart rate, dan kecepatan angukan serta peningkatan sudut dan durasi anggukan, sehingga memperoleh akurasi 91% dan berpotensi dikembangkan sebagai sistem IoT atau wearable berbasis SBC guna meningkatkan keselamatan berkendara[7][8]. Tetapi penelitian ini sulit membuat kesimpulan yang akurat tentang status fisiologis dan sulit mendeteksi secara tepat waktu ketika subjek tertidur. Teknik deteksi wajah menggunakan metode *Facial Landmark* juga terbukti dapat mengenali pola wajah mengantuk[9]. Penggunaan algoritma *Blazeface* untuk mendeteksi dan memetakan posisi wajah pengemudi dan *Eye Aspect Ratio* untuk menentukan apakah mata dan mulut terbuka atau tertutup dan *inverse kinematics* untuk menentukan posisi dan kemiringan kepala[10]. Penelitian ini hanya dapat

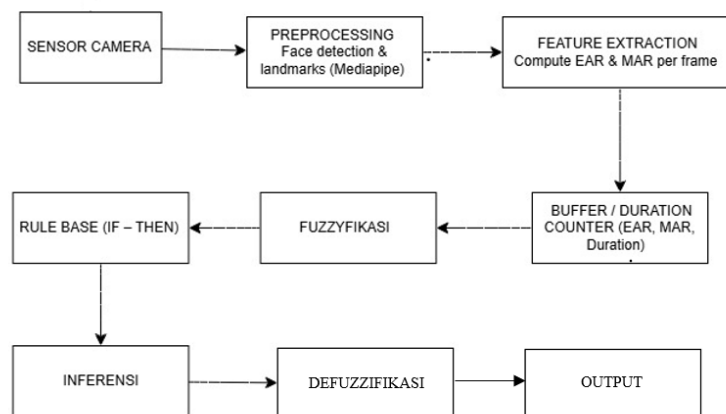
mendeteksi wajah dalam keadaan gelap menggunakan kamera infrared dan belum dalam mengklasifikasi pengemudi mengantuk, lelah dan kondisi lainnya. YOLOv4 terbukti lebih unggul dibanding YOLOv3 dalam mendeteksi kelelahan pengemudi[11].

Sistem yang diusulkan pada penelitian ini adalah sistem deteksi kantuk pengemudi menggunakan fuzzy logic berdasarkan indikator mata dan mulut menguap yang diuji dalam kondisi cahaya terang dan gelap dan memperhatikan aspek sudut kemiringan wajah. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengevaluasi sistem deteksi kelelahan pengemudi berbasis algoritma Fuzzy Logic yang mampu mengintegrasikan parameter fisiologis, khususnya *Eye Aspect Ratio* (EAR) dan *Mouth Aspect Ratio* (MAR).

2. METODE

2.1 Perancangan Sistem

Sistem deteksi kelelahan pengemudi berbasis Fuzzy Logic dikembangkan melalui integrasi berbagai komponen kritis yang meliputi sensor visual untuk mengidentifikasi indikator fisiologis kelelahan, Fuzzy Logic Controller (FLC) sebagai mekanisme pemrosesan cerdas untuk menganalisis pola perilaku pengemudi, serta modul umpan balik yang berfungsi menghasilkan respons korektif secara adaptif guna meningkatkan keselamatan berkendara. Gambar 1 berikut menyajikan arsitektur sistem deteksi kelelahan pengemudi berbasis Fuzzy Logic, yang menggambarkan alur pemrosesan mulai dari akuisisi citra hingga pengambilan keputusan akhir. Diagram ini dirancang untuk menunjukkan keterkaitan antar komponen utama mulai dari sensor kamera, preprocessing, ekstraksi fitur, hingga mekanisme inferensi fuzzy dalam mendeteksi tanda-tanda kelelahan secara real-time.



Gambar 1 Arsitektur Sistem

Blok diagram pada Gambar 1 di atas menggambarkan alur kerja sistem pendeteksi kelelahan pengemudi berbasis *computer vision* dan *Fuzzy Logic*, yang terdiri dari beberapa tahapan pemrosesan mulai dari akuisisi data hingga pengambilan keputusan akhir. Tahap pertama adalah Sensor Camera, yang berfungsi sebagai perangkat akuisisi visual untuk mengambil citra wajah pengemudi secara *real-time*. Citra yang diperoleh kemudian masuk ke tahap Preprocessing, di mana dilakukan proses deteksi wajah dan ekstraksi titik-titik penanda (*facial landmarks*) menggunakan algoritma Mediapipe. Tahapan ini penting untuk memastikan struktur wajah dapat dikenali secara konsisten meskipun terjadi variasi pencahayaan, posisi kepala, maupun ekspresi wajah.

