

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Pengenalan Masalah

Dalam kondisi kesehatan saat ini, berbagai kelompok individu menghadapi tantangan kesehatan yang dapat muncul secara tiba-tiba tanpa adanya pengawasan langsung dari orang lain. Kondisi ini tidak hanya dialami oleh individu yang tinggal sendiri, tetapi juga oleh bayi, anak-anak, maupun orang dewasa yang berada dalam situasi tertentu tanpa pemantauan terus-menerus. Oleh karena itu, konsep *golden hour* atau waktu emas menjadi sangat penting, karena keterlambatan penanganan dapat menentukan apakah seseorang dapat diselamatkan atau tidak[1]. Dalam keadaan darurat, peluang hidup tidak hanya bergantung pada kelengkapan fasilitas medis, tetapi lebih pada seberapa cepat kejadian tersebut terdeteksi dan dilaporkan kepada pihak yang berwenang. Sayangnya, masih banyak kasus kematian di luar rumah sakit yang disebabkan oleh keterlambatan pertolongan karena orang di sekitar tidak menyadari bahwa telah terjadi kondisi gawat darurat.

Di lapangan, sistem keamanan konvensional masih memiliki banyak kelemahan, terutama ketika individu tersebut sedang sendirian tanpa pengawasan. Salah satu masalah utama adalah ketidakmampuan seseorang untuk meminta bantuan secara mandiri saat mengalami serangan, misalnya karena kehilangan kesadaran atau keterbatasan fisik. Sistem yang mengharuskan pengguna melakukan tindakan aktif, seperti menekan tombol darurat, sering kali tidak dapat diandalkan dalam kondisi kritis tersebut. Selain itu, proses pelaporan yang masih bersifat manual cenderung memakan waktu, sehingga menunda kedatangan bantuan. Keterlambatan ini dapat berdampak serius, mulai dari kerusakan organ hingga kematian yang sebenarnya dapat dicegah jika pertolongan datang lebih cepat[2].

Dalam kondisi tanpa pengawasan langsung, keadaan darurat kesehatan sering kali diawali oleh kejadian non-spesifik seperti jatuh, pingsan, atau penurunan kondisi fisik secara mendadak. Kejadian-kejadian ini dapat dipicu oleh berbagai faktor,

seperti kelelahan ekstrim, gangguan tekanan darah, gangguan kardiovaskular, maupun terkait kondisi fisiologis atau fisik lainnya[3]. Pada situasi tersebut, orang dengan kondisi kritis sering kali tidak mampu untuk meminta bantuan secara mandiri akibat kehilangan kesadaran, keterbatasan gerak, atau disorientasi sementara. Akibatnya, kejadian darurat dapat berlangsung tanpa disadari oleh orang di sekitar, sehingga memperbesar risiko keterlambatan penanganan dan memperburuk kondisi korban.

Selain keadaan darurat umum tersebut, terdapat pula kondisi medis tertentu yang memiliki risiko tinggi ketika terjadi tanpa pengawasan langsung, salah satunya adalah epilepsi. Pada penderita epilepsi, kejang dapat terjadi secara tiba-tiba dan tanpa peringatan, baik saat beraktivitas maupun saat tidur, termasuk ketika tidak ada pengawasan langsung. Kondisi ini menimbulkan risiko serius, seperti gangguan pernapasan akut, aspirasi, hingga kematian mendadak yang tidak terduga pada epilepsi (*Sudden Unexpected Death in Epilepsy* atau SUDEP)[4]. Saat kejang berlangsung, penderita epilepsi sering kali kehilangan kesadaran dan kontrol motorik, sehingga tidak mampu melindungi diri atau mengubah posisi tubuh untuk menjaga jalan napas tetap terbuka. Situasi ini serupa dengan kondisi inkapasitasi pada pasien stroke, di mana keterbatasan gerak membuat individu tidak dapat merespons keadaan darurat secara mandiri. Oleh karena itu, deteksi dini terhadap kontraksi otot yang tidak normal atau gerakan kejang yang bersifat ritmik menjadi sangat penting. Deteksi yang cepat memungkinkan penanganan segera, sehingga dapat mengurangi risiko cedera, gangguan pernapasan, maupun komplikasi fatal lainnya[5].

Selain populasi dewasa dan lansia, kerentanan fatal juga terjadi pada bayi di bawah usia satu tahun. Salah satu ancaman serius yang dihadapi adalah *Sudden Infant Death Syndrome* (SIDS) atau sindrom kematian bayi mendadak, yaitu kematian tak terduga pada bayi yang tampak sehat, biasanya terjadi saat tidur. SIDS merupakan bagian dari kategori yang lebih luas yaitu *Sleep-Related Infant Deaths* (SRID), yang mencakup semua kematian bayi yang terjadi selama tidur, baik yang penyebabnya diketahui seperti *suffocation* (tercekik) maupun yang tidak dapat dijelaskan[6].

Menurut data dari World Health Organization (WHO), SIDS dan kematian bayi terkait tidur lainnya menjadi penyebab utama kematian pada bayi usia 1 bulan hingga 1 tahun di negara-negara berkembang maupun maju[7].

American Academy of Pediatrics (AAP) melalui publikasi terbarunya pada tahun 2022 menegaskan bahwa posisi tidur merupakan faktor risiko utama yang dapat dimodifikasi untuk mencegah SIDS dan kematian bayi terkait tidur lainnya[6]. Posisi tidur tengkurap (*prone position*) terbukti meningkatkan risiko SIDS sebesar 2 hingga 13 kali lipat dibandingkan dengan posisi tidur telentang (*supine position*) [6]. Hal ini disebabkan karena pada posisi tengkurap, saluran pernapasan bayi dapat terhalang oleh kasur atau bedding, menyebabkan bayi menghirup kembali karbon dioksida yang telah dikeluarkan (*rebreathing*), dan meningkatkan risiko overheating yang semuanya berkontribusi terhadap SIDS[8]. Selain posisi tengkurap, posisi tidur miring (*side position*) juga dianggap berisiko karena bayi dapat dengan mudah berguling dari posisi miring ke posisi tengkurap. Bayi yang diletakkan dalam posisi miring cenderung mudah terguling menjadi tengkurap tanpa disadari sehingga risiko SIDS tetap tinggi, yaitu dua sampai tiga kali lipat lebih tinggi dibandingkan bayi yang tidur telentang. Meskipun kampanye "*Back to Sleep*" yang dicanangkan sejak tahun 1994 telah berhasil mengurangi angka SIDS hingga 50%[9], masih banyak bayi yang secara tidak sengaja berubah posisi menjadi tengkurap saat tidur, terutama ketika mereka mulai dapat berguling.

Tantangan utama dalam pencegahan SIDS adalah keterbatasan pengawasan orang tua selama bayi tidur, terutama pada malam hari atau ketika orang tua juga beristirahat. Orang tua tidak dapat terus-menerus memantau posisi tidur bayi selama 24 jam, dan seringkali perubahan posisi tidur bayi dari terlentang ke tengkurap terjadi tanpa disadari. Ketika bayi berada dalam posisi berisiko, setiap menit sangat berharga untuk melakukan intervensi. Keterlambatan dalam mendeteksi posisi tidur yang berbahaya dapat berakibat fatal, mengingat SIDS dapat terjadi dalam waktu yang sangat singkat dan tanpa gejala yang terlihat. Situasi ini semakin diperparah oleh fakta bahwa banyak orang tua, terutama orang tua baru, kurang memiliki pengetahuan yang memadai tentang praktik tidur yang aman untuk bayi mereka.

