PENINGKATAN KEANDALAN MANUSIA BERBASIS BEBAN KERJA KOGNITIF PADA OPERATOR JASAMARGA *TOLLROAD COMMAND CENTER (JMTC)*

PROPOSAL PENELITIAN

Oleh

GALUH KRISNA DEWANTI

NIM: 263022300010

Program Studi Doktor Teknik Industri



UNIVERSITAS TRISAKTI

ABSTRAK

PENINGKATAN KEANDALAN MANUSIA BERBASIS BEBAN KERJA KOGNITIF PADA OPERATOR JASAMARGA *TOLLROAD COMMAND CENTER (JMTC)*

Oleh
GALUH KRISNA DEWANTI
NIM: 26302300010
(Program Studi Doktor Teknik Industri)

Marga *Tollroad Command Center* (JMTC) merupakan pusat pengendali lalu lintas jalan tol digital pertama di Indonesia yang didukung oleh sistem *Intelligent Transportation System* (ITS*), Advanced Traffic Management System* (ATMS), dan *Incident Management System* (IMS), *Advanced Vehicle Control and Safety System (AVCSS), dan Advanced Traveler Information System (ATIS)*. Dalam operasionalnya, operator dihadapkan pada beban kerja tinggi akibat multitasking, seperti pemantauan *real-time* CCTV, pengelolaan sensor lalu lintas, dan koordinasi simultan dengan tim lapangan. Kondisi ini diperburuk oleh gangguan komunikasi dan tekanan untuk merespon insiden secara cepat, yang meningkatkan risiko *human error*. *Human error* tersebut berpotensi menyebabkan keterlambatan penanganan insiden, kemacetan, dan kesalahan dalam pengambilan keputusan. Oleh karena itu, isu keandalan manusia menjadi krusial untuk dikaji dalam upaya peningkatan efisiensi dan keselamatan operasional jalan tol. Tujuan dari penelitian ini adalah meningkatkan keandalan operator JMTC. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah integrasi metode *Visual Auditori Cognitive Psikomotor* (VACP), dan metode *Cognitive Reliability and Error Analysis Method* (CREAM).

Kata kunci: JMTC, keandalan manusia, beban kerja, VACP, , CREAM

DAFTAR ISI

ABSTRAK .....**Error! Bookmark not defined.**
ABSTRACT .....**Error! Bookmark not defined.**
DAFTAR ISI .....**Error! Bookmark not defined.**
DAFTAR LAMPIRAN .....**Error! Bookmark not defined.**
DAFTAR GAMBAR DAN ILUSTRASI .....**Error! Bookmark not defined.**
DAFTAR TABEL .....**Error! Bookmark not defined.**
DAFTAR SINGKATAN DAN LAMBANG .....**Error! Bookmark not defined.**
Bab 1 Pendahuluan .....**Error! Bookmark not defined.**
1.1 Latar Belakang .....**Error! Bookmark not defined.**
1.3 Tujuan Penelitian .....**Error! Bookmark not defined.**
1.4 Ruang Lingkup Penelitian .....**Error! Bookmark not defined.**
1.5 Kebaruan Penelitian .....**Error! Bookmark not defined.**
1.6 Manfaat Penelitian .....**Error! Bookmark not defined.**
1.7 Sistematika Penulisan .....**Error! Bookmark not defined.**
Bab 2 Studi Literatur .....**Error! Bookmark not defined.**
2.1 Human Reliability .....**Error! Bookmark not defined.**
2.2 Beban Kerja Kognitif .....**Error! Bookmark not defined.**
2.3 Posisi Penelitian .....**Error! Bookmark not defined.**
Daftar Pustaka **Error! Bookmark not defined.**

Bab 1 Pendahuluan

Pada bab ini berisi latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, ruang lingkup/batasan masalah, kebaruan, orisinalitas dan sistematika penulisan.