Hasil dari preprocessing selanjutnya diteruskan ke modul *Feature Extraction*, yang bertanggung jawab menghitung dua parameter utama, yaitu *Eye Aspect Ratio* (EAR) dan *Mouth Aspect Ratio* (MAR) pada setiap frame. EAR digunakan untuk mengidentifikasi tingkat

keterbukaan mata, sedangkan MAR digunakan untuk mendeteksi aktivitas menguap. Nilai EAR dan MAR kemudian diolah pada Buffer/Duration Counter, yang merekam durasi kondisi abnormal (misalnya mata terpejam atau mulut terbuka lebar) untuk menentukan apakah perilaku tersebut bersifat sementara atau berkelanjutan. Informasi ini memberikan konteks temporal yang sangat penting dalam membedakan kedipan normal dari tanda-tanda kelelahan.

Ketiga parameter tersebut (EAR, MAR, dan durasi) selanjutnya menjadi input bagi proses Fuzzyfikasi, yaitu tahap transformasi nilai numerik menjadi variabel linguistik seperti “Terpejam”, “Menguap”, “Singkat”, atau “Lama.” Nilai fuzzy ini kemudian diproses oleh Rule Base (IF–THEN), yang memuat sekumpulan aturan logis yang dirancang untuk menghubungkan kombinasi kondisi mata, mulut, dan durasi dengan tingkat kelelahan pengemudi. Aturan-aturan tersebut dievaluasi melalui tahap Inferensi, di mana metode inferensi Mamdani digunakan untuk menentukan keluaran fuzzy berdasarkan aktivasi rule yang relevan.

Output yang dihasilkan dari proses inferensi masih berupa nilai fuzzy sehingga memerlukan tahap Defuzzifikasi untuk mengubahnya menjadi nilai tegas (crisp value). Nilai tegas ini selanjutnya mewakili kondisi akhir pengemudi dan ditampilkan pada modul Output, yang mengklasifikasikan kondisi pengemudi ke dalam kategori seperti Normal, Mengantuk, atau Menguap. Tahap output ini juga dapat digunakan untuk memicu sistem alarm atau fungsi lanjutan lainnya dalam implementasi sistem fisik.

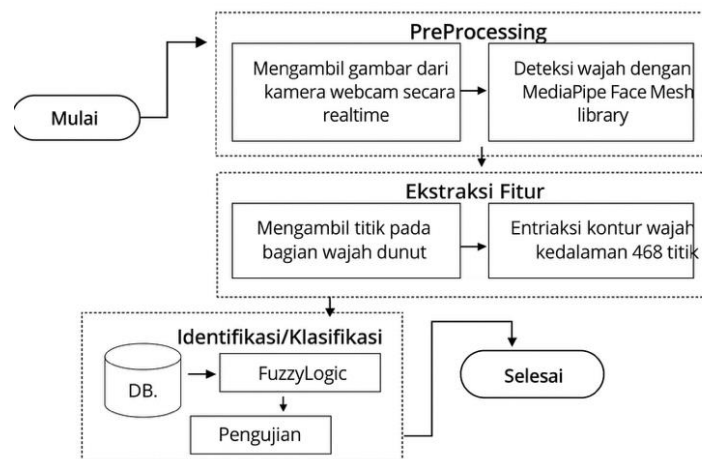
2.2 Analisis Data

Alur kerja sistem dimulai dengan pengambilan gambar dari kamera *webcam* yang terpasang pada mobil pengemudi. Data ini kemudian diolah oleh FLC yang menggunakan metode inferensi untuk mengevaluasi tingkat kelelahan. Berikut adalah langkah-langkah dalam alur kerja sistem:

1. Pengumpulan Data: Sensor mengirimkan data kelelahan secara *realtime* ke FLC.
2. *Fuzzyfikasi*: Mengubah data numerik menjadi nilai *fuzzy* berdasarkan fungsi keanggotaan yang telah ditentukan.
3. Aturan *Fuzzy*: Menggunakan aturan *IF-THEN* untuk menentukan output berdasarkan nilai *fuzzy*.
4. Inferensi: Menggabungkan aturan *fuzzy* untuk mendapatkan output *fuzzy*.
5. *Defuzzyfikasi*: Mengubah output *fuzzy* kembali menjadi nilai numerik yang merepresentasikan tingkat kelelahan. Aksi Korektif: Jika tingkat kelelahan melewati ambang batas, sistem akan mengaktifkan peringatan atau aksi korektif.