Dampak dari permasalahan ini dirasakan secara luas oleh berbagai pemangku kepentingan (*stakeholders*). Pasien berisiko tinggi hidup dalam kerentanan yang mengancam nyawa, sementara keluarga dan wali mengalami beban psikologis berupa kecemasan konstan (*constant anxiety*) mengenai keselamatan kerabat mereka saat tidak sedang bersama. Di sisi lain, tenaga medis dan penyedia layanan darurat seringkali terkendala dalam memberikan pelayanan optimal karena menerima informasi yang terlambat atau data lokasi yang tidak akurat, sehingga menghambat efisiensi penanganan di lapangan.

Oleh karena itu, pengembangan solusi terintegrasi yang mampu menjembatani celah deteksi dan komunikasi ini menjadi kebutuhan yang sangat mendesak. Diperlukan sebuah sistem cerdas yang mampu memantau kondisi vital secara pasif dan memicu protokol komunikasi darurat secara otonom tanpa campur tangan manusia. Integrasi teknologi deteksi otomatis berbasis *Internet of Things* (IoT) diharapkan dapat memangkas waktu respons secara drastis, memberikan ketenangan pikiran bagi keluarga, dan secara signifikan meningkatkan peluang bertahan hidup bagi individu dengan risiko medis tinggi.

1.1.1 Informasi Pendukung Masalah

Penyakit kardiovaskular (CVDs) merupakan penyebab kematian nomor satu secara global, dengan sekitar 19,8 juta kematian pada 2022. Penyakit kardiovaskular (CVDs) adalah sekelompok gangguan pada jantung dan pembuluh darah, termasuk penyakit jantung koroner dan stroke[10]. Penyakit kardiovaskular tersebut umumnya disertai perubahan parameter fisiologis, seperti peningkatan atau penurunan denyut jantung (heart rate), gangguan laju pernapasan (respiratory rate), serta penurunan saturasi oksigen darah (SpO_2), yang dapat menjadi indikator awal terjadinya kondisi gawat darurat[11]. Oleh karena itu, pemantauan HR, RR, dan SpO_2 menjadi penting sebagai bagian dari deteksi dini gangguan kardiovaskular. Setiap individu memiliki batas normal heart rate (HR), respiratory rate (RR), dan saturasi oksigen (SpO_2) yang dapat berbeda-beda. Namun, secara umum nilai normal HR, RR, dan SpO_2 pada orang dewasa adalah sebagai berikut.

Tabel 1.1 Batas Normal HR, RR, dan SpO₂ pada orang dewasa [12]

Parameter	Satuan	Nilai Normal	Keterangan
Heart Rate (HR)	denyut/menit (bpm)	50 - 100	Detak jantung normal pada orang dewasa saat istirahat
Respiratory Rate (RR)	kali/menit	12 - 20	Laju pernapasan normal pada orang dewasa
Saturasi Oksigen (SpO ₂)	persen (%)	95 - 100	Persentase oksigen dalam darah arteri

Penyakit kardiovaskular, khususnya serangan jantung (acute myocardial infarction), memiliki periode golden hour, yaitu sekitar 60 menit pertama sejak onset gejala seperti nyeri dada atau sesak napas. Pada periode ini, keterlambatan penanganan medis dapat meningkatkan risiko kerusakan miokard yang irreversibel serta mortalitas. Berbagai studi klinis menunjukkan bahwa intervensi yang dilakukan sedini mungkin dalam fase awal serangan jantung berperan penting dalam menurunkan angka kematian dan memperbaiki luaran klinis pasien.[ab]

Selain risiko kardiovaskular, berbagai kelompok individu juga menghadapi ancaman serius dari insiden jatuh (falls). WHO mencatat bahwa jatuh adalah penyebab utama kedua kematian akibat cedera yang tidak disengaja di seluruh dunia[13]. Jatuh secara tiba-tiba dapat menjadi indikasi bahwa seseorang sedang dalam kondisi darurat. Jatuh secara tiba-tiba bisa disebabkan oleh berbagai faktor, seperti serangan jantung, sesak nafas, tekanan darah rendah, faktor lingkungan seperti lantai licin, ataupun kondisi darurat lainnya. Oleh karena itu, penting untuk mengetahui indikasi yang menunjukkan seseorang mengalami jatuh. Berikut adalah indikasi seseorang mengalami jatuh dapat dilihat pada Tabel 1.2 berikut.

Tabel 1.2 Indikasi Seseorang Mengalami Jatuh [14]

Indikasi Jatuh	Parameter / Fitur yang Diamati	Deskripsi Indikasi
Lonjakan percepatan mendadak	<i>Resultant acceleration magnitude</i> ($ a $)	Terjadi peningkatan percepatan yang signifikan dalam waktu sangat singkat akibat benturan tubuh ke permukaan.
Perubahan orientasi ekstrem	Perubahan sumbu X, Y, Z / pitch-roll	Posisi lengan berubah cepat dari orientasi normal (tegak) ke posisi horizontal atau tidak stabil.
Rotasi mendadak	<i>Angular velocity</i> ($\omega_x, \omega_y, \omega_z$)	Terjadi lonjakan kecepatan sudut yang tajam akibat rotasi tubuh saat jatuh.
Aktivitas pasca-jatuh rendah	Variansi / RMS sinyal rendah	Setelah kejadian, sinyal accelerometer menunjukkan sedikit atau tidak ada gerakan.

Menurut data WHO, lebih dari 50 juta orang di seluruh dunia hidup dengan epilepsi, dengan prevalensi aktif sekitar 4–10 per 1.000 penduduk. Setiap tahunnya sekitar 5 juta orang baru didiagnosis dengan kondisi ini, dan sebagian besar berada di negara berpenghasilan rendah dan menengah. Risiko kematian mendadak yang terkait epilepsi, dikenal sebagai *SUDEP*, dialami sekitar 1 dari 1.000 penderita per tahun, dan dapat meningkat signifikan pada orang dengan kejang yang tidak terkontrol. Golden hour pada epilepsi adalah periode 5–30 menit pertama setelah onset kejang, karena kejang yang berlangsung ≥ 5 menit berisiko berkembang menjadi status epilepticus dan jarang berhenti spontan. Berdasarkan pedoman International League Against Epilepsy (ILAE), intervensi cepat pada fase awal sangat penting untuk mencegah kerusakan otak akibat hipoksia dan eksitotoksitas serta menurunkan risiko komplikasi dan mortalitas. Selain itu, orang dengan epilepsi memiliki risiko kematian 2–3 kali lebih tinggi dibandingkan populasi umum akibat berbagai komplikasi penyakit dan kejang yang tidak tertangani dengan baik. Pada

kejadian kejang epilepsi, tubuh mengalami perubahan fisiologis dan motorik yang khas[15]. Salah satu respons yang paling sering muncul adalah perubahan detak jantung, terutama peningkatan denyut jantung secara signifikan selama fase kejang. Fenomena ini dikenal sebagai *ictal tachycardia* dan terjadi akibat aktivasi sistem saraf otonom yang berlebihan saat aktivitas listrik abnormal di otak berlangsung. Perubahan detak jantung ini umumnya muncul bersamaan atau sedikit mendahului manifestasi kejang, sehingga dapat menjadi indikator penting terjadinya episode epilepsi. Selain perubahan pada sistem kardiovaskular, kejang epilepsi juga ditandai oleh gangguan kontrol motorik. Aktivitas listrik otak yang tidak normal menyebabkan kontraksi otot yang kuat, berulang, dan tidak terkoordinasi, sehingga memunculkan gerakan tubuh yang bersifat ritmik dan tidak disengaja. Gerakan ini berbeda dari aktivitas fisik normal karena memiliki pola, amplitudo, dan durasi tertentu yang khas pada kejang, khususnya pada kejang tipe *generalized tonic-clonic*. Kombinasi antara peningkatan detak jantung dan munculnya gerakan motorik abnormal mencerminkan respons sistemik tubuh terhadap kejang epilepsi dan menjadi dasar penting dalam pemahaman mekanisme terjadinya kejang secara menyeluruh[16].