1.1. Latar Belakang

Pembangunan infrastruktur transportasi, terutama jalan tol, telah menjadi prioritas utama dalam pembangunan di Indonesia selama beberapa dekade terakhir. Jalan tol tidak hanya berfungsi sebagai penghubung antar kota, tetapi juga berperan penting dalam mendorong pertumbuhan ekonomi, meningkatkan mobilitas masyarakat, dan memperkuat integrasi wilayah. Saat ini, jumlah jalan tol di Indonesia terus bertambah. Menurut Badan pengatur Jalan Tol (BPJT), Kementerian Pekerjaan umum dan Perumahan Rakyat (PUPR), hingga Agustus 2025 terdapat 75 ruas jalan tol yang beroperasi dengan total panjang sekitar 3.092,7 km. Total panjang tol tersebut terbagi menjadi 73 ruas jalan tol jalan tol yang dikelola 53 Badan Usaha Jalan Tol (BUJT) yang tersebar di Pulau Jawa, Pulau Bali, Pulau Sumatera, Pulau Kalimantan, dan Pulau Sulawesi (*Buku_BPJT_2023,* n.d.). Mencerminkan upaya pemerintah dalam memperbaiki konektivitas dan mengurangi kesenjangan infrastruktur antara Jakarta, sebagai pusat ekonomi, dengan kota-kota lain di seluruh negeri.

Pembangunan jalan tol ini tidak hanya memberikan dampak pada aspek ekonomi, tetapi juga mencakup dimensi sosial, lingkungan, serta keandalan dalam pengelolaan dan pemanfaatan infrastruktur tersebut. Jasa Marga adalah salah satu pengelola jalan tol terpanjang di Indonesia yaitu di tahun 2024 dengan panjang tol 1.286 km. Semakin luas jaringan jalan tol, menuntut sistem manajemen lalu lintas yang semakin kompleks, melibatkan integrasi sistem pengawasan digital, ribuan kamera CCTV dan sensor lalu lintas.

Sebagai pengelola jalan tol terbesar di Indonesia, Jasa Marga memiliki ruang kendali dalam pengelolaan operasional jalan tol yaitu Jasamarga *Tollroad Command Center* (JMTC). Dalam sistem pengendalian modern, ruang kendali berfungsi sebagai pusat koordinasi operasional yang sangat vital di pembangkit

listrik tenaga nuklir (Zou et al., 2017) (Porthin et al., 2020)(Zhang, Zhang, et al., 2024), ruang kontrol industri petrokimia (Knisely et al., 2020a)(Shirali, Motamedzade, et al., 2019), industri kesehatan (Onofrio et al., 2015)(Xu et al., 2024), industri Kereta api (Fonchang, 2021)(Ciani et al., 2021)(Janota et al., 2022), industri pertambangan (Yang et al., 2024)