Gambaran sistem ditunjukkan pada Gambar 2 yang dimulai dari proses *preprocessing* dengan perekaman dari kamera *webcam* sampai hasil pendeteksian atau identifikasi. Dimulai dari proses *preprocessing* yang terdiri dari 2 proses yakni mengambil data dari *webcam* secara *realtime* setelah gambar diambil lalu wajah akan dideteksi dengan media *pipe face library* setelah itu kita masuk pada proses ekstraksi fitur yaitu mengambil titik pada bagian wajah dan mulut, setelah itu ekstraksi kontur wajah ke dalam 486 titik. Masuk pada proses identifikasi atau klasifikasi, kemudian dilakukan penyimpanan data ke dalam *database* setelah itu akan diterjemahkan suatu besaran yang diekspresikan. Pada sistem pengaturan kecepatan berbasis Fuzzy Logic, besaran laju kendaraan direpresentasikan dalam bentuk himpunan linguistik seperti pelan, agak cepat, cepat, dan sangat cepat, yang masing-masing didefinisikan melalui fungsi keanggotaan pada semesta pembicaraan tertentu untuk menghasilkan respons yang halus dan adaptif. Proses ini diawali dengan penentuan variabel input dan output beserta rentang nilainya, kemudian dilanjutkan dengan pembentukan fungsi keanggotaan agar setiap kondisi kecepatan memiliki derajat keanggotaan yang proporsional terhadap nilai input. Selanjutnya, rangkaian aturan IF–THEN disusun untuk menghubungkan kondisi input, seperti jarak kendaraan terhadap

objek di depan, dengan keluaran kecepatan kendaraan sesuai kategori linguistik yang telah ditetapkan. Tahap inferensi dilakukan dengan metode Mamdani melalui proses fuzzifikasi, implikasi, agregasi, dan diakhiri dengan defuzzifikasi menggunakan metode centroid guna memperoleh nilai kecepatan tegas yang akan dieksekusi oleh sistem. Setelah rancangan fuzzy tersusun, sistem kemudian memasuki proses pengujian melalui simulasi, pengujian perangkat keras, dan evaluasi lapangan untuk memastikan bahwa keluaran kecepatan yang dihasilkan akurat, responsif, stabil, serta konsisten terhadap perubahan kondisi input.



Gambar 2 Alur kerja sistem

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Implementasi Algoritma Fuzzy Logic

a. Pembentukan Fuzzy

Pembentukan Fuzzy Set: *Fuzzy* set adalah kunci dari sistem logika *fuzzy*, yang memungkinkan objek memiliki nilai keanggotaan yang berkelanjutan antara 0 dan 1[11]. Dalam konteks deteksi kelelahan pengemudi:

- 1) *Fuzzy* set untuk kelopak mata mungkin termasuk 'terbuka lebar', 'setengah
- 2) *Fuzzy* set untuk menguap mungkin termasuk 'tidak menguap', 'menguap ringan', dan 'menguap lebar'.

Fungsi Keanggotaan: Fungsi keanggotaan digunakan untuk mengkuantifikasi tingkat keanggotaan input dalam *fuzzy* set[12]. Misalnya: Fungsi keanggotaan untuk kelopak mata berupa fungsi trapesium yang menentukan seberapa 'tertutup' kelopak mata tersebut. Fungsi keanggotaan untuk menguap dapat mengukur durasi dan frekuensi menguap dalam periode waktu tertentu.

Inferensi Fuzzy: *Inferensi fuzzy* adalah proses untuk menentukan output berdasarkan aturan *fuzzy* dan nilai keanggotaan input :

- 1) Jika kelopak mata 'tertutup' DAN menguap 'lebar', maka pengemudi 'sangat lelah'.
- 2) Jika kelopak mata 'setengah terbuka' DAN tidak ada menguap, maka pengemudi 'tidak lelah'.

b. Defuzzifikasi

Defuzzifikasi adalah proses mengubah informasi *fuzzy* menjadi keputusan nyata atau tindakan. Dalam sistem deteksi kelelahan:

- 1) Metode *defuzzifikasi* seperti '*centroid*' atau '*bisector*' dapat digunakan untuk menentukan tingkat kelelahan secara numerik.
- 2) Output numerik ini kemudian dapat digunakan untuk mengaktifkan alarm atau sistem peringatan lainnya jika tingkat kelelahan melewati ambang batas tertentu.