Tabel 1.3 Perubahan Detak Jantung pada Kejang Epilepsi (Ictal Heart Rate)
[17]

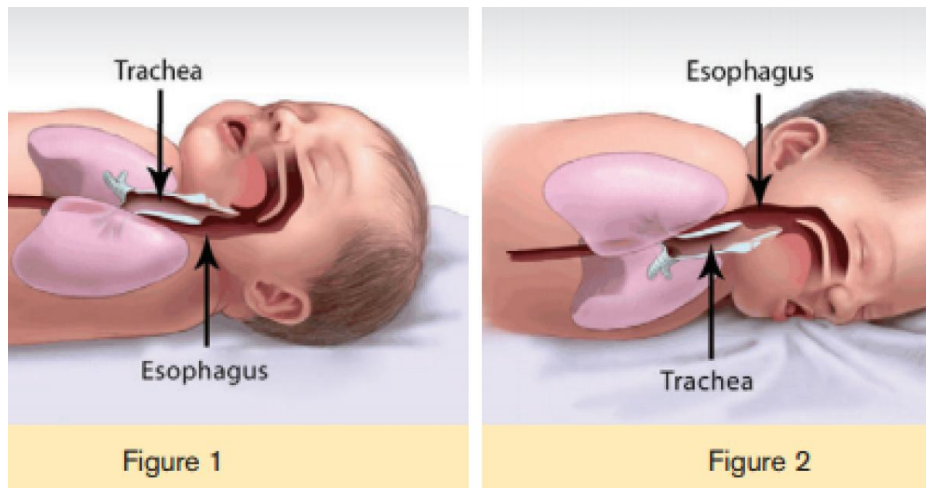
Kondisi	Rentang Detak Jantung (bpm)
Kondisi normal (istirahat)	60 – 100 bpm
Pra-kejang (<i>pre-ictal</i>)	90 – 110 bpm
Saat kejang (<i>ictal phase</i>)	110 – 160 bpm
Puncak kejang (<i>ictal peak</i>)	140 – 180 bpm
Pasca kejang (<i>post-ictal</i>)	100 – 130 bpm
Kondisi berisiko tinggi SUDEP	>160 bpm (tidak terkontrol)



Gambar 1.1 Ilustrasi Orang yang Mengalami Epilepsi

Tanpa sistem deteksi dan komunikasi otomatis, pasien berisiko tinggi tetap berada dalam kerentanan yang fatal.

Masalah medis kritis tidak hanya didominasi oleh penyakit-penyakit yang telah disebutkan sebelumnya. Data dari *Centers for Disease Control and Prevention* (CDC) menunjukkan bahwa SIDS masih menjadi salah satu penyebab utama kematian bayi, dengan angka mencapai 1.529 kematian akibat SIDS pada tahun 2022 di Amerika Serikat[18]. Di Indonesia, meskipun data spesifik SIDS terbatas, angka kematian neonatal masih sangat tinggi dengan sekitar 60.000 kematian tercatat pada tahun 2019[19]. Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa posisi tidur bayi memiliki kaitan langsung dengan risiko SIDS. Tidur dengan posisi tengkurap (*prone position*) merupakan faktor risiko terbesar, karena dapat menyebabkan jalan napas bayi terhalang, peningkatan suhu tubuh, serta akumulasi karbon dioksida akibat udara yang dihirup berulang (*rebreathing*).



Gambar 1.2 Posisi Tidur Telentang (*Figure 1*) dan Tengkurap (*Figure 2*)

Tidur telentang (*supine position*) merupakan posisi yang paling aman bagi bayi dan direkomendasikan secara luas untuk mencegah SIDS. Posisi ini membantu menjaga jalan nafas tetap terbuka dan menurunkan risiko bayi mengalami *rebreathing* atau sesak akibat wajah menempel pada kasur seperti yang dapat dilihat pada Gambar 1.2 di atas. Penelitian menunjukkan bahwa posisi telentang dapat menurunkan risiko SIDS hampir setengahnya dibandingkan posisi tengkurap atau miring[20]. Jika *rebreathing* terjadi akibat posisi prone (misalnya wajah tertutup kasur atau bedding lunak), proses hipoksia dan hiperkapnia dapat berakibat fatal dalam hitungan menit hingga 10-20 menit jika bayi tidak segera bangun atau posisinya tidak dikoreksi, karena cadangan oksigen bayi rendah. Penelitian juga menunjukkan bahwa onset desaturasi oksigen sering terjadi sesingkat 1-3 menit setelah bayi mengambil posisi face-down. Hal ini sejalan dengan rekomendasi American Academy of Pediatrics (AAP) yang menganjurkan posisi tidur telentang sebagai langkah preventif utama[6].

1.1.2 Analisis Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah mengenai urgensi deteksi dini dan respons cepat pada kondisi medis kritis, solusi yang dikembangkan harus dianalisis secara menyeluruh agar dapat diimplementasikan secara realistis. Berikut adalah analisis masalah dari berbagai aspek yang akan menjadi acuan utama dalam perancangan sistem:

A. Aspek Kesehatan: Keterlambatan dalam mendeteksi kondisi medis darurat berakibat langsung pada hilangnya masa kritis "*golden hour*", di mana setiap detik penundaan memicu kerusakan organ permanen akibat terhentinya suplai oksigen ke jaringan vital. Kondisi yang tidak tertangani secara instan secara drastis meningkatkan angka fatalitas dan risiko cacat fisik jangka panjang yang menurunkan kualitas hidup pasien secara signifikan. Selain dampak personal, kegagalan respons cepat ini memperburuk beban sektor kesehatan akibat melonjaknya kebutuhan akan perawatan intensif (ICU) dan prosedur rehabilitasi medis yang kompleks, yang sebenarnya dapat diminimalisir melalui sistem peringatan dini yang efektif.

B. Aspek Ekonomi: Keterlambatan deteksi kondisi medis kritis pada individu berisiko tinggi secara signifikan menurunkan produktivitas dan kesejahteraan ekonomi keluarga serta masyarakat. Ketika individu mengalami serangan medis tanpa pertolongan cepat, risiko kecacatan permanen meningkat, yang mengakibatkan hilangnya kemampuan bekerja dan beralihnya peran anggota keluarga lain menjadi pengasuh penuh waktu (*caregiver*), sehingga mengurangi pendapatan rumah tangga secara keseluruhan. Selain itu, penanganan medis yang terlambat memicu lonjakan biaya pengobatan darurat dan perawatan intensif jangka panjang yang jauh lebih mahal.

C. Aspek Etika, Regulasi, dan Keamanan Data: Implementasi teknologi pemantauan medis secara otomatis menuntut perlindungan privasi yang ketat karena melibatkan pengumpulan data kesehatan fisiologis dan lokasi yang bersifat sangat sensitif. Secara etis, sistem harus menjamin bahwa data pasien tidak disalahgunakan oleh pihak yang tidak berwenang, yang secara hukum diatur dalam regulasi perlindungan data pribadi untuk menjaga kerahasiaan informasi pasien. Selain itu, penggunaan frekuensi nirkabel untuk komunikasi darurat wajib mematuhi standar telekomunikasi yang berlaku guna memastikan interoperabilitas jaringan serta mencegah gangguan pada infrastruktur publik. Keamanan data menjadi fondasi utama dalam membangun kepercayaan pengguna, di mana

kegagalan dalam proteksi informasi dapat berdampak pada pelanggaran hak privasi dan penyalahgunaan data identitas pasien secara digital.

