

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Pengenalan Masalah

Perjalanan jarak jauh dengan sepeda motor menuntut pengendara mempertahankan posisi duduk dalam waktu lama. Posisi statis ini menambah beban pada otot punggung, pinggang, dan kaki sehingga memicu kelelahan dan kram. Indonesia sendiri memiliki tingkat kepemilikan sepeda motor tertinggi di dunia: dari 133 juta kendaraan bermotor, 88,4% di antaranya adalah sepeda motor [1],[2]. Tingginya populasi sepeda motor ini berbanding lurus dengan risiko kecelakaan, dimana data Korlantas Polri hingga Agustus 2024 mencatat bahwa dari 79.220 kasus kecelakaan lalu lintas, 76% di antaranya melibatkan sepeda motor dengan kelelahan pengendara sepeda motor tercatat sebagai salah satu faktor penyebab utama [3].

Sepeda motor merupakan moda transportasi utama bagi berbagai profesi seperti *driver* ojek *online*, kurir pengiriman barang, dan wisatawan *touring* yang melakukan perjalanan jarak jauh selama 2-4 jam atau lebih. Meskipun demikian, masih terdapat permasalahan dalam hal kesadaran pengendara terhadap bahaya kondisi duduk berkepanjangan yang dapat menyebabkan ketegangan otot. Penelitian *ScienceDirect* menunjukkan 83% literatur mengindikasikan ketidaknyamanan pada pengendara sepeda motor yang berujung pada kelelahan otot [4]. Banyak pengendara yang tidak menyadari pentingnya melakukan istirahat berkala selama perjalanan panjang, sehingga mereka tidak mengetahui kapan tubuh mereka sudah mencapai batas ketegangan yang berbahaya. Hal ini menyebabkan risiko kram otot tiba-tiba yang dapat mengganggu kontrol kendaraan [4].

Menurut studi yang dipublikasikan dalam jurnal PMC menunjukkan bahwa kurangnya sistem pemantauan kondisi pengendara merupakan salah satu penyebab tingginya risiko kecelakaan sepeda motor [5]. Salah satu tantangan terbesar adalah tidak adanya sistem peringatan dini otomatis yang dapat membantu pengendara mendeteksi durasi duduk statis serta memberikan alert sebelum terjadi ketegangan otot yang berbahaya. Minimnya kesadaran mengenai durasi duduk yang aman

membuat pengendara tidak memiliki tolok ukur kapan harus berhenti atau mengubah posisi, sehingga risiko ketegangan otot semakin besar.

Permasalahan ini secara langsung berdampak pada kelompok-kelompok pengguna utama tersebut. Mereka berpotensi mengalami gangguan kesehatan otot dan kehilangan kendali kendaraan ketika kram atau lelah mendadak muncul di tengah perjalanan. Jika masalah ini dapat diatasi melalui peningkatan kesadaran dan pemantauan kelelahan, para pengendara baik pekerja transportasi daring, kurir logistik, maupun komunitas touring akan lebih terlindungi dari kecelakaan serta dapat menjaga produktivitas dan kenyamanan berkendara [6].

1.1.1 Informasi Pendukung Masalah

Pada penelitian ini, masalah yang diangkat terkait dengan kelelahan pengendara sepeda motor akibat posisi duduk statis dalam perjalanan jarak jauh. Sepeda motor merupakan jenis transportasi dominan di Indonesia dengan berbagai karakteristik yang mempengaruhi kenyamanan berkendara [6].

Posisi duduk di motor bikin tekanan numpuk terus di area pantat, paha, sama betis. Beda sama naik mobil yang ada sandaran lengkap dan beban tubuh lebih rata, pengendara motor itu tekanannya terpusat banget di titik-titik yang nempel ke jok. Makanya pas perjalanan jauh, area bawah tubuh ini yang paling cepat capek dan rentan kram. [6],[7]. Hal ini menyebabkan pengendara lebih rentan mengalami kelelahan otot, terutama pada perjalanan jarak jauh yang membutuhkan waktu berkendara dalam durasi yang panjang [6].

a. Data dan Fakta Pendukung Permasalahan:

1. Mekanisme Fisiologis Kelelahan Otot

Kelelahan otot pada pengendara sepeda motor merupakan fenomena biomekanikal kompleks yang melibatkan interaksi antara beban mekanis statis dan respons fisiologis jaringan muskuloskeletal. Posisi berkendara mengharuskan aktivasi simultan berbagai kelompok otot untuk mempertahankan stabilitas postural dalam durasi berkepanjangan.

2. Kelompok Otot yang Terlibat

Analisis biomekanikal menunjukkan bahwa posisi duduk pada sepeda motor melibatkan beberapa kelompok otot utama yang mengalami

beban statis [6],[14]. *Gluteus maximus* sebagai struktur utama penerima beban kompresi vertikal dari massa tubuh pengendara [14]. *Hamstring group* (*biceps femoris*, *semitendinosus*, *semimembranosus*) mengalami elongasi statis akibat fleksi hip dan knee joint [6]. *Quadriceps group* (*rectus femoris*, *vastus lateralis*, *vastus medialis*) mempertahankan kontraksi isometrik untuk stabilitas lower limb [14]. *Erector spinae* berfungsi sebagai stabilisator columna vertebralis terhadap gravitasi dan akselerasi kendaraan [16]. *Gastrocnemius* dan *soleus* mengontrol ankle joint pada footrest [14].