c. Penyusunan *Fuzzy Set* dan *Rule Base*

Pada tahap ini, dilakukan penyusunan *fuzzy set* dan *rule base* untuk mengimplementasikan algoritma *fuzzy logic* dalam deteksi kelelahan pengemudi. Proses deteksi kelelahan dimulai dengan membaca rasio mata (EAR) dan rasio mulut (MAR) pada setiap frame, kemudian membandingkannya dengan nilai ambang tertentu untuk menentukan apakah mata terpejam atau mulut terbuka lebar sebagai indikasi menguap. Ketika EAR berada pada nilai rendah yang menunjukkan mata tertutup, sistem akan meningkatkan penghitung durasi *breakcount_s* setiap frame, dan jika nilai ini mencapai 20 secara berurutan, maka sistem menyimpulkan bahwa pengemudi dalam kondisi mengantuk sehingga memicu peringatan visual maupun audio, mencatat peristiwa tersebut sebagai “Sleep,” serta mengubah status pendeteksi agar alarm tidak dipanggil berulang. Sebaliknya, jika mata kembali terbuka, penghitung kelelahan langsung direset dan status dikembalikan ke kondisi normal. Proses yang sama diterapkan pada deteksi menguap melalui MAR, di mana *breakcount_y* bertambah setiap kali mulut terdeteksi terbuka lebar, dan ketika mencapai ambang 20 frame, sistem memicu alarm, mencatat kejadian sebagai “Yawn,” serta memperbarui status pendeteksi hingga mulut kembali normal dan seluruh penghitung direset. Dengan demikian, sistem berjalan secara terus-menerus melalui pemantauan rasio mata dan mulut, akumulasi durasi aktivitas abnormal, pemicu alarm, pencatatan data, dan reset kondisi, sehingga mampu mendeteksi kelelahan pengemudi secara real-time.

3.2 Pengujian

Pengujian sistem deteksi kelelahan dilakukan dengan merujuk pada lima aturan fuzzy utama yang disusun berdasarkan kombinasi nilai EAR, MAR, dan durasi, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel Rule Base. Pada skenario pertama, kondisi normal terjadi ketika nilai EAR berada pada rentang terbuka ($\approx 54-55$), MAR berada pada kondisi normal (≈ 21), dan durasi sangat singkat sehingga sistem mengklasifikasikan status sebagai *Normal* tanpa memicu alarm. Skenario berikutnya menggambarkan kondisi mengantuk, yaitu ketika EAR berada pada kategori terpejam ($\leq 50-55$) dan durasi berlangsung lama secara konsisten, sementara MAR tetap normal; kondisi ini sesuai dengan beberapa rule yang menghasilkan keluaran *Mengantuk*. Selanjutnya, kondisi menguap terdeteksi ketika EAR tetap terbuka namun MAR berada pada kategori menguap (≥ 60) dengan durasi yang cukup lama, sehingga sistem mengaktifkan keluaran *Yawn Alert*.

Dengan menggunakan logika *fuzzy*, variabel input seperti tingkat kedipan mata, ukuran mulut terbuka, dan variabel kondisi wajah normal dapat diubah menjadi himpunan *fuzzy* dengan fungsi keanggotaan yang sesuai. Kemudian, aturan *fuzzy* dapat digunakan untuk menghubungkan variabel input dengan variabel output, yaitu skor deteksi.

Tabel 1. *Rule base fuzzy*

No.	Rule (IF ... THEN ...)	Label Fuzzy yang Digunakan
1	IF EAR Terbuka AND MAR Normal AND Durasi Singkat THEN Output = Normal	EAR $\approx 54-55$, MAR ≈ 21 , Durasi rendah
2	IF EAR Terpejam AND MAR Normal AND Durasi Lama THEN Output = Mengantuk	EAR $\leq 50-55$, MAR normal, durasi lama
3	IF EAR Terbuka AND MAR Menguap AND Durasi Lama THEN Output = Yawn Alert	EAR ≈ 55 , MAR ≥ 60
4	IF EAR Terpejam AND MAR Normal AND Durasi Lama THEN Output = Mengantuk	EAR \leq ambang 50–55
5	IF EAR Terpejam AND MAR Normal AND Durasi Lama THEN Output = Mengantuk	EAR \leq ambang 50–55

Tabel 1 menunjukkan struktur aturan *fuzzy* yang dapat digunakan dalam pengujian ini. Dalam implementasi nyata, aturan *fuzzy* dapat disesuaikan dan diperluas sesuai dengan kebutuhan dan data yang ada. Dengan menggunakan aturan *fuzzy* yang telah ditentukan, skor deteksi dapat dihitung berdasarkan nilai keanggotaan variabel input. Maka alarm akan diaktifkan; jika tidak, alarm akan dimatikan.

