

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Landasan Teori**

##### **2.1.1 Citra Digital**

Citra digital adalah representasi visual dari sebuah gambar dalam bentuk data digital, yang terdiri dari piksel-piksel kecil yang disusun dalam bentuk grid atau matriks. Setiap piksel memiliki nilai tertentu yang merepresentasikan intensitas warna atau kecerahan pada posisi tersebut dalam gambar. Citra digital dapat diperoleh melalui berbagai cara, seperti pemindaian (*scanning*) gambar fisik, pengambilan gambar dengan kamera digital, atau pembuatan gambar menggunakan perangkat lunak grafis. Citra digital digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk fotografi digital, pemrosesan citra, analisis video, dan visualisasi data (Jumadi dkk., 2021).

Pengelolaan citra digital mencakup proses akuisisi, penyimpanan, pemrosesan, dan analisis gambar digital. Proses akuisisi melibatkan pengambilan gambar dari sumber fisik atau digital, seperti menggunakan *scanner* atau kamera digital. Setelah diakuisisi, gambar disimpan dalam format digital yang sesuai, seperti JPEG, PNG, atau TIFF, yang masing-masing memiliki karakteristik dan kegunaan khusus. Penyimpanan citra digital yang efisien dan aman sangat penting, terutama untuk aplikasi yang memerlukan arsip gambar dalam jumlah besar (Dijaya, 2023).

Pemrosesan citra digital mencakup berbagai teknik untuk meningkatkan kualitas gambar, seperti penyesuaian kontras, penghilangan noise, dan koreksi warna. Teknik-teknik ini membantu dalam mempersiapkan gambar untuk analisis lebih lanjut atau untuk presentasi visual yang lebih baik. Analisis citra digital melibatkan ekstraksi informasi penting dari gambar, seperti pengenalan objek, deteksi tepi, segmentasi gambar, dan klasifikasi (Dijaya, 2023).

### 2.1.2 *Computer Vision*

*Computer Vision* adalah bidang ilmu yang mempelajari bagaimana komputer dapat memperoleh, memproses, dan memahami data visual dari dunia nyata. Hal ini mencakup berbagai teknik untuk menangkap dan menganalisis gambar digital dan video, memungkinkan komputer untuk "melihat" dan membuat keputusan berdasarkan informasi visual tersebut. Secara prinsip, *Computer Vision* berfungsi mirip dengan *Artificial Intelligence*. *Computer Vision* mampu mengklasifikasikan berbagai jenis objek dalam gambar, seperti foto lalu lintas, dengan mengidentifikasi jenis kendaraan. Selain itu, CV juga dapat mendeteksi objek dengan menentukan lokasinya dalam gambar, kemudian mengklasifikasikan objek tersebut. Seperti, *Computer Vision* dapat mendeteksi kepadatan lalu lintas dari rekaman CCTV dengan mengenali dan mengklasifikasikan kendaraan, lalu menyimpulkan kondisi lalu lintas tersebut padat atau lancar (Kadi dkk., 2023).

OpenCV (*Open Source Computer Vision Library*) adalah pustaka *Computer Vision* berbasis *open-source* yang menyediakan alat dan fungsi untuk menangani berbagai tugas pengelolaan citra, termasuk pembacaan gambar, pengubahan ukuran, pengenalan pola, dan banyak lagi (Pratama dkk., 2022).

### 2.1.3 Algoritma *Face Mesh*

Algoritma *face mesh* adalah teknik dalam visi komputer yang digunakan untuk mendeteksi dan melacak titik-titik fitur penting pada wajah manusia. Algoritma ini mampu menghasilkan model 3D dari wajah dengan menggunakan titik-titik yang disebut sebagai "landmarks". Titik-titik ini mencakup berbagai fitur wajah seperti mata, hidung, bibir, dan tepi wajah. Algoritma *face mesh* sering digunakan dalam aplikasi seperti *augmented reality*, animasi wajah, analisis ekspresi wajah (Hangaragi dkk., 2022).

Algoritma *face mesh* memiliki aplikasi yang luas dalam bidang keamanan, terutama dalam identifikasi biometric, dengan kemampuannya untuk secara akurat melacak titik-titik fitur pada wajah. Algoritma ini digunakan dalam sistem pengenalan wajah untuk mengamankan akses ke perangkat, data, atau area terbatas. Selain itu, dalam industri keamanan dan penegakan hukum, *face mesh* membantu dalam identifikasi individu dari rekaman video CCTV atau pengawasan lalu lintas. Pengintegrasian teknologi *face mesh* dalam sistem pengamanan modern, pengguna dapat merasakan tingkat keamanan yang lebih tinggi serta peningkatan dalam efisiensi identifikasi dan pengawasan (Feng dkk., 2018).