3. Patofisiologi Kelelahan Otot

Kelelahan otot terjadi melalui beberapa jalur patofisiologis yang saling berinteraksi. Kompresi jaringan lunak berkepanjangan menyebabkan iskemia lokal akibat peningkatan tekanan interstisial yang melebihi tekanan perfusi kapiler (>32 mmHg), mengakibatkan hipoksia jaringan dan gangguan delivery oksigen serta substrat metabolik [14]. Kontraksi isometrik prolonged pada kondisi perfusi suboptimal menyebabkan akumulasi metabolit fatiguing seperti ion hidrogen, fosfat anorganik, dan laktat yang mengganggu coupling excitation-contraction pada level sarkomer [6]. Deplesi cadangan energi lokal berupa glikogen otot dan fosfokreatin pada kondisi metabolisme anaerobik parsial berkontribusi terhadap penurunan force-generating capacity [14]. Gangguan fungsi proprioseptif akibat fatigue mechano-receptor dan muscle spindle menyebabkan deteriorasi koordinasi neuromuskular dan penurunan motor control precision [6].

4. Korelasi Distribusi Tekanan Interface dengan Timbulnya Kelelahan

Studi Arunachalam et al. [14] menggunakan metodologi simultan *surface electromyography* (sEMG) dan *seat interface pressure mapping* mendemonstrasikan korelasi signifikan antara magnitude dan durasi tekanan lokal dengan indikator objektif kelelahan otot. Peningkatan tekanan pada region spesifik berkorelasi positif dengan elevated EMG amplitude, mengindikasikan compensatory muscle activation. Temporal shift pada pressure distribution pattern mencerminkan behavioral adaptation pengendara terhadap discomfort localized [14]. Analisis regresi

menunjukkan bahwa durasi eksposur tekanan >50 mmHg memiliki hubungan linear dengan fatigue severity index subjektif ($r=0.78$, $p<0.01$) [14]. Temuan ini memvalidasi pendekatan *proxy-based measurement* menggunakan pressure sensing dan temporal parameter sebagai estimator fatigue risk yang feasible secara praktis meskipun tidak melakukan direct measurement aktivitas bioelektrik otot [6],[14].

Berdasarkan data dari berbagai sumber penelitian, permasalahan kelelahan pengendara motor dalam perjalanan jarak jauh memiliki basis data yang kuat. Penelitian menunjukkan bahwa 78% pengendara sepeda motor mengalami kelelahan otot setelah berkendara selama 2 jam tanpa istirahat, dengan manifestasi berupa nyeri punggung bawah, kram pada area paha dan betis, serta penurunan konsentrasi [6]. Data Korlantas Polri mencatat 76% dari 79.220 kasus kecelakaan sepeda motor melibatkan faktor *human error*, termasuk kelelahan pengendara yang berkontribusi pada *delayed reaction time* dan *poor judgment* [3].

Studi ergonomi mengidentifikasi bahwa duduk statis selama lebih dari 90 menit menyebabkan penurunan performa kontrol kendaraan hingga 35%, terutama dalam hal kemampuan manuver darurat dan stabilitas saat pengereman [8]. *Survey YLKI* terhadap 1.200 pengendara ojek *online* menunjukkan 89% mengalami keluhan punggung dan pinggang akibat berkendara 6-8 jam per hari, dengan 34% di antaranya memerlukan terapi fisik reguler untuk mengatasi gangguan muskuloskeletal yang dialami [9].

b. Solusi Yang Telah Ada:

Beberapa solusi untuk mengatasi masalah kelelahan pengendara sepeda motor telah dikembangkan sebelumnya:

1. *Motorcycle Vibration Alert System*: Solusi berbasis hardware yang melakukan monitoring getaran kendaraan secara real-time, namun sistem ini hanya terfokus pada deteksi getaran dan belum mampu menganalisis postur pengendara secara menyeluruh [10].

2. *Mobile Apps (Break Reminder)*: Aplikasi yang mudah diimplementasikan namun masih mengandalkan manual input dari pengguna dan tidak dapat melakukan monitoring secara otomatis [11].
3. *Pressure-sensitive Seat*: Sistem yang mampu mendeteksi perubahan distribusi tekanan dan pola duduk pengendara, namun terbatas hanya pada deteksi tekanan dasar dan belum mampu memberikan analisis komprehensif terhadap kondisi kelelahan pengendara [12].

Dalam pengembangan solusi-solusi tersebut, terdapat beberapa teknologi sensor yang umum dimanfaatkan. *Force Sensitive Resistor* (FSR) merupakan sensor tekanan yang dapat mendeteksi distribusi beban pada permukaan jok sepeda motor, mampu membaca variasi tekanan yang terjadi akibat posisi duduk pengendara untuk mengidentifikasi pola duduk serta perubahan posisi [12]. *Accelerometer* dapat digunakan untuk mendeteksi percepatan dan getaran, yang dalam konteks kendaraan dapat dipasang pada rangka motor untuk mengukur intensitas getaran yang ditransmisikan dari jalan ke kendaraan, berpengaruh terhadap tingkat kelelahan pengendara [13]. Sebagai platform komputasi, mikrokontroler seperti ESP32 memiliki kemampuan pemrosesan data dan konektivitas nirkabel untuk mengintegrasikan berbagai sensor serta mengirimkan informasi ke perangkat mobile pengendara [13]. Teknologi-teknologi tersebut dapat dikombinasikan dalam berbagai konfigurasi untuk menghasilkan sistem monitoring yang sesuai dengan kebutuhan deteksi kelelahan pengendara.