Tabel 2 Skenario Pengujian

No.	EAR (Mata)	MAR (Mulut)	Durasi	Deskripsi	Output yang Diharapkan
1	Terbuka	Normal	Singkat	Kondisi normal pada pencahayaan terang; mata berada pada rasio 54–55 dan mulut pada rasio normal (≈ 21).	Normal
2	Terpejam	Normal	Lama	Mata tertutup pada pencahayaan terang; rasio EAR mencapai nilai ambang deteksi mengantuk.	Mengantuk
3	Terbuka	Terbuka	Lama	Mulut menguap pada pencahayaan terang; MAR melampaui nilai ambang sehingga terdeteksi sebagai menguap.	Mengantuk
4	Terbuka	Normal	Singkat	Kondisi normal pada pencahayaan gelap; EAR masih stabil (± 51 – 53) dan MAR tetap rendah.	Normal
5	Terpejam	Normal	Lama	Mata tertutup pada pencahayaan gelap; nilai EAR sudah berada di bawah ambang pemicu deteksi mengantuk.	Mengantuk
6	Terbuka	Terbuka	Lama	Mulut menguap pada pencahayaan gelap; wajah sedikit ditinggikan namun MAR tetap melampaui ambang.	Mengantuk
7	Terpejam	Normal	Lama	Mata tertutup pada pencahayaan gelap dengan sudut kamera dari bawah; EAR melewati ambang deteksi.	Mengantuk
8	Terpejam	Normal	Lama	Mata tertutup pada pencahayaan gelap dengan wajah sedikit direndahkan; EAR memenuhi ambang deteksi mengantuk.	Mengantuk

Tabel 2 menyajikan delapan skenario pengujian yang disusun berdasarkan variasi nilai EAR, MAR, serta durasi sebagai variabel fuzzy yang berperan dalam proses inferensi untuk menentukan tingkat kelelahan pengemudi. Setiap skenario dirancang secara sistematis dengan mempertimbangkan kondisi yang secara realistis dapat terjadi selama aktivitas berkendara, baik pada lingkungan pencahayaan terang maupun gelap, serta variasi posisi wajah terhadap kamera. Dengan demikian, skenario-skenario ini tidak hanya mencakup kondisi normal dan keadaan transisi menuju kelelahan, tetapi juga mencerminkan situasi ekstrem seperti mata terpejam berkepanjangan maupun mulut menguap dalam durasi lama. Pendekatan ini memungkinkan dilakukannya validasi menyeluruh terhadap kinerja sistem dalam mendeteksi perubahan fisiologis yang signifikan, sekaligus mengukur konsistensi algoritma dalam mengklasifikasikan status pengemudi secara akurat mulai dari kondisi sadar sepenuhnya hingga tingkat kelelahan berat.

Tabel 3 Hasil Pengujian

No.	Kondisi Pencahayaan	Posisi Wajah	Deskripsi Kondisi	Rasio Mata (EAR)	Rasio Mulut (MAR)	Hasil Deteksi
1	Terang	Depan	Kondisi normal; mata terbuka; mulut normal	55–54	21	Normal
2	Terang	Depan	Mata tertutup; rasio mencapai ambang deteksi	≤ 55	Normal	Mengantuk
3	Terang	Depan	Mulut menguap; rasio MAR melampaui ambang	Normal	≥ 60	Mengantuk
4	Gelap	Depan	Kondisi normal; sensor tetap mendeteksi dengan baik	53–51	21	Normal
5	Gelap	Depan	Mata tertutup; rasio memenuhi ambang deteksi	≤ 50	Normal	Mengantuk
6	Gelap	Depan (wajah ditinggikan)	Mulut menguap; posisi wajah sedikit naik	Normal	≥ 60	Mengantuk
7	Gelap	Bawah	Mata tertutup; wajah sedikit ditinggikan	\leq ambang	Normal	Mengantuk
8	Gelap	Atas	Mata tertutup; wajah sedikit diturunkan	\leq ambang	Normal	Mengantuk

Selanjutnya untuk memastikan reliabilitas dan validitas sistem deteksi kelelahan berbasis Fuzzy Logic, dilakukan serangkaian pengujian eksperimental yang dirancang secara sistematis untuk memverifikasi kemampuan sistem dalam mengidentifikasi perubahan fisiologis yang menjadi indikator utama kelelahan pengemudi. Pengujian difokuskan pada tiga parameter utama, yaitu Eye Aspect Ratio (EAR), Mouth Aspect Ratio (MAR), dan durasi aktivitas, yang masing-masing dikonversi ke dalam himpunan fuzzy melalui fungsi keanggotaan. Tabel 3 menyajikan hasil pengujian pada kondisi terang dan kondisi gelap.