1.1.3 Kebutuhan yang Harus Dipenuhi

Berdasarkan analisis masalah dan batasan yang telah diuraikan, agar solusi dapat berfungsi efektif dalam mengatasi keterlambatan penanganan medis pada individu berisiko tinggi, sistem yang dirancang harus memenuhi kebutuhan-kebutuhan berikut:

1. Sistem harus mampu melakukan pemantauan kondisi fisiologis dan fisik secara terus-menerus.
2. Sistem harus mampu mengirimkan notifikasi segera setelah anomali terdeteksi.
3. Perangkat harus dirancang dalam bentuk yang ringkas dan ringan agar nyaman digunakan dalam aktivitas sehari-hari tanpa mengganggu mobilitas pengguna apabila berbentuk wearable device.
4. Perangkat harus memenuhi standar dan regulasi yang berlaku sesuai tabel 1. berikut.

Tabel 1. Standar dan Regulasi yang Berlaku

No	Dasar Regulasi/Standar	Ketentuan yang Harus Dipenuhi
1	IEC 62471:2006	Sumber cahaya diklasifikasikan Exempt/RG1 (low-risk/no hazard) jika irradiance di bawah limit paparan untuk IR Eye dan Retinal Thermal.
2	ISO 10993	Bahan yang digunakan tidak toxic, tidak menyebabkan iritasi, tidak memicu alergi, dan tidak bersifat karsinogenik
3	Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 27 Tahun 2022	Sistem wajib menjamin perlindungan data pribadi sesuai dengan Undang-Undang Nomor 27 Tahun 2022 tentang Pelindungan Data Pribadi, termasuk

	Tentang Pelindungan Data Pribadi	memperoleh persetujuan eksplisit dari subjek data, menjaga kerahasiaan dan keamanan data kesehatan sebagai data pribadi spesifik, serta menyediakan mekanisme akses, perbaikan, dan penghapusan data oleh subjek data.
--	----------------------------------	--

1.1.4 Tujuan

Tujuan utama dari proyek ini adalah untuk membuat sebuah perangkat pendeteksi dini kondisi medis kritis secara mandiri, mengembangkan sistem yang mampu mengakuisisi data fisiologis dan atau fisik menggunakan kombinasi sensor yang relevan, serta mengimplementasikan logika pemrograman untuk membedakan antara kondisi normal dan anomali. Hal ini dimaksudkan untuk mengatasi keterbatasan deteksi manual pada pasien yang kehilangan kesadaran atau kemampuan motorik. Sistem ini juga dirancang agar mampu mengirimkan notifikasi peringatan secara instan kepada pihak keluarga atau wali saat bahaya terdeteksi, tanpa memerlukan intervensi fisik dari pengguna.

1.2 Solusi

1.2.1 Karakteristik Produk

1. Fitur Dasar

- a. *Sensing Capability*: Solusi yang ditawarkan harus mampu mendeteksi parameter fisiologis dan/atau kondisi fisik (seperti posisi tidur atau guncangan tidak wajar).
- b. *Computing Capability*: Solusi yang ditawarkan harus mampu melakukan pemrosesan data dengan akurasi tinggi dan delay yang rendah sehingga hasil pemrosesan dapat langsung diperoleh tanpa memerlukan waktu yang lama.
- c. *Notification System*: Solusi yang ditawarkan harus mampu mengirimkan peringatan atau notifikasi secara otomatis segera setelah kondisi kritis atau berisiko terdeteksi.

2. Fitur Tambahan

- a. *Low Cost*: Sistem yang dikembangkan memiliki batasan biaya yaitu kurang dari Rp.3.000.000.
- b. Pengerjaan < 6 bulan: Sistem harus selesai dirancang, dibuat, dan diuji dalam waktu kurang dari enam bulan.
- c. *Low Power Consumption*: Sistem sebaiknya hemat energi agar dapat digunakan dalam jangka waktu lama.
- d. *Wireless Connectivity*: Sistem harus mampu terhubung dengan perangkat lain secara nirkabel untuk memudahkan pengiriman data maupun notifikasi.
- e. *Non-Invasive or Safe Wearable Design*: Desain alat aman dan tidak mengganggu atau tidak menempel secara langsung pada pengguna. Alat yang menempel dibuat dalam bentuk yang ringan, ringkas, dan ergonomis agar nyaman dipakai tanpa mengganggu mobilitas.
- f. *User-Friendly*: Sistem harus dapat dengan mudah digunakan tanpa harus memiliki pengetahuan teknis khusus, tidak memerlukan pemeliharaan intensif, serta kalibrasi atau penyesuaian alat berulang.

1.2.2 Usulan Solusi

Berdasarkan permasalahan yang telah diuraikan pada bagian sebelumnya, diperlukan suatu pendekatan solusi yang mampu menjawab tantangan utama berupa keterlambatan deteksi dan komunikasi pada kondisi medis kritis yang terjadi tanpa pengawasan langsung. Solusi yang diusulkan dalam proyek ini dirancang dengan pendekatan modular, di mana sistem dibagi ke dalam beberapa sub-sistem yang masing-masing berfokus pada skenario keadaan darurat yang berbeda, namun tetap memiliki tujuan yang sama, yaitu mendeteksi kondisi berisiko secara dini dan mengirimkan peringatan secara otomatis tanpa memerlukan interaksi aktif dari pengguna.

Pada usulan solusi ini, sistem diklasifikasikan menjadi dua sub-sistem utama. Sub-sistem pertama berfokus pada pendeteksian kemungkinan terjadinya keadaan darurat medis pada individu, yang mencakup kejadian non-spesifik seperti jatuh, pingsan, atau gangguan fisiologis mendadak, serta kondisi medis tertentu seperti epilepsi yang berisiko tinggi ketika terjadi tanpa pengawasan. Sub-sistem kedua

difokuskan pada pendeteksian posisi tidur bayi yang berisiko terhadap terjadinya *Sudden Infant Death Syndrome* (SIDS), yang memerlukan mekanisme pemantauan pasif dan respons cepat karena keterbatasan kemampuan bayi dalam merespons kondisi berbahaya secara mandiri.

1. Solusi 1: Deteksi Posisi Tidur Bayi Berbasis Kamera dan Pencahayaan Inframerah dengan CNN

Solusi ini menggunakan *computer vision* dan *deep learning* untuk menciptakan sebuah sistem pemantauan yang sepenuhnya non-invasif. Sistem ini akan menganalisis citra visual untuk mengidentifikasi dan mengklasifikasikan posisi tidur bayi dalam berbagai kondisi pencahayaan ruangan sehingga dapat memberikan peringatan dini apabila posisi tidur bayi dideteksi berisiko.

Untuk *sensing capability* dari solusi ini digunakan sebuah modul kamera beresolusi standar (misalnya 5 megapiksel) yang terintegrasi dengan *Single-Board Computer* (SBC). Agar dapat beroperasi selama 24 jam khususnya pada malam hari tanpa mengganggu siklus tidur bayi, sistem dilengkapi dengan IR LED dengan panjang gelombang 850 nm yang sering digunakan pada kamera monitoring bayi versi standar yang dijual di pasaran. Spektrum cahaya ini tidak kasat mata bagi manusia, namun dapat ditangkap dengan jelas oleh sensor kamera, memungkinkan kamera untuk melihat dalam gelap[21]. Kamera akan mengakuisisi gambar (*frame*) dengan resolusi misalnya 650x480 piksel secara periodik setiap 2-3 detik. Data mentah ini berupa matriks piksel, yaitu sebuah representasi numerik tiga dimensi (tinggi, lebar, kanal warna RGB) yang berfungsi sebagai input indera digital untuk sistem, menangkap informasi visual dari lingkungan tidur bayi secara non-kontak.

Inti dari computing performance atau kemampuan komputasi pada solusi ini adalah sebuah algoritma *Convolutional Neural Network* (CNN). Berbeda dari jaringan saraf biasa yang memperlakukan input sebagai vektor datar, CNN secara eksplisit dirancang untuk memproses data berbentuk grid, seperti gambar, dengan mempertahankan hubungan spasial antar piksel. Arsitektur ini terdiri dari beberapa

jenis lapisan yang bekerja secara sinergis untuk mengekstrak dan mengklasifikasikan pola visual[22].