1.1.2 Analisis Masalah

Permasalahan kurangnya kesadaran pengendara motor terhadap bahaya posisi duduk statis berkepanjangan dapat dianalisis dari berbagai aspek:

1. Aspek Kesehatan: Posisi duduk statis berkepanjangan pada sepeda motor menyebabkan berbagai gangguan muskuloskeletal. Penelitian biomekanik menunjukkan bahwa posisi duduk pada motor menyebabkan tekanan konstan pada area pantat dan paha, yang berbeda dengan distribusi beban saat berdiri atau duduk di kursi dengan sandaran penuh [7]. Hal ini mengakibatkan *compressed disc syndrome*, *muscle fatigue syndrome*, dan *circulation disorder* yang dapat memicu kram mendadak. Data medis

menunjukkan sebagian besar *driver* ojek *online* mengalami keluhan pada area paha, pantat, dan betis akibat tekanan berkepanjangan, dengan beberapa melaporkan kram mendadak saat berkendara [9].

2. Aspek Keselamatan: Dari perspektif *safety engineering*, kelelahan pengendara berkontribusi signifikan terhadap *accident rate* [3]. Analisis data kecelakaan menunjukkan bahwa *reaction time* pengendara yang lelah meningkat secara signifikan, yang dapat menambah *stopping distance* dan meningkatkan risiko kecelakaan [8]. Studi menunjukkan bahwa *drowsy driving* menyebabkan ribuan kematian per tahun, dengan sepeda motor memiliki risiko yang jauh lebih tinggi dibanding mobil dalam kondisi kelelahan pengendara [3],[8].
3. Aspek Ekonomi: Dampak ekonomi dari masalah ini mencakup *productivity loss* dan *healthcare cost*. *Driver* transportasi *online* yang mengalami gangguan kesehatan akibat cara berkendara mengalami penurunan produktivitas karena harus mengurangi jam kerja [9]. Biaya pengobatan gangguan muskuloskeletal di Indonesia mencapai nilai yang signifikan per tahun, dengan sebagian di antaranya terkait *occupational hazard* termasuk *professional driver* [10]. Selain itu, *accident cost* akibat *fatigue-related crash* juga memberikan dampak ekonomi yang besar [3].
4. Aspek Teknologi: Minimnya *adoption* teknologi *monitoring* kesehatan pada kendaraan bermotor di Indonesia menjadi *gap* yang signifikan [13]. Keterbatasan *infrastructure* IoT dan *connectivity* juga menjadi *barrier* dalam implementasi *real-time monitoring system*. *Current technology* lebih fokus pada *vehicle performance monitoring* daripada *rider health monitoring* [14].

1.1.3 Kebutuhan yang Harus Dipenuhi

Berdasarkan analisis masalah yang telah dilakukan, kebutuhan yang harus dipenuhi untuk menyelesaikan permasalahan ini adalah sebagai berikut:

1. Sistem harus mampu mengidentifikasi kondisi duduk yang berpotensi menyebabkan ketegangan otot pada pengendara

2. Sistem harus dapat memantau durasi duduk statis dan memberikan peringatan dini
3. Sistem harus dapat memberikan rekomendasi waktu istirahat yang optimal
4. Sistem harus mudah digunakan dan tidak mengganggu konsentrasi pengendara selama berkendara

1.1.4 Tujuan

Berdasarkan permasalahan yang telah dijabarkan, tugas akhir ini bertujuan untuk membuat sebuah sistem berbasis teknologi yang dapat membantu meminimalkan risiko kecelakaan akibat kondisi lelah pengendara sepeda motor dengan cara yang efisien dan terintegrasi. Dengan adanya fitur *tracking* distribusi beban tubuh dan deteksi durasi duduk secara kontinu, diharapkan mampu memberikan peringatan dini kepada pengendara sebelum mencapai tingkat ketegangan berbahaya, serta mengirimkan notifikasi secara langsung kepada pengguna agar mereka dapat mengambil tindakan tepat seperti beristirahat atau mengubah posisi duduk.

1.2 Solusi

1.2.1 Karakteristik Produk

Sistem yang akan dibuat memiliki beberapa karakteristik produk yang terbagi menjadi fitur dasar dan fitur tambahan.

1. Fitur Dasar

Fitur utama dari produk adalah adanya kemampuan sistem untuk mengidentifikasi kondisi pengendara yang berpotensi mengalami ketegangan otot selama perjalanan jarak jauh. Produk akan memberikan peringatan kepada pengendara sebelum mencapai kondisi berbahaya. Selain itu, produk juga didesain untuk memberikan rekomendasi waktu istirahat yang tepat guna menjaga kesehatan dan keselamatan pengendara.

a. Sensing Capability

Sistem dilengkapi dengan sensor yang dapat mendeteksi kondisi duduk pengendara pada jok sepeda motor serta memantau durasi waktu berkendara.

b. Notification Capability

Sistem akan memberikan informasi peringatan kepada pengendara secara langsung saat kondisi yang memerlukan perhatian terdeteksi.

c. Computing Performance

Sistem memiliki kemampuan pemrosesan data untuk menganalisis kondisi pengendara dan menentukan waktu peringatan yang tepat.

d. Compatibility Capability

Sistem terintegrasi antara mikrokontroler dengan platform dan perangkat yang akan digunakan serta kompatibel dengan berbagai jenis sepeda motor.

e. Information Display

Sistem mampu menampilkan informasi durasi berkendara, status kondisi pengendara, dan rekomendasi waktu istirahat.

f. User Friendly

Sistem yang ditawarkan memberikan kemudahan dalam penggunaannya bagi pengendara sepeda motor dan tidak mengganggu konsentrasi saat berkendara.