Pengujian sistem deteksi kelelahan dilakukan melalui delapan skenario dengan variasi kondisi pencahayaan serta perubahan posisi wajah terhadap kamera untuk mengevaluasi stabilitas, akurasi, dan robustnes algoritma dalam mengenali perubahan nilai Eye Aspect Ratio (EAR) dan Mouth Aspect Ratio (MAR). Secara umum, seluruh skenario menunjukkan bahwa sistem mampu mengidentifikasi kondisi normal, mengantuk, maupun menguap berdasarkan ambang nilai yang telah ditetapkan, baik dalam lingkungan bercahaya terang maupun gelap. Gambar 3 menunjukkan perbedaan kondisi cahaya pada pengujian sistem.

Pada Percobaan 1, sistem mampu mendeteksi kondisi normal dengan akurat, ditunjukkan oleh nilai EAR pada kisaran 54–55 dan MAR sebesar 21, yang berada jauh di bawah ambang deteksi menguap ($MAR > 60$). Kondisi ini menunjukkan bahwa pada pencahayaan terang, sistem dapat mengidentifikasi keadaan mata terbuka tanpa mengalami gangguan sensitivitas. Selanjutnya, Percobaan 2 memperlihatkan bahwa ketika nilai EAR jatuh di bawah ambang ≤ 55 , sistem secara konsisten mengklasifikasikan kondisi tersebut sebagai keadaan mengantuk. Hal ini menunjukkan bahwa model EAR efektif dalam mendeteksi durasi pejam mata yang melampaui kedipan normal.



Gambar 3 Pengujian Sistem

Pada Percobaan 3, nilai MAR yang meningkat melebihi nilai ambang menguap ($MAR \geq 60$) berhasil dikenali oleh sistem sebagai tanda menguap. Pendeteksian ini tetap stabil dengan posisi wajah menghadap kamera secara frontal, sehingga validasi menunjukkan bahwa fitur MAR dapat digunakan sebagai indikator kelelahan berbasis perilaku mulut.

Pergeseran ke kondisi pencahayaan rendah pada Percobaan 4 tetap menghasilkan klasifikasi kondisi normal yang sesuai, di mana EAR masih berada pada kisaran 51–53 dan MAR tetap pada nilai normal. Meskipun terjadi sedikit penurunan akurasi nilai EAR akibat pencahayaan gelap, sistem tetap tidak memicu alarm, yang menunjukkan toleransi yang baik terhadap variasi intensitas cahaya.

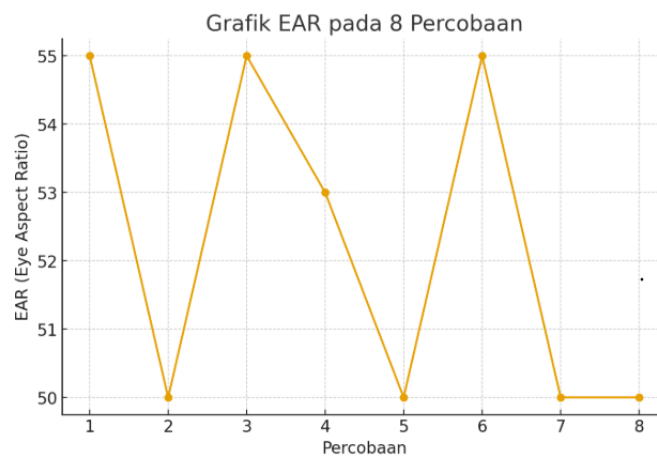
Pada Percobaan 5, sistem juga berhasil mendeteksi kondisi mengantuk ketika mata terpejam pada nilai EAR di bawah ambang melalui pengujian di lingkungan gelap. Hal ini menegaskan bahwa algoritma tetap stabil meskipun noise visual meningkat akibat rendahnya pencahayaan. Percobaan 6 memperlihatkan deteksi menguap yang tetap akurat meskipun posisi wajah sedikit ditinggikan, menunjukkan bahwa fitur MAR cukup robust terhadap perubahan pose selama rasio mulut tetap terbaca jelas oleh sistem.

Pada Percobaan 7 dan 8, posisi wajah yang tidak sepenuhnya menghadap depan sedikit diturunkan maupun ditinggikan masih menghasilkan pendeteksian kondisi mengantuk dengan benar. Hasil ini menunjukkan bahwa variasi sudut wajah tidak mengganggu kemampuan sistem dalam menghitung EAR secara signifikan, selama landmark mata tetap dapat teridentifikasi oleh algoritma.