### 2.1.4 *FaceMeshDetector*

*FaceMeshDetector* adalah modul dalam pustaka *cvzone* yang memanfaatkan algoritma dari *MediaPipe* untuk mendeteksi dan melacak titik-titik pada wajah secara real-time. Modul ini memungkinkan identifikasi fitur wajah penting seperti mata, hidung, dan mulut, serta menghitung jarak antar titik-titik tersebut untuk analisis lebih lanjut (LLC, 2020).

### 2.1.5 *Eye Aspect Ratio (EAR)*

*Eye Aspect Ratio* (EAR) adalah rasio antara jarak vertikal dan horizontal dari mata yang digunakan untuk mendeteksi kantuk. EAR yang rendah secara konsisten menunjukkan bahwa mata tertutup, yang merupakan indikator kantuk (Phan dkk., 2025).

EAR dihitung dengan menggunakan koordinat enam titik pada kontur mata yang terdeteksi oleh algoritma pengenalan wajah. Titik-titik ini dikelompokkan menjadi tiga pasang titik vertikal dan satu pasang titik horizontal. Rumusnya terdapat pada persamaan (2.1) (Sugeng & Nizar, 2023):

$$EAR = \frac{|P_2 - P_6| + |P_3 - P_5|}{2 \times |P_1 - P_4|} \quad (2.1)$$

Di mana:

1.  $P_1$  hingga  $P_6$  adalah titik-titik pada kontur mata.
2.  $|P_i - P_j|$  adalah jarak Euclidean antara titik  $P_i$  dan  $P_j$ .

Interpretasi:

1. EAR tinggi menunjukkan mata terbuka.
2. EAR rendah menunjukkan mata tertutup atau hampir tertutup.

### 2.1.6 *Mouth Aspect Ratio (MAR)*

*Mouth Aspect Ratio* (MAR) adalah rasio antara jarak vertikal dan horizontal dari mulut. MAR yang tinggi dapat menunjukkan bahwa mulut terbuka lebar, yang merupakan indikator menguap.

MAR dihitung menggunakan koordinat delapan titik pada kontur mulut yang terdeteksi oleh algoritma pengenalan wajah. Titik-titik ini dikelompokkan menjadi dua pasang titik vertikal dan satu pasang titik horizontal. Rumusnya terdapat pada persamaan (2.2) (Albadawi dkk., 2023):

$$MAR = \frac{\sqrt{P_2 - P_8} + \sqrt{P_3 - P_7} + |P_4 - P_6|}{3 \times |P_1 - P_5|} \quad (2.2)$$

Di mana:

1.  $P_1$  hingga  $P_8$  adalah titik-titik pada kontur mulut.
2.  $|P_i - P_j|$  adalah jarak Euclidean antara titik  $P_i$  dan  $P_j$ .

Interpretasi:

1. MAR tinggi menunjukkan mulut terbuka lebar (misalnya menguap atau tertawa).
2. MAR rendah menunjukkan mulut tertutup atau sedikit terbuka.

### 2.1.7 *Drowsiness Detection*

Deteksi kantuk adalah proses identifikasi tanda-tanda kantuk pada seseorang, seperti mata yang tertutup atau mulut yang menguap, menggunakan metode seperti *Eye Aspect Ratio* (EAR) dan *Mouth Aspect Ratio* (MAR). EAR mengukur perubahan dalam pembukaan mata, sementara MAR mengukur tingkat keterbukaan mulut untuk mendeteksi tanda-tanda menguap. Deteksi kantuk ini sangat penting untuk aplikasi keamanan, terutama dalam sistem pemantauan pengemudi untuk mencegah kecelakaan yang disebabkan oleh kantuk. Teknologi ini memungkinkan kendaraan modern dapat memberikan peringatan dini kepada pengemudi yang menunjukkan tanda-tanda kantuk, sehingga memungkinkan

pengemudi untuk mengambil tindakan pencegahan seperti berhenti untuk beristirahat sebelum terjadi kecelakaan (Sugeng & Nizar, 2023).

### **2.1.8 Pyglet**

*Pyglet* adalah pustaka pemrograman *Python* yang digunakan untuk mengembangkan aplikasi multimedia dan *game* dengan *OpenGL*. *Pyglet* memungkinkan rendering grafik 2D dan 3D, pemutaran audio dalam berbagai format seperti WAV dan MP3, serta menangani input dari perangkat seperti *mouse* dan *keyboard*. Pustaka ini tidak memerlukan instalasi tambahan selain *Python* standar dan kompatibel dengan berbagai sistem operasi termasuk *Windows*, *macOS*, dan *Linux*, membuatnya ideal untuk pengembangan aplikasi yang membutuhkan interaktivitas tinggi dan distribusi yang mudah (Holkner, 2023). Pada penelitian ini, *pyglet* digunakan untuk memuat dan memutar suara alarm ketika tanda kantuk atau menguap terdeteksi.