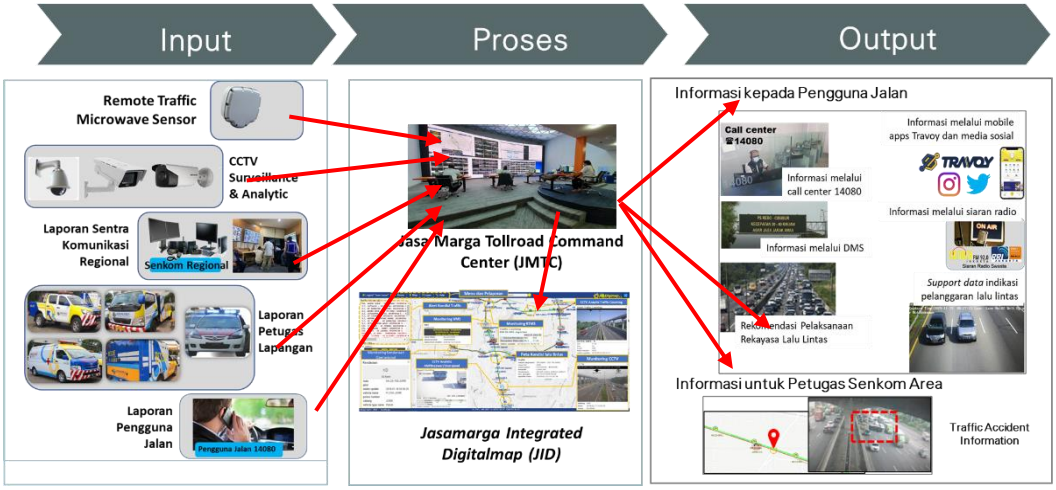


Gambar 1.1 Ruang kendali Jasamarga *Toll Road Operator*
Sumber: JMTC

Jasamarga *Tollroad Command Center (JMTC)* adalah pusat informasi dan pengendali lalu lintas terintegrasi dijalan tol. JMTC mengumpulkan seluruh informasi lalu lintas jalan tol melalui peralatan deteksi yang terpasang di sepanjang jalan tol (lebih dari 2500 CCTV, 320 DMS, 216 Smart CCTV dan 8 sensor *Weight in motion*) untuk selanjutnya diolah dan disampaikan kembali kepada pengguna jalan tol serta pengambil keputusan rekayasa lalu lintas. JMTC dilengkapi dengan *video wall* berukuran besar yang menampilkan berbagai feed CCTV dari ruas-ruas tol, peta kondisi lalu lintas serta *dashboard* data digital berisi indikator kinerja lalu lintas seperti kecepatan rata-rata kendaraan kepadatan arus dan waktu tempuh. Terdapat *workstation* individual dengan *multi-display* monitor untuk menampilan

data spesifik seperti status sensor kendaraan, laporan insiden dan komunikasi dengan unit lapangan.

JMTC mengintegrasikan teknologi digital untuk penyebaran informasi lalu lintas, yaitu menggunakan teknologi automasi untuk deteksi insiden, pemantauan lalu lintas secar real-time, penyebaran informasi cepat melalui sosial media, aplikasi dan *call center* seperti terlihat pada gambar 1.2.



Gambar 1.2 Sistem Penyebaran informasi JMTC

Gambar 1.2 Menunjukkan integrasi teknologi digital dengan input kamera pengawas CCTV kemudian diproses oleh JMTC menggunakan Jasamarga Integrated Digitalmaps (JID) dan output informasi ke Aplikasi mobile (Travoy), media sosia, call center dan *Dynamic Massage Signs* (DMS). Input dari JMTC adalah *Remote Traffic monitoring & suveillance* yang terdiri dari *Remote Traffic Microwave sensor* dan *CCTV sueveillance & Analiytic*. *Remote Traffic Microwave sensor* adalah perangkat untuk memantau kondisi lalu lintas secara otomatis dengan sensor berbasis gelombang mikro dan *CCTV sueveillance & Analiytic* yang berfungsi untuk pengawasan dan analisis lalulintas secara *real-time*. Selain dari alat digital, input JMTC juga berasal dari laporan Sentra komunikasi Regional yaitu pusat komunikasi regional yang menerima dan mengelola laporan dari berbagai sumber seperti petugas lapangan, pengguna jalan yang dapat melaporkan insiden atau masalah melalui call center 14080.

Informasi dari *Remote Traffic monitoring* & *suveillance* dan laporan dari komunikasi regional diolah/diproses oleh *Jasamarga Tollroad Command Center (JMTC)*. Pengolahan Informasi dengan fasilitas digital yang mengintegrasikan data dari berbagai sumber dan menggunakan aplikasi Jasamarga Integrated Digitalmap (JID) yaitu Peta digital interaktif yang memvisualisasikan informasi lalu lintas seperti monitoring WMS, ATMS, kondisi jalur, dan CCTV. Selain itu JMTC juga berkolaborasi dengan pemangku kepentingan untuk mewujudkan kelancaran, ketertiban dan memastikan semua berjalan sesuai aturan yang telah ditentukan.

Setelah diolah oleh JMTC, informasi akan diteruskan untuk pengguna jalan melalui Aplikasi Travoy dan media sosial (instagram, Twitter), call Center 14080 dan siaran radio untuk update kondisi lalu lintas. Informasi juga dapat dilihat langsung dijalan melalui *Dynamic Message Sign* (DMS). Selain untuk pengguna jalan, informasi dari JMTC juga diperuntukkan kepada petugas sentra komunikasi area.

Pemantauan lalu lintas secara *real-time* menggunakan kamera CCTV yang ditempatkan sepanjang jalan tol membantu operator ruang kendali untuk mendeteksi insiden seperti kemacetan, kecelakaan, ataupun kendaraan mogok dijalan tol. Selain berfungsi sebagai pemantau lalu lintas, ruang kontrol jalan tol juga berfungsi sebagai manajemen insiden, ketika terjadi insiden seperti kecelakan atau kendaraan mogok, ruang kontrol dapat berkomunikasi langsung dengan tim patroli atau layanan darurat untuk mengambil tindakan yang sesuai dengan yang dibutuhkan. JMTC merupakan inovasi teknologi yang memenuhi kebutuhan Jasa Marga dan para pengguna dalam mengelola layanan jalan tol secara terintegrasi.