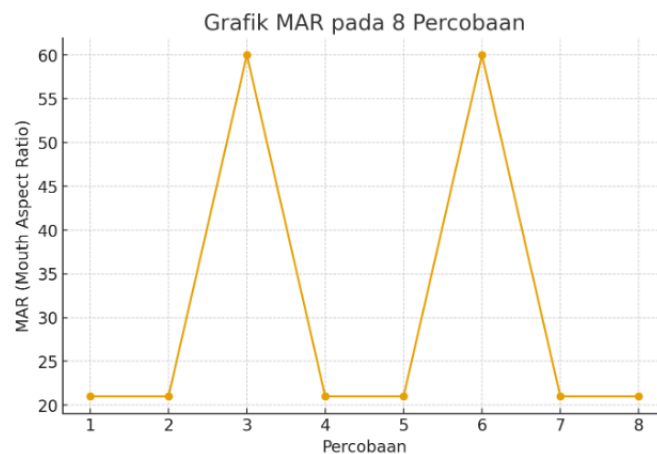
Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem deteksi kelelahan berbasis Fuzzy Logic mampu memberikan klasifikasi yang konsisten terhadap status pengemudi. Sistem dapat membedakan kondisi normal, mengantuk, dan menguap pada berbagai kondisi pencahayaan dan posisi wajah. Hal ini menunjukkan bahwa model rasio EAR dan MAR yang

digunakan memiliki robustnes yang baik terhadap variasi lingkungan, sehingga layak diimplementasikan sebagai sistem pemantauan kelelahan pengemudi secara real-time.

Evaluasi performa sistem deteksi kelelahan pengemudi, dilakukan analisis terhadap perubahan nilai Eye Aspect Ratio (EAR) dan Mouth Aspect Ratio (MAR) pada delapan percobaan dengan variasi kondisi pencahayaan dan posisi wajah. EAR digunakan sebagai indikator tingkat keterbukaan mata, sedangkan MAR digunakan untuk mendeteksi aktivitas mulut seperti menguap. Grafik yang ditampilkan pada Gambar 4 dan Gambar 5 memberikan gambaran kuantitatif mengenai dinamika kedua parameter tersebut pada setiap skenario pengujian. Visualisasi ini penting untuk melihat konsistensi respon sistem terhadap perubahan fisiologis pengemudi, serta untuk memvalidasi apakah nilai EAR dan MAR yang diukur sesuai dengan kondisi nyata yang diamati pada setiap percobaan.



Gambar 4 Grafik EAR



Gambar 5 Grafik MAR

Grafik MAR mengilustrasikan perubahan rasio keterbukaan mulut selama delapan percobaan. Pada sebagian besar percobaan (1, 2, 4, 5, 7, dan 8), nilai MAR berada pada kisaran 21, yang mengindikasikan kondisi mulut normal dan tidak sedang menguap. Namun, pada percobaan 3 dan 6, nilai MAR meningkat secara signifikan hingga mencapai 60, yang menunjukkan aktivitas menguap. Kenaikan ini selaras dengan kondisi nyata pada percobaan tersebut di mana subjek memang melakukan gerakan membuka mulut dengan lebar yang melebihi ambang batas deteksi menguap. Konsistensi pola peningkatan MAR pada kondisi menguap

menunjukkan bahwa MAR merupakan indikator yang stabil dan reliabel untuk mendeteksi perilaku menguap, bahkan ketika posisi wajah sedikit berubah atau tingkat pencahayaan menurun.