2. Fitur Tambahan

Fitur tambahan adalah fitur yang dapat mendukung fitur dasar, sehingga permasalahan yang ada dapat di atasi dengan efektif.

a. Low Power Consumption

Sistem dirancang dengan konsumsi daya rendah agar tidak membebani sistem kelistrikan sepeda motor.

b. Konektivitas Efisien

Sistem menggunakan teknologi komunikasi nirkabel hemat daya untuk integrasi dengan perangkat mobile.

c. Biaya Terjangkau

Menggunakan komponen yang mudah didapat di pasaran lokal dengan target harga produksi yang kompetitif.

d. Mudah Diinstalasi

Sistem dapat dipasang tanpa modifikasi permanen pada sepeda motor dan tidak memerlukan bantuan teknisi khusus.

e. Tampilan Estetis

Desain kompak yang tidak mengganggu estetika sepeda motor.

1.2.2 Usulan Solusi

1.2.2.1 Solusi 1: Sistem Monitoring Kelelahan Otot Menggunakan *Pressure Sensor* dan *Timer Duration*

Seorang driver ojek online yang bekerja seharian dengan penghasilan bergantung pada jumlah order yang diselesaikan memiliki target untuk menyelesaikan order dalam jumlah tertentu untuk mencapai bonus harian. Sistem monitoring sederhana terpasang pada jok motornya menggunakan beberapa sensor tekanan sebagai sensor kehadiran untuk mengkonfirmasi pengendara sedang duduk di motor.

Saat pengendara duduk dan menyalakan motor, sistem mendeteksi kehadiran melalui pembacaan tekanan pada sensor dan memulai timer durasi berkendara. Order pertama membawa pengendara berkendara dalam durasi tertentu. Sistem terus menghitung waktu selama sensor mendeteksi kehadiran pengendara.

Setelah melewati interval waktu tertentu berdasarkan standar ergonomi, aplikasi memberikan notifikasi getaran ringan dengan pesan sederhana untuk mengingatkan pengendara mempertimbangkan istirahat sebentar. Pengendara melihat notifikasi namun memutuskan untuk melanjutkan karena sedang mengejar target order.

Pada interval waktu berikutnya yang lebih lama, sistem memberikan peringatan yang lebih kuat dengan alarm suara untuk mengingatkan pengendara agar segera istirahat untuk menghindari kelelahan. Kali ini pengendara mendengarkan dan berhenti di tempat istirahat terdekat.

Saat pengendara turun dari motor, sensor tidak lagi mendeteksi tekanan dan sistem menghentikan timer. Setelah beberapa menit istirahat, pengendara kembali ke motor dan sistem mendeteksi kehadirannya kembali, kemudian me-reset timer durasi berkendara dari nol.

Sistem ini mengatasi masalah kurangnya kesadaran pengendara terhadap durasi berkendara dengan pendekatan yang sederhana dan mudah dipahami. Banyak pengendara tidak menyadari berapa lama mereka telah berkendara karena fokus pada perjalanan dan pekerjaan.

Dengan sistem timer otomatis yang memberikan peringatan pada interval waktu yang telah ditentukan berdasarkan standar ergonomi, pengendara mendapatkan pengingat eksternal yang konsisten. Sistem tidak memerlukan input manual dari pengguna karena sensor kehadiran secara otomatis mendeteksi kapan pengendara duduk atau meninggalkan motor.

Pendekatan berbasis waktu ini bersifat universal dan dapat diterapkan untuk semua pengendara tanpa memerlukan kalibrasi individual. Interval waktu peringatan dipilih berdasarkan penelitian ergonomi yang menunjukkan bahwa duduk statis dalam periode waktu tertentu dapat menyebabkan penurunan performa kontrol kendaraan yang signifikan [8].

Kesederhanaan sistem ini juga membuatnya lebih mudah digunakan dan dipahami oleh pengguna dengan berbagai latar belakang teknologi. Pengendara hanya perlu memperhatikan notifikasi yang muncul secara berkala tanpa harus memahami data teknis yang kompleks.

Solusi ini didasarkan pada pendekatan time-based monitoring yang mengacu pada standar ergonomic tentang evaluasi postur kerja statis [8]. Standar ini menetapkan bahwa posisi duduk statis yang dipertahankan dalam periode waktu yang lama tanpa perubahan signifikan dapat menyebabkan kelelahan otot dan ketidaknyamanan [6].

Sensor Force Sensitive Resistor (FSR) digunakan sebagai binary presence detector untuk mengkonfirmasi kehadiran pengendara [12]. Sensor ini memiliki keunggulan sederhana, murah, dan cukup andal untuk deteksi kehadiran dasar. sensor terdeteksi melebihi threshold tertentu, sistem menginterpretasikan bahwa pengendara sedang duduk. Sebaliknya, ketika tekanan turun di bawah threshold, sistem menganggap pengendara telah meninggalkan motor.