Otomasi dan digitalisasi dalam sistem yang kompleks dapat menimbulkan tantangan baru bagi keandalan operator (Porthin et al., 2020). Digitalisasi di ruang kontrol Secara signifikan meningkatkan efisiensi operasional dan pengambilan keputusan dengan memberikan data real-time, kemampuan prediktif dan otomatisasi karena analisis berbasis AI memungkinkan pemrosesan sejumlah besar data yang dihasilkan oleh perangkat IoT, memungkinkan memberi gambaran ke dalam kondisi operasional (Chowdhury, 2024). Sistem pendukung keputusan berbasis AI meningkatkan interaksi manusia-mesin, mengurangi kelebihan beban

kognitif bagi operator dan meningkatkan kesadaran situasional mereka(Abbas et al., 2024). Integrasi AI dan pembelajaran mesin mengotomatiskan proses pengambilan keputusan rutin, memungkinkan operator manusia untuk fokus pada tugas yang lebih kompleks (Badmus et al., 2024). Transisi dari sistem manual atau semi-otomatis ke teknologi digital di ruang kontrol utama menghadirkan manfaat dan risiko yang signifikan. Transformasi digital dapat meningkatkan efisiensi operasional, meningkatkan pengambilan keputusan, memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih cepat dan lebih akurat, yang penting dalam lingkungan berisiko tinggi seperti farmasi dan manufaktur (Dogan et al., 2024; Ullagaddi, 2024).

Human Error/Kesalahan manusia terjadi ketika tindakan yang dilakukan tidak disengaja oleh pelaku, tidak sesuai dengan aturan atau harapan pengamat eksternal, atau menyebabkan tugas atau sistem beroperasi di luar batas yang dapat diterima (Proctor et al, 2008). Kesalahan manusia dalam sistem yang kompleks sering muncul dari kombinasi faktor kognitif, prosedural, dan lingkungan (Kontogiannis et al, 2009). Dalam faktor kognitif, kesalahan dapat berasal dari kesenjangan pengetahuan, dinamika perhatian, dan pengambilan keputusan strategis dibawah tekanan yang dapat menyebabkan lalai, kesalahan atau pelanggaran (Cook et al, 1994). (Rasmussen et al., 2024) dalam penelitiannya di ruang kendali PLTN menemukan bahwa sistem pendukung keputusan dalam sistem yang kompleks dapat mengurangi beban kerja operator ruang kendali. Seperti ruang kendali JMTC yang memiliki sistem yang kompleks, kesalahan operator JMTC dalam penyampaian informasi kepada petugas lapangan dikarenakan operator tidak bisa fokus yg disebabkan kurangnya waktu istirahat operator. Keterlambatan penanganan aduan dikarenakan antar muka bertukar informasi seperti redaksi berita yang akan tertimbun dengan informasi yang lain. Pemantauan tugas secara real time CCTV, memperbaharui informasi *Taffic information Center Communictor* dan memantau kondisi lalu lintas pada aplikasi Jasa Marga *Integrated Digitalmaps* (JID) dan berkoordinasi dengan sentra komunikasi wilayah untuk kejelasan informasi merupakan tugas operator ruang kendali JMTC. Dengan tugas pemantauan, pengambilan keputusan dalam waktu cepat, memahami informasi

secara cepat dapat menyebabkan beban kerja yang tinggi meningkatkan resiko kesalahan operasional, menyebabkan kelelahan, yang dapat mempengaruhi keandalan operator JMTC.

Tiga sudut pandang human Error dapat terjadi, dari kegagalan sistem (kompleksitas sistem, beban kerja, perbedaan individu), karena proses kognitif manusia dan karena akibat dari keadaan psikologis manusia atau psikososial (*teamwork*). Beban kerja yang timbul akibat kompleksitas tugas turut berperan dalam menurunkan kinerja, sebagaimana terlihat dari menurunnya keandalan (Tropschuh et al., 2022). Kesalahan manusia (*human error*) dalam sistem yang kompleks tidak hanya dipandang sebagai tindakan individu yang salah, tetapi juga sebagai manifestasi dari kegagalan manusia (*human failure*) dalam mempertahankan performa yang diharapkan dibawah pengaruh beban kerja, tekanan waktu, dan kondisi sosio-teknis tertentu.