Proses ekstraksi fitur dimulai pada Lapisan Konvolusi (*Convolution Layer*). Lapisan ini bekerja dengan menggeser sebuah ‘jendela’ kecil yang disebut filter atau kernel ke seluruh gambar *input*. Kernel ini adalah matriks bobot yang dapat dipelajari, yang bertugas mendeteksi fitur spesifik. Misalnya, sebuah kernel mungkin belajar untuk merespons tepi vertikal sementara yang lain merespons sudut atau gradien warna tertentu. Operasi konvolusi ini secara matematis menghasilkan sebuah *feature map* yang menyorot area di mana fitur yang dideteksi oleh kernel tersebut muncul[23]. Setelah operasi konvolusi, keluaran mentahnya dilewatkan melalui fungsi aktivasi non-linear, umumnya *Rectified Linear Unit* (ReLU). Fungsi ReLU ($f(x) = \max(0, x)$) berfungsi untuk memperkenalkan non-linearitas ke dalam model, memungkinkan model untuk mempelajari hubungan yang jauh lebih kompleks daripada sekedar kombinasi linear sederhana. Tanpa non-linearitas, seluruh jaringan akan berperilaku seperti model linear satu lapis[24].

Untuk mengurangi dimensi spasial dari feature map dan membuat representasi fitur lebih kuat terhadap variasi kecil dalam posisi (invarians translasi), Lapisan Pooling (*Pooling Layer*) diterapkan. Lapisan ini juga bekerja dengan jendela geser. Akan tetapi, alih-alih melakukan perkalian matriks, lapisan ini hanya mengambil nilai maksimum dari setiap jendela. Hal ini secara efektif meringkas kehadiran fitur di suatu wilayah, mengurangi beban komputasi untuk lapisan berikutnya dan membantu mencegah overfitting[23]. Gabungan dari lapisan konvolusi, aktivasi ReLU, dan pooling membentuk blok bangunan dasar yang dapat ditumpuk berulang kali. Lapisan-lapisan awal dalam jaringan belajar mengenali fitur-fitur sederhana dan generik (tepi, warna), sementara lapisan yang lebih dalam menggabungkan fitur-fitur ini untuk mengenali pola yang lebih kompleks dan spesifik untuk masalah yang dihadapi seperti bentuk kepala bayi atau kontur punggungnya[22]. Setelah beberapa blok konvolusi dan pooling, *feature map* yang dihasilkan ‘diratakan’ (*flattened*) menjadi vektor satu dimensi. Vektor fitur ini kemudian dimasukkan ke dalam beberapa Lapisan Terhubung Penuh (*Fully Connected Layer*) yang

merupakan jaringan saraf tiruan standar. Lapisan-lapisan ini bertugas untuk menggabungkan semua fitur yang telah diekstraksi untuk membuat keputusan akhir. Lapisan terakhir menggunakan fungsi aktivasi *softmax* yang mengubah skor mentah dari jaringan menjadi distribusi probabilitas di semua kelas (telentang dan tengkurap), memastikan bahwa jumlah semua probabilitas adalah 1 [25].

2. Solusi 2: Deteksi Posisi Tidur Bayi Berbasis Sensor Tekanan dengan *Rule-based Logic*

Solusi kedua merupakan pendekatan non-visual yang berfokus pada distribusi berat badan bayi secara kuantitatif, dengan cara kerja mengubah permukaan tempat tidur menjadi sebuah area sensor cerdas. Dengan menempatkan sebuah alas sensorik tipis di bawah spreng, sistem ini mampu “merasakan” posisi tidur bayi tanpa perlu pengawasan visual. Solusi ini menggunakan logika berbasis aturan (*rule-based logic*) yang deterministik, andal, dan sangat efisien secara komputasi.

Untuk memenuhi kebutuhan *Sensing Capability*, sistem ini didasarkan pada sebuah alas sensorik berukuran sekitar 40x60 cm yang disematkan dengan matriks *Force-Sensitive Resistors* (FSR) dalam konfigurasi grid misalnya 16x16 (total 256 sensor individual). FSR adalah komponen pasif yang resistansinya menurun secara proporsional dan dapat diprediksi terhadap gaya atau tekanan yang diterapkan. Berdasarkan data, berat bayi yang baru lahir rata-rata adalah 3,5 kg, setara dengan gaya gravitasi sekitar 34,3 Newton. Jika diasumsikan bahwa saat bayi dalam posisi telentang area kontak utama tubuhnya (punggung dan belakang kepala) dengan kasur adalah sekitar 300 cm² (0,03 m²), maka tekanan rata-rata yang dihasilkan dapat diestimasi sebesar 1,14 kPa. Oleh karena itu, sensor FSR yang dipilih harus memiliki sensitivitas tinggi pada rentang tekanan rendah, idealnya mampu memberikan resolusi yang baik pada rentang 0,5 hingga 5 kPa untuk dapat membedakan perubahan distribusi berat yang subtil. Untuk membaca 256 sensor analog menggunakan mikrokontroler yang memiliki pin terbatas, sebuah sirkuit multiplexing akan diimplementasikan. Sirkuit ini akan secara sekuensial mengaktifkan baris dan membaca kolom dari matriks sensor, memungkinkan mikrokontroler untuk memindai seluruh grid dengan cepat. Nilai resistansi dari

setiap FSR kemudian akan dikonversi menjadi nilai tegangan melalui rangkaian pembagi tegangan yang selanjutnya dikuantisasi menjadi nilai digit oleh *Analog-to-Digital Converter* (ADC). Hasilnya adalah sebuah peta tekanan digital atau *array* dua dimensi yang merepresentasikan distribusi tekanan di seluruh permukaan kasur[26].

Inti dari *Computing Performance* pada solusi ini adalah algoritma berbasis aturan (*rule-based logic*) yang dijalankan oleh mikrokontroler untuk mengklasifikasikan posisi tidur berdasarkan peta tekanan tubuh bayi. Setelah peta tekanan mentah diperoleh dari sensor, mikrokontroler akan menjalankan serangkaian algoritma pengolahan sinyal dan logika keputusan untuk menentukan pola distribusi tekanan yang sesuai dengan posisi tertentu, sebagaimana umum diterapkan dalam sistem klasifikasi posisi tidur berbasis peta tekanan[27].

Langkah pertama dalam proses tersebut adalah tahap pra-pemrosesan dan filtrasi, yang berfungsi untuk meningkatkan rasio sinyal terhadap noise sebelum data digunakan lebih lanjut. Peta tekanan mentah terlebih dahulu melalui tahap *thresholding*, di mana nilai tekanan di bawah ambang batas tertentu (misalnya 0,2 kPa) akan dianggap sebagai noise dan di-nol-kan. Pendekatan ini merupakan teknik pra-pemrosesan standar dalam sistem sensor berbasis tekanan untuk memastikan hanya sinyal valid dari tubuh yang dipertahankan. Langkah kedua adalah ekstraksi fitur. Dari peta tekanan yang telah bersih, beberapa fitur kuantitatif yang deskriptif akan diekstraksi. Fitur utama adalah *Center of Pressure* (CoP). CoP adalah sebuah konsep dari biomekanika yang merepresentasikan titik tunggal di mana total dari semua gaya tekanan pada permukaan dapat dianggap bekerja. Dalam konteks ini, CoP adalah indikator yang sangat baik untuk mengetahui pusat massa tubuh bayi di atas kasur, yang secara langsung berkorelasi dengan postur tidurnya. CoP dihitung sebagai rata-rata tertimbang dari koordinat semua sensor yang aktif, di mana bobotnya adalah nilai tekanan dari masing-masing sensor. Secara matematis, koordinat CoP (C_x, C_y) dihitung sebagai berikut[28]:

$$C_x = \frac{\sum_{i=1}^N P_i \cdot x_i}{\sum_{i=1}^N P_i}, \quad C_y = \frac{\sum_{i=1}^N P_i \cdot y_i}{\sum_{i=1}^N P_i} \quad (1)$$