Dalam memantau kondisi fisik pengendara, sistem mengklasifikasikan pembacaan sensor menjadi dua parameter utama: tekanan stabil dan tekanan tidak stabil. Tekanan stabil terjadi ketika distribusi beban pada jok konsisten dengan

fluktuasi minimal, yang umumnya terekam pada awal perjalanan atau saat melewati jalan dengan permukaan rata. Kondisi ini digunakan oleh sistem untuk membentuk profil tekanan dasar (*baseline pressure profile*). Sebaliknya, tekanan tidak stabil ditandai dengan perubahan atau fluktuasi distribusi berat yang signifikan pada sensor. Ketidakstabilan ini dapat bersumber dari faktor eksternal, seperti guncangan akibat jalan rusak, maupun faktor internal, yaitu ketika pengendara menggeser posisi duduk akibat ketidaknyamanan atau kelelahan otot. Dengan membedakan kedua parameter ini, sistem dapat mengenali perubahan perilaku duduk yang mengindikasikan potensi kelelahan secara lebih akurat.

Mikrokontroler menjalankan algoritma sederhana berbasis counter yang menghitung waktu dalam satuan detik. Timer berjalan selama sensor mendeteksi kehadiran dan berhenti ketika tidak ada tekanan terdeteksi. Data durasi disimpan dan dikirim ke aplikasi ponsel melalui koneksi nirkabel secara berkala untuk ditampilkan ke pengguna.

Sistem peringatan menggunakan pendekatan bertingkat berdasarkan durasi:

1. Level pertama: Notifikasi ringan untuk mengingatkan pengendara pada interval awal
2. Level kedua: Peringatan lebih kuat untuk mendorong tindakan segera pada interval menengah
3. Level ketiga: Alarm mendesak jika pengendara terus mengabaikan peringatan pada interval maksimal

Pendekatan ini efektif karena memberikan early warning sebelum kelelahan mencapai tingkat berbahaya, sekaligus memberikan fleksibilitas bagi pengendara untuk memutuskan kapan waktu terbaik untuk beristirahat berdasarkan kondisi perjalanan mereka.

1.2.2.2 Solusi 2 : Sistem *Smart Seat* dengan Deteksi Perubahan Tekanan Adaptif

Seorang kurir logistik yang setiap hari melakukan pengiriman barang dengan rute beragam, mulai dari jalan tol yang mulus hingga jalan perumahan yang berlubang, harus mengantarkan sejumlah paket ke berbagai lokasi dengan estimasi perjalanan beberapa jam.

Sistem adaptive pressure monitoring yang terpasang pada jok motor mulai bekerja sejak pengendara duduk. Berbeda dengan sistem time-based sederhana, sistem ini tidak hanya menghitung waktu, tetapi juga terus menganalisis pola distribusi tekanan pada array sensor yang tersebar di jok. Sistem merekam baseline pressure profile ketika pengendara pertama kali duduk.

Selama periode awal berkendara di jalan tol, distribusi tekanan relatif stabil dengan fluktuasi kecil akibat getaran motor normal. Sistem mengenali ini sebagai kondisi normal dan tidak memberikan alert. Namun ketika pengendara memasuki area jalan yang rusak, getaran meningkat signifikan. Sistem secara otomatis menyesuaikan threshold noise untuk menghindari false alarm.

Setelah berkendara dalam durasi tertentu, pengendara mulai merasa tidak nyaman di area tertentu. Secara tidak sadar, pengendara menggeser posisi duduknya untuk mengurangi tekanan. Sensor mendeteksi perubahan drastis pada distribusi tekanan antara area kanan dan kiri. Sistem langsung memberikan notifikasi bahwa terdeteksi perubahan posisi signifikan yang mengindikasikan pengendara mungkin mulai merasakan ketidaknyamanan, dan menyarankan untuk mempertimbangkan istirahat sebentar.

Pengendara kemudian berhenti di rest area terdekat, turun dari motor, dan meregangkan tubuh beberapa menit. Ketika kembali duduk, sistem me-reset baseline pressure profile dan mulai monitoring dari awal dengan pola tekanan yang baru.

Solusi ini mengatasi keterbatasan sistem time-based yang hanya fokus pada durasi. Dalam kenyataannya, ketegangan otot tidak selalu muncul pada waktu yang sama untuk setiap orang atau setiap kondisi. Faktor seperti kondisi jalan, beban bawaan, gaya berkendara, dan kondisi fisik pengendara mempengaruhi seberapa cepat ketegangan muncul.

Sistem adaptive pressure monitoring mengatasi masalah ini dengan mendeteksi tanda peringatan dini dari ketidaknyamanan, yaitu perubahan perilaku duduk pengendara. Ketika seseorang mulai merasa tidak nyaman, secara natural mereka akan menggeser posisi duduk untuk mencari titik yang lebih nyaman. Perubahan ini tercermin dalam distribusi tekanan yang terdeteksi oleh sensor array.

Dengan mendeteksi perubahan signifikan ini, sistem dapat memberikan peringatan dini sebelum ketegangan mencapai level berbahaya. Hal ini lebih efektif dibanding menunggu hingga waktu tertentu, karena bersifat *personalized* dan *adaptive* terhadap kondisi aktual pengendara.

Kemampuan sistem untuk membedakan noise dari perubahan *genuine* sangat penting. Jalan berlubang, polisi tidur, atau manuver mendadak dapat menyebabkan fluktuasi tekanan sesaat. Sistem menggunakan *time-window analysis* dan *noise filtering algorithm* untuk memastikan alert hanya muncul untuk perubahan yang benar-benar mengindikasikan ketidaknyamanan, bukan sekadar getaran jalan.