4. KESIMPULAN

Fuzzy Logic dapat digunakan sebagai metode yang efektif untuk mendeteksi kelelahan pengemudi mobil. Dengan menggunakan variabel input seperti tingkat kedipan mata, ukuran mulut terbuka, dan kondisi wajah normal, serta aturan *fuzzy* yang telah ditentukan, sistem dapat menghasilkan skor deteksi yang dapat menunjukkan tingkat kelelahan pengemudi. Evaluasi akurasi dilakukan melalui perbandingan antara keluaran deteksi mata dan mulut, yang direpresentasikan dalam nilai *Eye Aspect Ratio* (EAR) dan *Mouth Aspect Ratio* (MAR), dengan keputusan yang dihasilkan oleh sistem fuzzy. Hasil pengujian pada delapan skenario dengan variasi pencahayaan terang maupun gelap serta perbedaan posisi wajah menunjukkan bahwa sistem mampu mendeteksi tiga kondisi utama, yaitu normal, mengantuk, dan menguap, berdasarkan ambang EAR dan MAR yang telah ditetapkan. Nilai EAR yang turun hingga ≤ 50 –55 secara konsisten mengindikasikan kondisi mata terpejam dan diklasifikasikan sebagai mengantuk, sedangkan peningkatan MAR hingga ≥ 60 berhasil diidentifikasi sebagai aktivitas menguap. Variasi posisi wajah (depan, sedikit naik, sedikit turun) maupun intensitas cahaya tidak memberikan gangguan signifikan terhadap kinerja deteksi. Analisis visual melalui grafik EAR dan MAR semakin memperkuat temuan bahwa kedua parameter tersebut merupakan indikator yang sensitif dan stabil dalam merepresentasikan kondisi kelelahan pengemudi. Grafik EAR memperlihatkan pola penurunan yang konsisten pada kondisi mengantuk, sementara grafik MAR menunjukkan peningkatan tajam pada kondisi menguap. Hal ini menegaskan bahwa kombinasi kedua fitur tersebut memberikan kemampuan deteksi yang komprehensif baik pada perilaku mata maupun mulut.

REFERENSI

- [1] M. Daffa, A. Fauzan, S. Hardhienata, and M. Iqbal, "Implementasi Logika Fuzzy pada Pengaturan Jarak dan Kecepatan Mobil Otonom dengan Arduino," vol. 15, no. 1, pp. 1–13, 2025.
- [2] R. Samsinar, H. Isyanto, D. Almada, and F. Amrullah, "Sistem Monitoring Mendeteksi Mata Lelah Pada Pengemudi Kendaraan Besar Berbasis Pengolahan Citra," *Resist. (elektRONika kEndali Telekomun. tenaga List. kOMputeR)*, vol. 7, no. 1, pp. 77–84, 2024.
- [3] D. M. Samosir, A. B. Setyaji, and Y. Sukrawan, "Rancang bangun sistem peringatan kantuk pada pengendara sepeda motor berbasis fuzzy logic design and development of a drowsiness warning system for motorcyclists based on fuzzy logic," *SJME Kinemat.*, vol. 9, no. 1, pp. 84–97, 2024, doi: 10.20527/sjmekinematika.v9i1.311.
- [4] S. Ismail, "Evaluasi Tingkat Keberhasilan Pembelajaran Online dengan menggunakan Metode Fuzzy Mamdani," vol. 5, no. 2, pp. 36–49, 2022.
- [5] A. Asvin, M. Suradi, S. Alam, and M. F. Rasyid, "Sistem Deteksi Kantuk Pengemudi Mobil Berdasarkan Analisis Rasio Mata Menggunakan Computer Vision," vol. 5, pp. 222–230, 2023.
- [6] A. Zikri, "RANCANG BANGUN SISTEM PENDETEKSI KANTUK UNTUK KEAMANAN BERKENDARA BERBASIS WEBSITE Ahmad," *J. Sains Inform. Terap.*, vol. 04, no. 03, pp. 508–516, 2025.
- [7] A. R. (2024) Bagraff, "Deteksi Kelelahan Pengemudi Mobil Berdasarkan Variabel Subjek, Kendaraan, dan Lingkungan Menggunakan Type-2 Fuzzy System," 2024.
- [8] T. G. Aulia, "Sistem Tertanam Berbasis Image Processing Ekstraksi Fitur Ekspresi Wajah untuk Deteksi Kantuk PengemudiNo Title," 2024.
- [9] F. T. Nugroho and E. I. Sela, "Deteksi Citra Wajah Menggunakan Algoritma Haar Cascade Classifier," *MALCOM Indones. J. Mach. Learn. Comput. Sci.*, vol. 4, no. 1, pp. 37–44,

- 2023, doi: 10.57152/malcom.v4i1.988.
- [10] M. A. Yahya, A. B. Yunanda, M. Sidqon, A. Kridoyono, T. Informatika, and J. Timur, “DENGAN NOTIFIKASI LOKASI MELALUI TELEGRAM,” vol. 13, no. 3, pp. 229–240, 2024.
 - [11] D. Hidayani and M. Romadhani, “Pendekatan Deep Learning untuk Deteksi Kantuk dengan YOLOv12,” vol. 01, no. 1, pp. 5–10, 2025.
 - [12] M. F. Rustan, M. F. Mansyur, and M. A. Akbar, “Smart Monitoring Hidroponik Berbasis Internet of Things,” vol. 4, no. 2, pp. 51–61, 2021, doi: 10.22146/jcis.xxxx.