Kegagalan laten dalam proses organisasi dan pengawasan yang tidak memadai dapat menciptakan kondisi yang kondusif untuk kesalahan (Boroun et al., 2022). Budaya yang berorientasi pada keselamatan dan program pelatihan yang efektif sangat penting untuk mengurangi tingkat kesalahan dan meningkatkan ketahanan sistem secara keseluruhan (Shaik, 2024). Oleh karena itu, untuk memahami dan mengendalikan kesalahan tersebut secara lebih sistematis, diperlukan pendekatan *reliability* yang mampu mengevaluasi dan memprediksi kinerja manusia dalam sistem (Hollnagell, 1998).

Human Reliability Analysis (HRA) dirancang untuk mengidentifikasi, memodelkan, mengukur, dan mengurangi peran manusia dalam Terjadinya kegagalan sistem (P. Liu et al., 2020). Operator ruang kendali seringkali dihadapkan pada situasi di mana mereka perlu memanfaatkan pengalaman dan pengetahuan mereka untuk menjaga agar proses berada dalam rentang operasi yang aman dan optimal. Dalam keadaan semacam ini, keputusan yang kurang optimal yang diambil oleh operator dapat menghasilkan masalah operasional, kondisi proses yang tidak diinginkan, atau dalam situasi yang paling buruk seperti kecelakaan (Jabbari, 2013). Analisis keandalan manusia bertujuan untuk mengidentifikasi potensi serta

mekanisme kesalahan manusia yang dapat berdampak pada keselamatan operasional. Menurut (Kirwan, 2008) analisis Keandalan manusia cukup matang untuk membantu banyak industri dalam menganalisis tugas, mengidentifikasi kesalahan dan kuantifikasi probabilitas kesalahan manusia. Penelitian awal tentang keandalan manusia menghubungkan keandalan kognitif dengan variasi dalam pengamatan psikologis, penyimpangan dalam niat manusia, beban kerja yang terkait dengan pelaksanaan tugas, serta kegagalan dalam proses pemecahan masalah dan pengambilan keputusan (Ntuen, 2007).

Penelitian keandalan manusia pada ruang kendali di beberapa indutri proses telah menunjukkan bahwa akitivitas operator dalam ruang kendali seperti PLTN sangat bergantung pada prosedur formal dan struktur tugas yang stabil, yang memungkinkan pengendalian dilakukan melalui aturan berbasis kondisi serta mekanisme kontrol yang bersifat berulang tanpa adanya perubahan kondisi sistem secraa cepat (De Carvalho, 2006). Di industri proses seperti petrokimia, ruang kendali juga berfokus pada pemantauan parameter yang cenderung stabil dan loop kontrol yang terdefinisi (Ramezanifar et al., 2022). Dengan demikian, ruang kendali pada sektor-sektor tersebut memiliki karakteristik yang berbeda secara kognitif dibandingkan dengan ruang kendali tranportasi jalan tol. Dimana ruang kendali transportasi jalan tol dihadapkan pada fluktuasi kecepatan perubahan kondisi, kebutuhan keputusan non rutin.

Berbagai metode analisis keandalan manusia (HRA) telah dikembangkan untuk mengidentifikasi dan mengkuantifikasi kesalahan manusia, seperti THERP dan HEART yang berbasis probabilistik, hingga metode yang mempertimbangkan aspek kognitif seperti metode CREAM dan ATHEANA serta pendekatan integratif yang menggabungkan berbagai metode seperti SPAR-H, NARA (Swain et al., 1983)(Hollnagell, 1998)(Kirwan et al., 1998). Berdasarkan kajian literatur, perkembangan metodologi HRA ini dapat dikelompokkan kedalam tiga generasi, yaitu generasi pertama berfokus pada keterampilan dan aturan faktor manusia (misal AHARP dan TESEO), generasi kedua yag mengintegrasikan daktor internal dan eksternal yang mempengaruhi keandalan manusia (seperti CREAM dan

ATHEANA), serta generasi ketiga yang mengarah pada penggunaan pemodelan dan simulasi sistem dengan representasi manusia secara virtual (Alvarenga et al., 2014)(Bona et al., 2021).