Pendekatan adaptif ini memberikan pengalaman yang lebih personal karena sistem mempelajari pola duduk normal setiap pengendara dan hanya memberikan peringatan ketika ada deviasi signifikan dari pola tersebut.

Solusi ini didasarkan pada teori *pressure mapping* dan *postural discomfort assessment*. Penelitian oleh Chen menunjukkan bahwa perubahan distribusi tekanan pada seat merupakan indikator objektif dari ketidaknyamanan dan kelelahan otot [12].

Dari perspektif *biomechanik*, duduk dalam posisi statis menyebabkan *ischemia* (berkurangnya aliran darah) pada jaringan yang tertekan. Ketika *ischemia* mencapai *threshold* tertentu, tubuh akan memberikan sinyal ketidaknyamanan yang memicu perubahan posisi sebagai mekanisme proteksi natural [13]. Dengan mendeteksi perubahan posisi ini melalui perubahan distribusi tekanan, sistem dapat mengidentifikasi onset of discomfort sebelum berkembang menjadi kelelahan otot yang lebih serius.

1.2.2.4 Solusi 3: Sistem Monitoring Kelelahan Otot Menggunakan Kombinasi *Pressure Sensor* dan *Vibration Sensor*

Seorang anggota komunitas touring motor yang rutin melakukan perjalanan jarak jauh setiap akhir pekan merencanakan tur dengan jarak tempuh ratusan kilometer dan estimasi waktu beberapa jam.

Sistem monitoring kombinasi yang terpasang pada motor menggunakan beberapa sensor tekanan di jok untuk konfirmasi kehadiran dan *tracking* durasi, serta sensor accelerometer yang dipasang pada rangka motor di bawah jok untuk

mendeteksi intensitas getaran kendaraan. Saat pengendara duduk, sistem melakukan kalibrasi awal dengan merekam tekanan baseline dan level getaran referensi selama motor dalam keadaan diam.

Pada segmen awal di jalan tol yang mulus, sistem mendeteksi getaran rendah. Sistem menghitung durasi berkendara sebagai "kondisi nyaman" dengan faktor getaran rendah, sehingga estimasi waktu hingga peringatan pertama menggunakan interval standar.

Memasuki jalur berkelok dengan permukaan jalan tidak rata, intensitas getaran meningkat signifikan. *Accelerometer* mendeteksi peningkatan getaran yang substansial dari baseline. Sistem secara otomatis mengkalkulasi ulang bahwa dengan tingkat getaran tinggi, tubuh akan lebih cepat lelah, sehingga estimasi waktu peringatan dikurangi untuk segment ini.

Setelah berkendara total dalam durasi tertentu yang mencakup kombinasi jalan mulus dan medan berat, sistem memberikan peringatan bahwa terdeteksi perjalanan di medan berat dan total akumulasi kelelahan setara dengan durasi lebih panjang pada berkendara normal, menyarankan untuk mempertimbangkan istirahat dalam waktu dekat.

Di area parkir, pengendara dan kelompoknya istirahat beberapa menit. Saat sensor tidak mendeteksi tekanan, timer dihentikan dan *counter* akumulasi getaran di-reset. Ketika melanjutkan perjalanan, sistem mulai perhitungan baru dengan baseline yang fresh.

Sistem ini mengatasi keterbatasan pendekatan *time-based* sederhana yang memperlakukan semua durasi berkendara secara sama. Dalam realitas, berkendara dalam durasi tertentu di jalan tol yang mulus sangat berbeda tingkat kelelahannya dengan berkendara di jalan berlubang atau menanjak dalam durasi yang sama. Getaran kendaraan memiliki dampak signifikan terhadap kelelahan pengendara. Getaran yang ditransmisikan dari permukaan jalan melalui ban, suspensi, dan rangka motor ke tubuh pengendara menyebabkan aktivasi otot kompensatori yang terus-menerus [14]. Otot-otot core dan kaki harus bekerja lebih keras untuk menjaga stabilitas tubuh di atas motor yang bergetar.

Dengan mengintegrasikan data intensitas getaran ke dalam perhitungan durasi, sistem dapat memberikan estimasi kelelahan yang lebih akurat. Konsep

"*equivalent riding time*" memungkinkan sistem untuk menghitung bahwa berkendara di medan kasar dengan getaran tinggi dalam waktu tertentu setara dengan berkendara lebih lama di jalan mulus dalam hal akumulasi kelelahan.

Pendekatan ini memberikan peringatan yang lebih *contextual* dan relevan dengan kondisi perjalanan aktual. Pengendara touring yang melewati berbagai jenis medan akan mendapat manfaat signifikan karena sistem mempertimbangkan tingkat kesulitan medan yang dihadapi.

Sistem juga membantu pengendara dalam perencanaan istirahat. Dengan mengetahui bahwa medan berat di depan akan mempercepat kelelahan, pengendara dapat memutuskan untuk beristirahat lebih awal sebelum memasuki segment tersebut.

Solusi ini menggabungkan *time-based monitoring* dengan *vibration exposure assessment*. Penelitian ergonomi menunjukkan bahwa *whole-body vibration* (WBV) yang dialami pengendara motor berkontribusi signifikan terhadap kelelahan dan ketidaknyamanan [10].

Sensor *accelerometer tri-axis* dipasang pada rangka motor untuk mengukur percepatan getaran dengan sensitivitas dan *sampling rate* yang memadai [14]. Data diproses menggunakan algoritma RMS (*Root Mean Square*) untuk menghitung magnitude getaran dalam window waktu tertentu.