Di mana:

N = jumlah sensor yang aktif

P_i = nilai tekanan pada sensor ke- i , dan

x_i, y_i = koordinat sensor ke- i di dalam grid

Fitur kedua adalah Area Kontak Total, yang dihitung dengan menjumlahkan jumlah sensor yang nilainya melebihi threshold. Fitur ketiga adalah Bentuk Sebaran Tekanan, yang dapat diestimasi dengan menghitung *bounding box* (kotak pembatas) di sekitar semua sensor aktif dan kemudian menghitung rasio aspeknya (lebar/tinggi). Langkah ketiga adalah Logika Klasifikasi Berbasis Aturan (*rule-based logic*). Dengan menggunakan fitur-fitur yang telah diekstraksi, serangkaian aturan IF-THEN-ELSE yang telah didefinisikan akan diterapkan untuk menentukan posisi tidur. Aturan-aturan ini dirancang berdasarkan karakteristik fisik yang diharapkan dari setiap posisi:

- a. Posisi Telentang (*Supine*): Ditandai dengan CoP yang berada di bagian tengah-atas matras (area punggung dan kepala), area kontak yang relatif kecil, dan rasio aspek yang mendekati 1 (persegi atau sedikit vertikal).
- b. Posisi Tengkurap (*Prone*): Ditandai dengan CoP yang berada di tengah matras, namun dengan area kontak yang lebih luas dan tersebar (karena tekanan terdistribusi di dada dan perut) dibandingkan posisi telentang.

Sistem akan melakukan pemindaian (*sampling*) seluruh matriks sensor secara kontinu dengan frekuensi yang cukup tinggi, misalnya 10 kali per detik (10 Hz). Setiap peta tekanan yang baru diperoleh akan segera diproses melalui alur komputasi yang telah dijelaskan. Karena algoritma berbasis aturan ini sangat efisien, keputusan klasifikasi posisi dapat dibuat hampir secara instan setelah setiap pemindaian. Untuk meningkatkan keandalan, sistem diprogram untuk hanya mengirimkan notifikasi jika sebuah posisi berisiko terdeteksi secara konsisten selama beberapa siklus pengukuran berturut-turut, misalnya selama 5 detik. Setelah

kondisi berisiko divalidasi, kebutuhan untuk *Notification Capability* dijalankan. Mikrokontroler akan menggunakan modul Wi-Fi bawaannya untuk terhubung ke jaringan lokal dan mengirimkan notifikasi ke ponsel orang tua.

3. Solusi 3: Sistem Wearable Deteksi Posisi Tidur Bayi Berbasis Sensor *Accelerometer* dan *Gyroscope* dengan *Complementary Filter*

Solusi ketiga mengusulkan sistem *wearable* yang memanfaatkan *Inertial Measurement Unit* (IMU) berbasis MEMS untuk mendeteksi orientasi tubuh bayi secara presisi. Sensor *accelerometer* tiga sumbu mendeteksi vektor percepatan gravitasi untuk mengukur orientasi statis, sementara *gyroscope* mengukur kecepatan sudut rotasi untuk menangkap gerakan dinamis. Kedua data sensor ini difusikan menggunakan *Complementary Filter*, sebuah teknik sensor fusion yang sederhana namun sangat efektif dengan mengkombinasikan 98% kontribusi dari integrasi *gyroscope* (untuk responsivitas dan *smoothness*) dengan 2% dari *accelerometer* (untuk koreksi *drift* jangka panjang)[29]. Algoritma ini mengestimasi sudut *roll* dan *pitch* yang kemudian digunakan untuk mengidentifikasi posisi tubuh telentang ditandai dengan *roll* antara -30° hingga $+30^\circ$, dan tengkurap dengan *roll* $>150^\circ$ atau $<-150^\circ$. Inti komputasi dijalankan oleh mikrokontroler berdaya rendah yang mengeksekusi *Complementary Filter* dengan sampling rate sekitar 50-100 Hz. Setelah orientasi dihitung, sistem menerapkan *State Machine* dengan hysteresis untuk mencegah alarm palsu[30]. Posisi berisiko hanya dikonfirmasi jika sudut *roll* berada dalam zona bahaya secara konsisten selama minimal 5 detik dan magnitude *gyroscope* menunjukkan bayi dalam keadaan stabil (gerakan $<20^\circ/\text{detik}$).

Untuk memaksimalkan daya tahan baterai, mikrokontroler akan menerapkan teknik duty cycling. Mikrokontroler hanya akan 'bangun' secara periodik (misalnya, setiap 1-2 detik) untuk mengambil sampel data, menjalankan algoritma klasifikasi, dan kembali tidur jika tidak ada kondisi berisiko yang terdeteksi. Untuk responsivitas yang lebih tinggi, fitur *wake-on-motion interrupt* pada sensor IMU modern akan dimanfaatkan. Fitur ini memungkinkan sensor itu sendiri, yang mengonsumsi daya sangat kecil, untuk memonitor gerakan secara terus-menerus. Jika gerakan melebihi

ambang batas tertentu, sensor akan mengirimkan sinyal interrupt yang membangunkan mikrokontroler dari mode tidurnya, memastikan tidak ada gerakan signifikan yang terlewatkan. Jika posisi berisiko terdeteksi dan divalidasi sebagai stabil selama periode waktu yang telah ditentukan, misalnya 5 detik, sistem akan memvalidasi kondisi tersebut.

Setelah kondisi berisiko divalidasi, *Notification Capability* akan diaktifkan. Perangkat wearable ini akan dilengkapi dengan modul *Bluetooth Low Energy* (BLE). BLE merupakan teknologi komunikasi nirkabel yang dirancang khusus untuk aplikasi berdaya rendah. Ia mentransmisikan data dalam burst singkat untuk meminimalkan waktu aktif radio, sehingga sangat ideal untuk perangkat yang dioperasikan dengan baterai kecil. Ketika unit komputasi internal mendeteksi adanya posisi tidur yang berisiko, modul BLE akan diaktifkan untuk mengirimkan sinyal peringatan sederhana ke aplikasi pendamping di ponsel pintar orang tua yang berada dalam jangkauan (biasanya hingga 20 meter di dalam ruangan)[31].

1.2.3 Analisis Usulan Solusi

Untuk memastikan solusi yang dikembangkan benar-benar menjawab permasalahan yang telah diidentifikasi, diperlukan suatu pendekatan analisis yang mampu mengaitkan kebutuhan pengguna dengan karakteristik teknis sistem secara sistematis. Setiap kebutuhan tidak memiliki tingkat kepentingan yang sama, sehingga perlu dilakukan penilaian terhadap seberapa besar pengaruh masing-masing kebutuhan terhadap keberhasilan sistem deteksi kondisi darurat yang dirancang. Oleh karena itu, dilakukan pembobotan terhadap kebutuhan pengguna sebagai dasar evaluasi dan perbandingan antar solusi yang diusulkan.

Pada fitur *low power consumption*, aspek ini menjadi penting agar perangkat dapat beroperasi secara kontinu dalam jangka waktu lama tanpa memerlukan pengisian daya yang terlalu sering. Sistem deteksi kondisi darurat harus selalu aktif, karena kejadian kritis dapat terjadi kapan saja tanpa dapat diprediksi. Konsumsi daya yang rendah juga meningkatkan keandalan sistem serta mengurangi risiko perangkat tidak berfungsi akibat kehabisan baterai pada saat kondisi darurat terjadi. Oleh

karena itu, fitur ini diberi nilai 4, karena memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kontinuitas dan keandalan sistem.