## 2.2 Penelitian Terkait (*State of the Art*)

Penelitian terkait akan menjawab pertanyaan yang berhubungan pada permasalahan penerapan teknologi untuk pengembangan sistem pendeteksian kantuk pada pengendara. Tabel 2.1 merupakan penelitian mengenai Sistem Deteksi Kantuk Pada Pengendara.

Tabel 2.1 Penelitian Terkait (*State of the Art*)

No	Peneliti	Judul	Tujuan	Persamaan Penelitian Terkait dengan Penelitian yang Dilakukan	Perbedaan Penelitian Terkait dengan Penelitian yang Dilakukan
1.	(Hidayani dkk, 2025)	Pendekatan <i>Deep Learning</i> untuk Deteksi Kantuk dengan YOLOv12	Mengembangkan sistem deteksi kantuk pengemudi berbasis <i>computer vision</i> secara <i>real-time</i> menggunakan algoritma YOLOv12 dengan evaluasi performa menggunakan <i>precision, recall, F1-score</i> , dan <i>mAP</i>	Meneliti sistem deteksi kantuk pengendara berbasis pengolahan citra wajah secara <i>real-time</i> serta mengevaluasi performa sistem menggunakan metrik <i>precision, recall</i> , dan <i>F1-score</i>	<p><b>Penelitian Terkait:</b> Menggunakan algoritma <i>deep learning</i> YOLOv12 yang memerlukan proses pelatihan model dan dataset beranotasi.</p> <p><b>Penelitian yang Dilakukan:</b> Menggunakan algoritma <i>Face Mesh</i> berbasis EAR dan MAR tanpa penambahan model <i>deep learning</i> serta menganalisis pengaruh variasi jarak dan</p>

No	Peneliti	Judul	Tujuan	Persamaan Penelitian Terkait dengan Penelitian yang Dilakukan	Perbedaan Penelitian Terkait dengan Penelitian yang Dilakukan
					kondisi pencahayaan terhadap kinerja sistem.
2.	(Ritonga & Muhandhis, 2024)	Analisis dan Implementasi Metode <i>Viola-Jones</i> dan CNN pada Sistem Deteksi Kantuk <i>Real-Time</i>	Mengembangkan sistem deteksi kantuk berbasis visi komputer secara real-time menggunakan kombinasi metode <i>Viola-Jones</i> dan <i>Convolutional Neural Network</i> (CNN) untuk mengklasifikasikan kondisi mata sebagai indikator kantuk	Meneliti deteksi kantuk pengendara berbasis pengolahan citra wajah secara <i>real-time</i> dan mengevaluasi performa sistem menggunakan metrik <i>accuracy</i> , <i>precision</i> , <i>recall</i> , dan <i>F1-score</i>	<p><b>Penelitian Terkait:</b> Menggunakan kombinasi <i>Viola-Jones</i> dan CNN dengan proses <i>training model deep learning</i>.</p> <p><b>Penelitian yang Dilakukan:</b> Menggunakan algoritma <i>Face Mesh</i> berbasis EAR dan MAR tanpa penambahan model deep learning serta mengevaluasi pengaruh variasi jarak dan kondisi pencahayaan</p>
3.	(Samsinar dkk., 2024)	Sistem Monitoring Mendeteksi Mata	Membangun sistem otomatis berbasis pengolahan citra	Berfokus pada penggunaan pengolahan citra wajah untuk	<b>Penelitian Terkait:</b>

No	Peneliti	Judul	Tujuan	Persamaan Penelitian Terkait dengan Penelitian yang Dilakukan	Perbedaan Penelitian Terkait dengan Penelitian yang Dilakukan
		Lelah Pada Pengemudi Kendaraan Besar Berbasis Pengolahan Citra	untuk mendeteksi tanda-tanda kantuk pada pengemudi kendaraan besar (truk logistik) secara dini, sehingga dapat mencegah kecelakaan akibat kelelahan dan rasa kantuk.	mendeteksi tingkat kantuk pengemudi melalui pergerakan mata.	<p>Mengembangkan sistem deteksi kantuk berbasis pengolahan citra yang diintegrasikan dengan perangkat keras seperti Raspberry Pi, <i>webcam</i>, dan <i>speaker</i> untuk memberikan peringatan langsung kepada pengemudi truk logistik.</p> <p><b>Penelitian yang Dilakukan:</b> Hanya berfokus pada pengembangan dan pengujian program deteksi kantuk menggunakan algoritma <i>Face Mesh</i> tanpa melibatkan perangkat keras. Pengujian</p>