Mikrokontroler menjalankan algoritma *fatigue accumulation* yang mengkalkulasi *equivalent riding time* dengan mempertimbangkan intensitas getaran. Sistem mengkategorikan level getaran menjadi beberapa kategori (rendah, sedang, tinggi) dan memberikan faktor pengali yang berbeda untuk setiap kategori. Penelitian menunjukkan bahwa paparan getaran tinggi menghasilkan tingkat kelelahan yang lebih cepat dibanding berkendara tanpa getaran signifikan [10]. Hal ini disebabkan oleh aktivasi berkelanjutan dari *muscle spindle* dan *proprioceptor* yang merespons perubahan akselerasi, menyebabkan kontraksi otot isometrik untuk mempertahankan stabilitas [13].

Sistem memberikan threshold peringatan yang disesuaikan berdasarkan *equivalent time* yang dikalkulasi, memungkinkan pengendara mendapat peringatan yang lebih akurat sesuai kondisi medan yang dilalui. Data getaran dan durasi

dikirim ke aplikasi ponsel untuk visualisasi *real-time*, memungkinkan pengendara melihat akumulasi kelelahan dan merencanakan istirahat dengan lebih baik.

1.2.3 Analisa Usulan Solusi

Berdasarkan ketiga solusi yang telah diuraikan pada bagian 1.2.2, dilakukan analisis menggunakan metode *House of Quality* (HoQ) untuk mengevaluasi setiap solusi terhadap pemenuhan fitur dasar dan fitur tambahan yang telah ditetapkan pada bagian 1.2.1 Karakteristik Produk. Metode HoQ digunakan untuk menganalisis hubungan antara kebutuhan pengguna dengan karakteristik teknis dari setiap solusi yang diusulkan, sehingga dapat ditentukan solusi yang paling optimal.

Tabel 1. 1 *House of Quality*

Fitur Dasar													
House Of Quality													
	Rank of Importance	Percent of Importance	▲	▲	▲			▲	Jumlah	Solusi 1	Solusi 2	Solusi 3	
			Sensing Capability	Notification Capability	Computing Performance	Compatibility Capability	Information Display	User Friendly					
Fitur Tambahan	Low Power Consumption	5	3,93%	△				△	10	⊙	○	△	
	Konektivitas Efisien	4	26,77%	○	⊙	△	⊙	○	68	○	○	○	
	Biaya Terjangkau	4	18,89%	○	○	△	△	△	48	⊙	○	△	
	Mudah Diinstalasi	4	28,34%	○	△	○	⊙	△	72	⊙	○	△	
	Tampilan Estetis	4	22,04%	○	△			⊙	56	⊙	⊙	⊙	
	Importance Rating	21	100%	53	40	20	44	28	69				
	Percent of Importance		20,87%	15,75%	7,87%	17,32%	11%	27%	100%				
	Solusi 1		○	⊙	⊙	⊙	○	⊙	4,57				
	Solusi 2		⊙	⊙	○	○	⊙	○	3,94				
	Solusi 3		○	⊙	○	○	⊙	△	3,01				

Keterangan Simbol:

1. ⊙ = Hubungan Kuat (5)
2. ○ = Hubungan Sedang (3)
3. △ = Hubungan Lemah (1)
4. Kosong = Tidak Berhubungan (0)

Berdasarkan tabel *House of Quality* di atas, dilakukan perhitungan skor untuk setiap solusi dengan mengalikan nilai hubungan (1, 3, atau 5) dengan bobot masing-masing fitur.

Berikut merupakan perhitungan menggunakan *House of Quality* dari ketiga solusi yang ditawarkan:

Perhitungan Fitur Dasar:

$$\text{Solusi 1 : } (20,87\% \times 3) + (15,75\% \times 5) + (7,87\% \times 5) + (17,32\% \times 5) + (11\% \times 3) + (27\% \times 5) = 4,57$$

$$\text{Solusi 2: } (20,87\% \times 5) + (15,75\% \times 5) + (7,87\% \times 3) + (17,32\% \times 3) + (11\% \times 5) + (27\% \times 3) = 3,94$$

$$\text{Solusi 3: } (20,87\% \times 3) + (15,75\% \times 5) + (7,87\% \times 3) + (17,32\% \times 3) + (11\% \times 5) + (27\% \times 1) = 3,01$$

Solusi 1 unggul dalam aspek *Notification Capability*, *User Friendly*, dan *Information Display* karena pendekatannya yang sederhana dan mudah dipahami oleh pengguna. Sistem *time-based* memungkinkan pengendara mendapatkan informasi langsung tanpa perlu memahami data teknis yang kompleks. Peringatan yang diberikan bersifat universal dan dapat diterapkan untuk semua jenis pengendara berdasarkan standar ergonomi yang telah ditetapkan.

Solusi 2 menunjukkan keunggulan pada aspek *Sensing Capability* dan *Computing Performance* karena kemampuannya dalam menganalisis pola distribusi tekanan secara *real-time*. Pendekatan *adaptive monitoring* memungkinkan sistem untuk mendeteksi tanda peringatan dini dari ketidaknyamanan melalui perubahan perilaku duduk pengendara. Namun, kompleksitas analisis data pressure mapping ini memerlukan pemrosesan yang lebih intensif dan *interface* yang lebih rumit, sehingga skor pada aspek *User Friendly* dan *Information Display* menjadi lebih rendah.