Fitur low cost menjadi pertimbangan dari sisi aksesibilitas dan kelayakan implementasi. Sistem yang dikembangkan ditujukan agar dapat digunakan oleh masyarakat luas, termasuk individu dengan keterbatasan ekonomi. Dengan mempertimbangkan harga komponen sensor, modul komunikasi, serta unit pemrosesan yang digunakan, biaya produksi masih dapat ditekan tanpa mengorbankan fungsi utama sistem. Namun, terdapat kompromi antara biaya dan tingkat akurasi sensor, sehingga fitur ini dinilai cukup penting tetapi tidak dominan. Oleh karena itu, fitur low cost diberi nilai 3.

Selanjutnya, fitur *wireless connectivity* memiliki peran penting karena sistem harus mampu mengirimkan notifikasi kondisi darurat secara nirkabel kepada pihak terkait, seperti keluarga, wali, atau tenaga medis. Tanpa konektivitas nirkabel, sistem tidak dapat menjalankan fungsi utamanya sebagai alat peringatan dini. Koneksi nirkabel memungkinkan pengiriman informasi secara cepat dan real-time, meskipun pengguna berada di lokasi yang berbeda. Dengan mempertimbangkan peran krusial tersebut, fitur wireless connectivity diberi nilai 4.

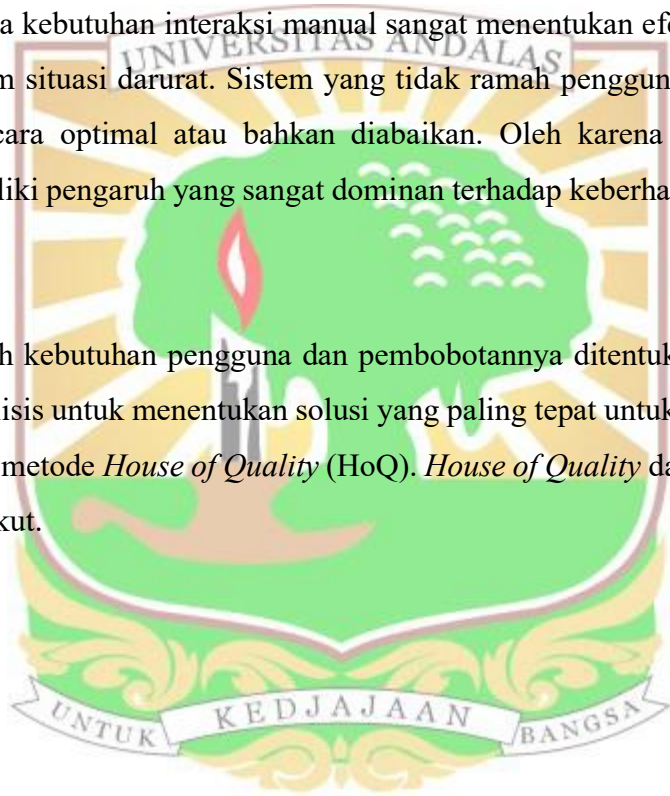
Fitur *non-invasive or safe wearable design* merupakan aspek yang sangat penting karena sistem dirancang untuk digunakan secara langsung pada tubuh pengguna dalam jangka waktu yang lama. Perangkat harus aman, tidak menimbulkan rasa sakit, tidak mengganggu fungsi tubuh, serta tidak memerlukan prosedur medis invasif. Tingkat kenyamanan dan keamanan yang tinggi akan meningkatkan kepatuhan pengguna dalam memakai perangkat secara konsisten. Oleh karena itu, fitur ini memiliki pengaruh yang sangat kuat terhadap keberhasilan sistem dan diberi nilai 5.

Fitur pengerjaan kurang dari enam bulan menjadi pertimbangan penting dari sisi perencanaan dan implementasi proyek. Batasan waktu ini berkaitan langsung dengan target penyelesaian tugas akhir serta ketersediaan sumber daya yang

terbatas. Sistem yang dirancang harus memiliki kompleksitas yang realistis agar dapat dirancang, diimplementasikan, dan diuji secara menyeluruh dalam rentang waktu yang ditentukan. Dengan mempertimbangkan tingkat kesulitan dan cakupan sistem, fitur ini dinilai penting namun masih dapat dikompromikan, sehingga diberi nilai 4.

Terakhir, fitur *user-friendly* menjadi aspek yang sangat krusial karena sistem akan digunakan oleh berbagai kelompok pengguna dengan latar belakang teknis yang berbeda. Antarmuka yang mudah dipahami, proses penggunaan yang sederhana, serta minimnya kebutuhan interaksi manual sangat menentukan efektivitas sistem, terutama dalam situasi darurat. Sistem yang tidak ramah pengguna berisiko tidak digunakan secara optimal atau bahkan diabaikan. Oleh karena itu, fitur *user-friendly* memiliki pengaruh yang sangat dominan terhadap keberhasilan sistem dan diberi nilai 5.

Setelah seluruh kebutuhan pengguna dan pembobotannya ditentukan, selanjutnya dilakukan analisis untuk menentukan solusi yang paling tepat untuk dikembangkan menggunakan metode *House of Quality* (HoQ). *House of Quality* dapat dilihat pada Tabel 1.4 berikut.



Tabel 1.4 *House of Quality*

			Customer Importance Rating	Percent of Customer Importance Rating	Fitur Dasar							
					▲	▲	▲					
					Sensing Capability	Computing Capability	Notification System	Sub-System 2				
								Solusi 1	Solusi 2	Solusi 3		
Fitur tambahan	Low Power Consumption		4	16%	○	○			○	○	●	
	Low Cost		3	12%	▲	▲			○	▲	●	
	Wireless Connectivity		4	16%		○	●		●	●	○	
	Non-Invasive or Safe Wearable Design		5	20%	●				●	○	▲	
	Pengerjaan kurang dari 6 bulan		4	16%	○	●	○		○	●	○	
	User-friendly		5	20%	○	○	●		●	○	▲	
		Importance rating		2,68	2,48	2,28	7,44					
		Percent of Importance		36,02%	33,33%	30,65%	100,00%	4,12	3,4	2,76		
	Solusi 1				●	○	●	4,33				
	Solusi 2				○	○	●	3,61				
	Solusi 3				○	●	○	3,66				

Tabel 1.5 Keterangan Simbol-simbol dalam HoQ

Relationship matrix		
●	Strong	5
○	Medium	3
▲	Weak	1
	No relation	0

Berikut ini merupakan perhitungan nilai ketiga usulan solusi berdasarkan fitur dasarnya:

1. Solusi 1: $5 \times 0,3602 + 3 \times 0,3333 + 5 \times 0,3065 = 4,33$
2. Solusi 2: $3 \times 0,3602 + 3 \times 0,3333 + 5 \times 0,3065 = 3,61$
3. Solusi 3: $3 \times 0,3602 + 5 \times 0,3333 + 3 \times 0,3065 = 3,66$

Adapun penjelasan mengenai perbandingan dari ketiga usulan solusi dengan fitur dasar dan fitur tambahan adalah sebagai berikut:

1. Solusi 1

Solusi ini memiliki hubungan yang erat dengan *Sensing Capability* dan *Notification System*. Kemampuan deteksinya dinilai unggul karena dapat mengidentifikasi postur bayi secara visual dengan detail, non-invasif, dan akurat bahkan dalam kondisi gelap total berkat pencahayaan inframerah. Kemampuan notifikasinya juga sangat baik karena menggunakan koneksi Wifi dan layanan *cloud* yang memungkinkan pengiriman peringatan ke ponsel orang tua di mana saja. Pada *Computing Capability*, solusi ini berhubungan normal karena kinerja komputasinya yang dinilai tinggi membuat sistem memproses data yang telah didapat dengan waktu yang cenderung lebih lama daripada solusi yang lainnya. Meskipun begitu, solusi ini memiliki tingkat akurasi yang tinggi karena menggunakan algoritma yang cukup kompleks.