No	Peneliti	Judul	Tujuan	Persamaan Penelitian Terkait dengan Penelitian yang Dilakukan	Perbedaan Penelitian Terkait dengan Penelitian yang Dilakukan
					dilakukan menggunakan perangkat laptop untuk melihat efektivitas algoritma dalam mendeteksi kondisi kantuk pengemudi berdasarkan citra wajah.
4.	(A. Firdaus dkk., 2023)	Sistem Pendeteksi Kantuk Pengemudi berbasis <i>Eye Aspect Ratio</i> dan <i>Mouth Opening Ratio</i> menggunakan <i>Algoritme C-LSTM</i>	Mengembangkan dan mengevaluasi sistem pendeteksi kantuk pada pengemudi berbasis <i>Algoritme Convolutional Long Short-Term Memory (C-LSTM)</i> yang menggunakan parameter <i>Eye Aspect Ratio (EAR)</i> dan <i>Mouth Opening Ratio (MOR)</i> .	Penggunaan <i>Eye Aspect Ratio (EAR)</i> dan <i>Mouth Opening Ratio (MOR)</i> sebagai parameter utama untuk mendeteksi kelelahan pengemudi, serta tujuan untuk meningkatkan keselamatan berkendara dengan mendeteksi kantuk secara <i>real-time</i> .	<p><b>Penelitian Terkait:</b> Menggunakan model <i>Convolutional Long Short-Term Memory (C-LSTM)</i>, yang lebih kompleks karena menggabungkan CNN untuk ekstraksi fitur dan LSTM untuk pemrosesan data sekuensial.</p> <p><b>Penelitian yang Dilakukan:</b></p>

No	Peneliti	Judul	Tujuan	Persamaan Penelitian Terkait dengan Penelitian yang Dilakukan	Perbedaan Penelitian Terkait dengan Penelitian yang Dilakukan
					Menggunakan <i>algoritme Face Mesh</i> untuk mendeteksi fitur wajah seperti mata dan mulut secara langsung, dan mengukur <i>Eye Aspect Ratio (EAR)</i> serta <i>Mouth Opening Ratio (MOR)</i> dari hasil deteksi yang dilakukan.
5.	(Florez dkk., 2023)	<i>A CNN-Based Approach for Driver Drowsiness Detection by Real-Time Eye State Identification</i>	Mengembangkan dan mengevaluasi sistem deteksi kantuk pengemudi yang efektif menggunakan teknik <i>deep learning</i> dan visualisasi Grad-CAM untuk meningkatkan keselamatan pengemudi di jalan raya.	Fokus pada deteksi kantuk pengemudi melalui analisis kondisi mata menggunakan teknologi pengolahan citra, untuk meningkatkan keselamatan di jalan raya melalui sistem deteksi kantuk yang akurat dan <i>real-time</i> .	<b>Penelitian Terkait:</b> Menggunakan model <i>deep learning</i> yang lebih kompleks dan membutuhkan dataset besar.  <b>Penelitian yang Dilakukan:</b> Menggunakan pendekatan yang lebih sederhana dan mudah

No	Peneliti	Judul	Tujuan	Persamaan Penelitian Terkait dengan Penelitian yang Dilakukan	Perbedaan Penelitian Terkait dengan Penelitian yang Dilakukan
					diimplementasikan secara <i>real-time</i> .
6.	(Indra dkk., 2023)	Implementasi Algoritma YoloV5 untuk Kantuk Detektor pada Pengemudi Kendaraan Bermotor secara <i>Realtime</i>	Mengembangkan, mengimplementasikan, dan mengevaluasi sistem deteksi kantuk pengemudi kendaraan bermotor berbasis <i>deep learning</i> dengan algoritma YoloV5 untuk meningkatkan keselamatan berkendara dan mengurangi angka kecelakaan yang disebabkan oleh kantuk.	Mengimplementasikan sebuah algoritma untuk sistem deteksi kantuk pada pengendara yang beroperasi secara <i>real-time</i> menggunakan pengolahan citra.	<p><b>Penelitian Terkait:</b> Menggunakan Algoritma YoloV5 untuk deteksi objek secara langsung melalui <i>deep learning</i> dan menggunakan pengendara motor sebagai objeknya.</p> <p><b>Penelitian yang Dilakukan:</b> Menggunakan Algoritma <i>Face Mesh</i> untuk pengukuran analitis dari titik-titik fitur wajah dan menggunakan pengendara mobil sebagai objeknya.</p>