Solusi 3 memiliki skor terendah meskipun menawarkan pendekatan yang paling komprehensif dengan mengintegrasikan data getaran dan durasi. Kompleksitas sistem yang tinggi ini berdampak pada beberapa aspek, terutama pada *User Friendly* dan *Compatibility Capability*. Sistem yang memerlukan kalibrasi multi-sensor dan perhitungan *equivalent riding time* membutuhkan pemrosesan data yang lebih rumit dan *interface* yang lebih kompleks untuk menampilkan informasi kepada pengguna.

Perhitungan Fitur Tambahan:

Solusi 1: $(3,93\% \times 5) + (26,77\% \times 3) + (18,89\% \times 5) + (28,34\% \times 5) + (22,04\% \times 5) = 4,46$

Solusi 2: $(3,93\% \times 3) + (26,77\% \times 3) + (18,89\% \times 3) + (28,34\% \times 3) + (22,04\% \times 5) = 3,44$

Solusi 3: $(3,93\% \times 1) + (26,77\% \times 3) + (18,89\% \times 1) + (28,34\% \times 1) + (22,04\% \times 3) = 2,41$

Untuk fitur *Low Power Consumption*, Solusi 1 memiliki keunggulan signifikan karena hanya menggunakan sensor tekanan sederhana sebagai binary presence detector dan algoritma timer yang ringan. Berbeda dengan Solusi 2 yang memerlukan continuous monitoring pada array sensor dan analisis *pattern recognition*, atau Solusi 3 yang harus memproses data dari accelerometer dengan sampling rate tinggi secara berkelanjutan.

Pada aspek Konektivitas Efisien, ketiga solusi menggunakan teknologi komunikasi nirkabel, namun volume data yang dikirimkan berbeda. Solusi 1 hanya mengirim data durasi berkendara secara berkala, sedangkan Solusi 2 mengirim *pressure mapping data* dan Solusi 3 mengirimkan kombinasi data getaran dan tekanan yang lebih berat, sehingga memerlukan bandwidth dan konsumsi daya yang lebih tinggi.

Untuk fitur Biaya Terjangkau, Solusi 1 jelas lebih unggul karena hanya memerlukan beberapa sensor FSR dan mikrokontroler dasar. Solusi 2 membutuhkan array sensor yang lebih banyak dengan konfigurasi khusus untuk pressure mapping, sementara Solusi 3 menambahkan komponen *accelerometer* berkualitas tinggi yang mampu mendeteksi getaran dengan presisi, meningkatkan total biaya produksi.

Aspek Mudah Diinstalasi dan Tampilan Estetis juga dimenangkan oleh Solusi 1. Sistem sederhana dengan jumlah sensor minimal dapat dipasang dengan lebih mudah tanpa memerlukan modifikasi signifikan pada jok motor. Solusi 2 memerlukan instalasi array sensor dengan presisi posisi tertentu untuk pressure mapping yang akurat, sedangkan Solusi 3 membutuhkan instalasi sensor pada dua lokasi berbeda (jok dan rangka motor) yang lebih kompleks dan mempengaruhi estetika kendaraan.

Meskipun Solusi 2 dan Solusi 3 menawarkan kemampuan monitoring yang lebih canggih dan data yang lebih kaya, kompleksitas sistem tersebut membawa *trade-off* signifikan dalam hal konsumsi daya, biaya, kemudahan penggunaan, dan implementasi. Dalam konteks target pengguna seperti driver ojek online, kurir, dan komunitas touring yang membutuhkan solusi praktis dan reliable, kesederhanaan Solusi 1 justru menjadi keunggulan utama.

Pendekatan *time-based monitoring* pada Solusi 1 telah terbukti efektif berdasarkan standar ergonomi internasional dan dapat memberikan peringatan yang konsisten untuk mencegah kelelahan berbahaya. Dengan skor tertinggi baik pada fitur dasar (4,57) maupun fitur tambahan (4,46), Solusi 1 menunjukkan keseimbangan optimal antara efektivitas, efisiensi, dan praktikalitas implementasi.

1.2.4 Solusi yang Dipilih

Berdasarkan hasil analisis menggunakan *House of Quality* dengan menganalisis seluruh hubungan usulan solusi terhadap fitur dasar dan fitur tambahan, diperoleh Solusi 1: Sistem Monitoring Menggunakan *Pressure Sensor* dan *Timer Duration* yang memperoleh nilai tertinggi dengan skor fitur dasar sebesar 4,57 dan fitur tambahan sebesar 4,46. Solusi ini menerapkan pendekatan *time-based monitoring* dengan sensor FSR sebagai *binary presence detector* yang memproses data durasi berkendara secara *real-time* melalui mikrokontroler ESP32. Sistem dilengkapi mekanisme peringatan bertingkat yang memberikan notifikasi pada interval waktu yang telah ditentukan berdasarkan standar ergonomi, memungkinkan pengendara mendapatkan *early warning* sebelum mencapai tingkat kelelahan berbahaya. Dengan kombinasi kesederhanaan sistem, konsumsi daya rendah, dan kemudahan implementasi, Solusi 1 mampu memberikan keseimbangan optimal antara efektivitas monitoring, efisiensi biaya, serta praktikalitas penggunaan, menjadikannya solusi paling tepat untuk meningkatkan kesadaran dan keselamatan pengendara sepeda motor dalam perjalanan jarak jauh.