Pada sisi fitur tambahan, solusi ini memiliki hubungan sedang dengan *Low Power Consumption* dan *Low Cost* karena sistem memerlukan daya yang relatif besar dibandingkan solusi lainnya yang berbasis sensor sederhana dan juga membutuhkan suplai daya secara kontinu. Komponen dan SBC yang digunakan juga memiliki biaya yang lebih mahal dibandingkan solusi berbasis *wearable device*. Sistem ini juga memiliki hubungan sedang dengan pengerjaan kurang dari 6 bulan karena training model CNN yang membutuhkan cukup banyak waktu untuk pengumpulan dan validasi data. Sebaliknya, solusi ini memiliki hubungan kuat dengan *Wireless Connectivity*, *Non-Invasive or Safe Wearable Design*, dan *User-Friendly*. Sistem ini menggunakan konektivitas Wi-Fi untuk mengirimkan notifikasi melalui Telegram yang dapat diakses di mana saja apabila terhubung dengan jaringan Wi-Fi. Sistem juga tidak memerlukan kontak langsung dengan tubuh bayi dan proses pemantauan dilakukan secara visual sehingga aman

digunakan untuk bayi. Selain itu, sistem bekerja secara otomatis tanpa harus dilakukan penyesuaian berulang kali oleh orang tua.

2. Solusi 2

Solusi ini memiliki hubungan yang normal dengan *Sensing Capability* dan *Computing Capability*, serta hubungan yang erat dengan *Notification System*. Kemampuan deteksinya dinilai cukup karena sistem hanya mengandalkan distribusi tekanan dari sensor FSR untuk mengidentifikasi posisi tidur bayi, sehingga informasi yang diperoleh bersifat tidak langsung dan bergantung pada pola kontak tubuh bayi dengan alas sensor. Pada sisi komputasi, solusi ini juga berhubungan normal karena algoritma *rule-based logic* yang digunakan relatif sederhana, memiliki waktu pemrosesan yang cepat, namun kurang adaptif terhadap variasi kondisi nyata. Sementara itu, kemampuan notifikasinya dinilai sangat baik karena sistem dapat mengirimkan peringatan secara otomatis dan cepat segera setelah posisi berisiko terdeteksi secara konsisten, sehingga mendukung respon yang tepat waktu meskipun kemampuan *sensing* dan komputasinya tidak sekuat solusi lainnya.

Pada sisi fitur tambahan, solusi ini memiliki hubungan kuat dengan *Wireless Connectivity* dan pengerjaan kurang dari 6 bulan karena sistem juga menggunakan koneksi Wi-Fi untuk mengirimkan notifikasi peringatan sehingga notifikasi dapat diterima di mana saja oleh orang tua, dan algoritma yang digunakan tergolong sederhana sehingga sistem dapat dikembangkan dan diujikan dalam waktu yang relatif singkat. Solusi ini memiliki hubungan sedang dengan *Low Power Consumption*, *Non-Invasive or Safe Wearable Design*, dan *User-Friendly*. Sistem menggunakan sensor tekanan dan mikrokontroler yang konsumsi dayanya relatif rendah, namun tetap membutuhkan suplai daya kontinu untuk pembacaan sensor secara periodik. Meskipun alat tidak langsung dikenakan pada tubuh bayi, keberadaan alas sensor tekanan memiliki

kemungkinan untuk membuat bayi mengalami ketidaknyamanan ketika sedang tidur. Selain itu, walaupun sistem termasuk mudah untuk digunakan, penempatan dan kalibrasi alas sensor yang harus menyesuaikan tipe kasur bayi atau memperbaiki penempatan alas apabila tergeser membuat sistem ini kurang ramah pengguna. Akan tetapi, solusi ini memiliki hubungan bertentangan dengan *Low Cost* karena sensor FSR yang memiliki kemampuan untuk mendeteksi tekanan yang kecil sesuai berat bayi pada umumnya memiliki harga yang cukup mahal.

3. Solusi 3

Solusi ini memiliki hubungan yang normal dengan *Sensing Capability* dan *Notification System*, serta hubungan yang erat dengan *Computing Capability*. Kemampuan deteksinya dinilai cukup karena sistem wearable berbasis sensor IMU hanya mendeteksi orientasi dan pergerakan tubuh bayi secara tidak langsung melalui data *accelerometer* dan *gyroscope*, serta mengharuskan adanya perangkat yang dikenakan pada tubuh bayi. Pada sisi komputasi, solusi ini berhubungan erat karena menggunakan algoritma *Complementary Filter* dan *state machine* yang sangat efisien, berlatensi rendah, dan dirancang khusus untuk sistem *embedded* berdaya rendah sehingga mampu memproses data sensor dengan stabil. Sementara itu, kemampuan notifikasinya dinilai normal karena sistem mengandalkan komunikasi *Bluetooth Low Energy* yang memiliki keterbatasan jangkauan dan bergantung pada kedekatan perangkat penerima, meskipun tetap mampu mengirimkan peringatan secara otomatis saat kondisi berisiko terdeteksi.

Pada sisi fitur tambahan, solusi ini memiliki hubungan erat dengan *Low Power Consumption* karena sistem ini dirancang dengan mekanisme *wake-on-motion* sehingga konsumsi energi dapat ditekan secara signifikan. Fitur *Low Cost* juga memiliki hubungan erat karena solusi ini menggunakan komponen dan mikrokontroler yang lebih murah

dibandingkan kedua solusi lainnya. Pada fitur *Wireless Connectivity* memiliki hubungan sedang karena sistem ini menggunakan *Bluetooth Low Energy* yang hemat daya namun memiliki jangkauan terbatas dibandingkan Wi-Fi. Pada fitur pengerjaan kurang dari 6 bulan, solusi ini memiliki hubungan sedang karena meskipun algoritma yang digunakan relatif sederhana, desain *wearable* yang harus nyaman digunakan oleh bayi memerlukan proses pengujian yang cukup lama. Pada fitur *Non-Invasive or Safe Wearable Design* dan *User-Friendly*, solusi ini memiliki hubungan bertentangan karena alat harus dikenakan pada tubuh bayi yang berpotensi menimbulkan ketidaknyamanan meskipun telah aman dirancang, dan alat juga harus dilepas pasang berkali-kali oleh orang tua ketika alat tidak atau akan digunakan bayi.

1.2.4 Solusi yang Dipilih

Berdasarkan hasil analisis *House of Quality* (HOQ) dan perhitungan bobot, diperoleh bahwa Solusi 1: Sistem Deteksi Posisi Tidur Bayi Berbasis Kamera Inframerah dan *Convolutional Neural Network* (CNN) merupakan solusi yang paling unggul dibandingkan alternatif lainnya. Solusi ini menunjukkan tingkat kesesuaian tertinggi terhadap kebutuhan pengguna, khususnya pada aspek kemampuan sensing yang akurat dan sistem notifikasi yang andal.

Solusi ini dirancang dengan pendekatan non-invasif menggunakan kamera inframerah yang mampu memantau posisi tidur bayi secara kontinu, baik pada kondisi terang maupun gelap, tanpa memerlukan kontak langsung dengan tubuh bayi. Data visual yang diperoleh kemudian diproses menggunakan algoritma CNN untuk mengklasifikasikan posisi tidur dengan tingkat akurasi yang tinggi. Apabila terdeteksi posisi tidur yang berisiko, sistem secara otomatis mengirimkan notifikasi peringatan kepada orang tua melalui koneksi Wi-Fi dan layanan *cloud*, sehingga memungkinkan respon cepat dari jarak jauh. Meskipun memiliki kebutuhan komputasi yang relatif lebih tinggi dibandingkan solusi lainnya, keunggulan pada akurasi deteksi, kenyamanan penggunaan, serta keandalan notifikasi menjadikan

Solusi 1 sebagai solusi yang paling layak untuk diimplementasikan dalam sistem pemantauan posisi tidur bayi.