No	Peneliti	Judul	Tujuan	Persamaan Penelitian Terkait dengan Penelitian yang Dilakukan	Perbedaan Penelitian Terkait dengan Penelitian yang Dilakukan
7.	(Kadi dkk., 2023)	Deteksi Kantuk Pengemudi Bus Trans Metro Bandung Dengan Pendekatan Rumus <i>Eye Aspect Ratio</i>	Meningkatkan keselamatan lalu lintas dengan menyediakan sistem yang efektif untuk mendeteksi kantuk pada pengemudi bus dengan menggunakan pendekatan <i>Eye Aspect Ratio</i> .	Penggunaan <i>Eye Aspect Ratio (EAR)</i> sebagai parameter utama untuk mendeteksi kelelahan pengemudi.	<p><b>Penelitian Terkait:</b> Fokus pada <i>Eye Aspect Ratio</i> (EAR), dengan menghitung jarak <i>Euclidean</i> antar 6 titik <i>facial landmarks</i> pada masing-masing mata untuk mendeteksi kantuk.</p> <p><b>Penelitian yang Dilakukan:</b> Menggunakan algoritma <i>Face Mesh</i> yang lebih kompleks dan mencakup lebih banyak titik pengenalan pada wajah, termasuk <i>Eye Aspect Ratio</i> (EAR) dan <i>Mouth Opening Ratio</i> (MOR) yang memberikan analisis lebih komprehensif.</p>

No	Peneliti	Judul	Tujuan	Persamaan Penelitian Terkait dengan Penelitian yang Dilakukan	Perbedaan Penelitian Terkait dengan Penelitian yang Dilakukan
8.	(Tri Atmojo dkk., 2023)	Sistem Pengenalan Wajah Menggunakan Algoritma <i>Haarcascade</i> dan <i>Local Binary Pattern Histogram</i>	Mengembangkan sistem monitoring kehadiran karyawan yang dapat mendeteksi dan mengenali wajah menggunakan algoritma <i>Haarcascade</i> dan <i>Local Binary Pattern Histogram</i> (LBPH).	Penerapan algoritma untuk analisis fitur wajah secara <i>real-time</i> .	<b>Penelitian Terkait:</b> Penggunaan algoritma <i>Haarcascade</i> dan <i>Local Binary Pattern Histogram</i> (LBPH) untuk monitoring kehadiran karyawan.  <b>Penelitian yang Dilakukan:</b> Penggunaan algoritma <i>Face Mesh</i> untuk mendeteksi wajah pengendara mobil yang mengantuk.
9.	(Hangaragi dkk., 2022)	<i>Face Detection and Recognition Using Face Mesh and Deep Neural Network</i>	Mengembangkan model deteksi dan pengenalan wajah menggunakan <i>Face Mesh</i> dan <i>Deep Neural Network</i> , dengan	Mengimplementasikan Algoritma <i>Face Mesh</i> untuk proses pengenalan wajah.	<b>Penelitian Terkait:</b> Penggunaan teknologi <i>Face Mesh</i> untuk deteksi dan pengenalan wajah yang digunakan untuk mengontrol

No	Peneliti	Judul	Tujuan	Persamaan Penelitian Terkait dengan Penelitian yang Dilakukan	Perbedaan Penelitian Terkait dengan Penelitian yang Dilakukan
			kemampuan beroperasi dalam berbagai kondisi dan mencapai akurasi pengenalan wajah sebesar 94,23%.		akses orang ke area terlarang atau memberikan izin akses ke ATM atau komputer. <b>Penelitian yang Dilakukan:</b> Penggunaan teknologi <i>Face Mesh</i> untuk deteksi kantuk pada pengemudi mobil.
10.	(Pardede dkk., 2022)	Deteksi Pengendara Mengantuk Menggunakan Metode <i>Eye Tracking</i> Berbasis Raspberry Pi	Mengurangi risiko kecelakaan dengan menciptakan alat yang dapat mendeteksi dan mengidentifikasi kantuk pada pengemudi menggunakan metode <i>Eye Tracking</i> berbasis Raspberry Pi, guna menghindari kondisi kantuk yang tidak tepat yang	Mendeteksi kondisi kantuk pada pengemudi, dengan menggunakan teknologi pengenalan wajah.	<b>Penelitian Terkait:</b> Menggunakan metode <i>Eye Tracking</i> berbasis <i>Raspberry Pi</i> .  <b>Penelitian yang Dilakukan:</b> Menggunakan algoritma <i>Face Mesh</i> .

No	Peneliti	Judul	Tujuan	Persamaan Penelitian Terkait dengan Penelitian yang Dilakukan	Perbedaan Penelitian Terkait dengan Penelitian yang Dilakukan
			dapat menyebabkan kecelakaan fatal saat mengemudi.		
11.	(Siallagan & Tri N, 2022)	<i>Machine Learning</i> Deteksi Kantuk Pengemudi Menggunakan <i>Facial Nerve Grading System 2.0 (Fngs2.0)</i> Pada Platform <i>Thinkspeak</i>	Mengembangkan sistem deteksi mata kantuk berbasis <i>Facial Landmarks Detection</i> dengan metode EAR dan MAR dari <i>Facial Nerve Grading System 2.0</i> yang diimplementasikan dalam platform <i>Thinkspeak</i> untuk memberikan peringatan <i>real-time</i> kepada pengemudi yang terdeteksi mengantuk.	Mengembangkan sistem deteksi kantuk pada pengemudi dengan menggunakan teknologi pengenalan wajah.	<b>Penelitian Terkait:</b> Menggunakan <i>Facial Nerve Grading System 2.0 (FNGS2.0)</i> dengan metode EAR dan MAR yang diimplementasikan pada platform <i>ThinkSpeak</i> .  <b>Penelitian yang Dilakukan:</b> Menggunakan Algoritma <i>Face Mesh</i> dengan pendekatan EAR dan MAR.
12.	(Zhu dkk., 2022)	<i>Research on a Real-Time Driver Fatigue Detection Algorithm</i>	Mengembangkan sebuah algoritma deteksi kelelahan pengemudi secara <i>real-time</i>	Berfokus pada penggunaan teknologi deteksi pada wajah untuk tujuan keselamatan, di	<b>Penelitian Terkait:</b> Mendeteksi kelelahan pengemudi secara <i>real-time</i>

No	Peneliti	Judul	Tujuan	Persamaan Penelitian Terkait dengan Penelitian yang Dilakukan	Perbedaan Penelitian Terkait dengan Penelitian yang Dilakukan
		<i>Based on Facial Video Sequences</i>	berbasis pada urutan video wajah untuk meningkatkan akurasi deteksi, dengan menggunakan titik-titik <i>landmark</i> wajah sebagai dasarnya, tanpa membutuhkan perangkat cerdas tambahan pada tubuh pengemudi.	mana keduanya menggunakan analisis <i>facial landmarks</i> untuk mendeteksi keadaan tertentu pada pengemudi.	berdasarkan urutan video wajah.  <b>Penelitian yang Dilakukan:</b> Mendeteksi kantuk pada pengemudi mobil secara <i>real-time</i> menggunakan <i>face mesh</i> .
13.	(Salman dkk, 2021)	<i>Driver Drowsiness Detection Using Ensemble Convolutional Neural Networks on YawDD</i>	Mengembangkan dan membandingkan beberapa model <i>Convolutional Neural Network</i> serta pendekatan <i>ensemble</i> untuk mendeteksi tingkat kantuk pengemudi berdasarkan ciri visual seperti menguap, kedipan	Meneliti deteksi kantuk pengemudi berbasis pengolahan citra/video wajah serta mengevaluasi performa sistem menggunakan metrik <i>precision, recall, dan F1-score</i>	<b>Penelitian terkait:</b> Menggunakan pendekatan <i>deep learning</i> berbasis CNN dan <i>ensemble</i> yang memerlukan dataset besar serta proses pelatihan model.

No	Peneliti	Judul	Tujuan	Persamaan Penelitian Terkait dengan Penelitian yang Dilakukan	Perbedaan Penelitian Terkait dengan Penelitian yang Dilakukan
			mata, pose, dan oklusi menggunakan dataset YawDD		<b>Penelitian yang Dilakukan:</b> Menggunakan algoritma <i>Face Mesh</i> berbasis EAR dan MAR tanpa penambahan model deep learning serta berfokus pada pengaruh variasi jarak dan kondisi pencahayaan terhadap kinerja sistem
14.	(S. Firdaus & Artika, 2021)	Deteksi Kelelahan Pengemudi Mobil Menggunakan Citra Wajah	Merancang sistem pendeteksi kelelahan pengemudi mobil secara <i>real-time</i> berdasarkan pengolahan citra wajah melalui analisis geometri mata dan mulut.	Berfokus pada penggunaan pengolahan citra wajah untuk mendeteksi kelelahan atau kantuk pengemudi melalui analisis area mata dan mulut.	<b>Penelitian Terkait:</b> Mengembangkan <i>prototype head unit</i> dengan kamera eksternal yang mendeteksi wajah secara <i>real-time</i> untuk menghitung rasio mata dan mulut dalam menentukan kondisi kelelahan pengemudi.

No	Peneliti	Judul	Tujuan	Persamaan Penelitian Terkait dengan Penelitian yang Dilakukan	Perbedaan Penelitian Terkait dengan Penelitian yang Dilakukan
					<p><b>Penelitian yang Dilakukan:</b> Berfokus pada pengujian algoritma <i>Face Mesh</i> untuk mendeteksi tanda-tanda kantuk pengemudi tanpa melibatkan perangkat keras atau pemasangan alat pada kendaraan.</p>
15.	(Ramadhani dkk., 2021)	Deteksi Kantuk pada Pengemudi Berdasarkan Penginderaan Wajah Menggunakan PCA dan SVM	Mengembangkan sebuah sistem untuk mendeteksi kantuk melalui ekspresi menguap pada pengemudi, menggunakan <i>Principal Component Analysis</i> (PCA) untuk ekstraksi ciri dan <i>Support Vector Machine</i> (SVM) untuk klasifikasi,	Berfokus pada pengembangan sistem untuk deteksi kantuk pada pengemudi.	<p><b>Penelitian Terkait:</b> Menggunakan PCA dan SVM berdasarkan penginderaan wajah.</p> <p><b>Penelitian yang Dilakukan:</b> Menggunakan Algoritma <i>Face Mesh</i> dan pendekatan EAR dan</p>

No	Peneliti	Judul	Tujuan	Persamaan Penelitian Terkait dengan Penelitian yang Dilakukan	Perbedaan Penelitian Terkait dengan Penelitian yang Dilakukan
			dengan target mencapai akurasi tinggi serta dapat diaplikasikan secara <i>real-time</i> pada kendaraan.		MAR untuk pendeteksian wajah.

Berdasarkan Tabel 2.1, penelitian terkait deteksi kantuk pengemudi banyak memanfaatkan pendekatan *deep learning*, seperti YOLOv5, YOLOv12, CNN, C-LSTM, serta *ensemble CNN*, dengan evaluasi menggunakan *metrik accuracy, precision, recall*, dan *F1-score*. Pendekatan tersebut mampu menghasilkan performa deteksi yang tinggi, namun bergantung pada dataset berukuran besar, proses pelatihan model yang kompleks, serta kebutuhan komputasi yang relatif tinggi. Selain itu, kinerja model *deep learning* sensitif terhadap ketidakseimbangan data dan kualitas anotasi, sehingga penerapannya pada sistem *real-time* berbasis perangkat dengan sumber daya terbatas masih menghadapi kendala.

Pendekatan berbasis parameter fisiologis seperti EAR dan MAR menawarkan sistem yang lebih ringan dan lebih mudah diterapkan secara *real-time*. Namun, sebagian penelitian masih mengandalkan *landmark* wajah konvensional atau mengombinasikannya dengan model pembelajaran tambahan. Pemanfaatan *Face Mesh* sebagai metode utama ekstraksi *landmark* tanpa

penambahan model *deep learning*, serta analisis performanya terhadap variasi jarak pengambilan citra dan kondisi pencahayaan, belum banyak dibahas secara komprehensif. Kondisi ini menunjukkan adanya peluang penelitian untuk mengevaluasi kinerja *Face Mesh* berbasis EAR dan MAR pada berbagai kondisi lingkungan yang mendekati penggunaan nyata.

### 2.3 Matriks Penelitian

Matriks penelitian merupakan perbandingan antara penelitian sebelumnya dengan penelitian yang akan dilakukan. Indikator untuk melakukan sebuah matriks penelitian, yaitu dari berbagai sumber jurnal yang telah dikaitkan pada *State of the Art*. Tabel 2.2 menggambarkan perbedaan atau persamaan penelitian yang diusulkan dengan penelitian-penelitian terkait.

Tabel 2.2 Matriks Penelitian

No	Judul	Penulis dan Tahun	Metode	Objek	Parameter	Metriks Evaluasi & Nilai Kinerja	Aspek Evaluasi & Implementasi		
							Jarak	Pencahayaan	Kamera Smartphone
1.	Pendekatan <i>Deep Learning</i> untuk Deteksi Kantuk dengan YOLOv12	(Hidayani dkk, 2025)	YOLOv12	Pengemudi Kendaraan	Deteksi visual wajah (kantuk/tidak kantuk)	<i>Precision:</i> 0,648 <i>Recall:</i> 0,928 <i>F1-score:</i> 0,72 <i>mAP@50:</i> 0,732 <i>mAP@50-95:</i> 0,62	-	-	-

No	Judul	Penulis dan Tahun	Metode	Objek	Parameter	Metriks Evaluasi & Nilai Kinerja	Aspek Evaluasi & Implementasi		
							Jarak	Pencahayaan	Kamera Smartphone
2.	Analisis dan Implementasi Metode <i>Viola-Jones</i> dan CNN pada Sistem Deteksi Kantuk <i>Real-Time</i>	(Ritonga & Muhandhis, 2024)	<i>Viola-Jones &amp; CNN</i>	Pengemudi Kendaraan	Kondisi mata (terbuka/tertutup)	<i>Accuracy: 91%</i> <i>Precision: 0,91</i> <i>Recall: 0,91</i> <i>F1-score: 0,91</i> <i>Accuracy validasi: 96,13%</i>	-	-	-
3.	Sistem Monitoring Mendeteksi Mata Lelah Pada Pengemudi Kendaraan Besar Berbasis Pengolahan Citra	(Samsinar dkk., 2024)	<i>Facial Landmark</i>	Pengendara Mobil	EAR, MOR	<i>Accuracy: 92%</i>	-	-	-
4.	Sistem Pendeteksi Kantuk Pengemudi berbasis <i>Eye Aspect Ratio</i> dan <i>Mouth Opening Ratio</i> menggunakan <i>Algoritme C-LSTM</i>	(A. Firdaus dkk., 2023)	C-LSTM	Pengendara Motor & Mobil	EAR, MOR	<i>Accuracy (terang): 92%</i> <i>Accuracy (gelap): 82%</i>	-	√	-
5.	<i>Face Detection and Recognition Using Face Mesh and Deep Neural Network</i>	(Hangaragi dkk., 2022)	<i>Face Mesh &amp; Deep</i>	Wajah Manusia	<i>Facial Landmark</i>	<i>Accuracy: 94,23%</i>	-	-	-

No	Judul	Penulis dan Tahun	Metode	Objek	Parameter	Metriks Evaluasi & Nilai Kinerja	Aspek Evaluasi & Implementasi		
							Jarak	Pencahayaan	Kamera Smartphone
			<i>Neural Network</i>						
6.	Deteksi Pengendara Mengantuk Menggunakan Metode <i>Eye Tracking</i> Berbasis <i>Raspberry Pi</i>	(Pardede dkk., 2022)	<i>Eye Tracking</i>	Pengendara Mobil	EAR	<i>Accuracy: 84%</i>	-	-	-
7.	<i>Driver Drowsiness Detection Using Ensemble Convolutional Neural Networks on YawDD</i>	(Salman dkk, 2021)	<i>Ensemble CNN</i>	Pengemudi Kendaraan	Mata tertutup, kedipan, menguap, pose, oklusi	<i>F1-score (Ensemble): 0,935</i> <i>F1-score CNN1: 0,92</i> <i>F1-score CNN2: 0,90</i> <i>F1-score CNN3: 0,912</i> <i>F1-score alert (Ensemble): 0,978</i>	-	-	-

No	Judul	Penulis dan Tahun	Metode	Objek	Parameter	Metriks Evaluasi & Nilai Kinerja	Aspek Evaluasi & Implementasi		
							Jarak	Pencahayaan	Kamera Smartphone
8.	Implementasi Algoritma <i>Face Mesh</i> Untuk Deteksi Kantuk Pada Pengendara Mobil	TUGAS AKHIR	<i>Face Mesh</i>	Pengendara Mobil	EAR & MAR	?	√	√	√

Berdasarkan Tabel 2.2 matriks penelitian, dapat disimpulkan bahwa sebagian besar penelitian deteksi kantuk pengendara masih berfokus pada pendekatan berbasis *deep learning* seperti CNN, YOLOv5, YOLOv12, maupun metode *ensemble*, yang menunjukkan performa tinggi dari sisi akurasi dan metrik evaluasi lainnya. Namun, pendekatan tersebut umumnya memerlukan *dataset* berukuran besar, proses pelatihan model, serta sumber daya komputasi yang tinggi. Pada penelitian lain, sistem deteksi kantuk juga dikembangkan dengan memanfaatkan perangkat keras tambahan seperti *Raspberry Pi* dan kamera eksternal, yang membatasi fleksibilitas implementasi. Sementara itu, penelitian berbasis EAR dan MAR masih banyak bergantung pada metode *landmark* konvensional atau dikombinasikan dengan model pembelajaran tambahan, serta belum mengevaluasi faktor lingkungan secara terstruktur.

Penelitian ini mengisi celah tersebut dengan melakukan evaluasi sistematis terhadap algoritma *Face Mesh* berbasis EAR dan MAR dalam berbagai kondisi lingkungan nyata, khususnya variasi jarak kamera dan kondisi pencahayaan, serta diimplementasikan

menggunakan kamera *smartphone* tanpa perangkat keras tambahan. Pendekatan ini menempatkan *Face Mesh* sebagai *ekstraktor landmark* utama tanpa penambahan model *deep learning*, sehingga memungkinkan analisis kinerja yang lebih ringan dan relevan untuk penerapan sehari-hari pada pengendara mobil.