Meskipun *Human Reliability analysis* (HRA) berkembang pesat, masih terdapat beberapa keterbatasan mendasar dalam literatur. Pertama, sebagian besar metode HRA konvensional seperti THERP dan HEART lebih berfokus pada estimasi probabilitas kesalahan manusia tanpa menguraikan secara rinci proses kognitif yang mendasari kinerja operator, sehingga kurang mampu menjelaskan bagaimana kesalahan terbentuk dalam konteks tugas yang kompleks (Swain et al., 1983). Kedua, metode generasi kedua seperti CREAM (Hollnagell, 1998) memang telah memasukkan aspek kognitif dan kondisi kontekstual melalui *common performance conditions* (CPC), namun penilaiannya masih bersifat kualitatif dan bergantung pada subjektifitas analis sehingga berpotensi menimbulkan variabilitas hasil. Ketiga, penelitian terkait beban kerja kognitif umumnya menggunakan pendekatan kuantitatif seperti NASA-TLX, tetapi belum banyak yang mengintegrasikan secara langsung kedalam kerangkan HRA untuk meningkatkan akurasi analisis keandalan manusia. Selain itu, sebagian besar studi hanya mengidentifikasi beban kerja atau kesalahan manusia secara terpisah, tanpa menghubungkan secara sistematis antar struktur tugas, kompleksitas kognitif, beban kerja, dan probabilitas kesalahan. Padahal dalam konteks lingkungan ruang kendali transportasi yang kompleks dan dinamis, keterbatasan ini menjadi signfikan karena tingginya tuntutan visual dan kognitif yang berpotensi meningkatkan risiko *human error* dan dapat mempengaruhi tingkat keandalan operator. Oleh karena itu, terdapat kebutuhan mendesak untuk mengembangkan pendekatan yang mampu mengintegrasikan analisis tugas, kuantifikasi beban kerja serta evaluasi *human reliability* dalam satu kerangka yang terpadu dan lebih objektif.

Pentingnya mengintegrasikan beban kerja ke dalam analisis keandalan manusia didasarkan pada fakta bahwa beban kerja, baik yang bersifat kognitif, visual, maupun fisik merupakan salah satu faktor utama yang mempengaruhi terjadinya kesalahan manusia. Dalam konteks sistem yang kompleks, kesalahan manusia tidak

hanya disebabkan oleh kegagalan individu, tetapi juga oleh kondisi kerja yang mempengaruhi proses kognitif seperti perhatian, memori dan pengambilan keputusan (Reason, 2000). Penelitian dalam bidang *human factors* juga menunjukkan bahwa peningkatan beban kerja, khususnya dalam bentuk *cognitive overload* dapat menurunkan performa operator dan meningkatkan kemungkinan terjadinya kesalahan (Helmreich, 2000;Wickens, 2002). Selain itu, beban kerja sering berperan sebagai faktor laten yang tidak langsung terlihat tetapi berkontribusi signifikan terhadap kegagalan sistem melalui penurunan kualitas pemrosesan informasi dan respon operator (Selvik et al., 2020). Dalam sistem dengan kompleksitas tinggi, kesalahan operator sering kali merupakan manifestasi dari tuntutan tugas yang tinggi dan beban kerja kognitif yang tidak terkelola dengan baik (Wickens et al., 1984). Oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang mengintegrasikan analisis tugas dan pengukuran beban kerja sebagai dasar dalam mengevaluasi human error dan human reliability. Sehingga analisis keandalan manusia dapat dilakukan secara lebih komprehensif dan kontekstual.

Berangkat dari kesenjangan tersebut, penelitian ini menawarkan tiga kontribusi kebaruan yang signifikan. Pertama, penelitian ini mengusulkan integrasi kuantitatif antara analisis tugas dan pengukuran beban kerja menggunakan metode VACP kedalam kerangkan Human Reliability Analysis (HRA), sehingga penilaian *Common Performance Condition* (CPC) pada metode CREAM tidak lagi hanya berbasis subjektivitas analis, tetapi didukung oleh indikator beban kerja yang terukur. Kedua, penelitian ini mengembangkan pendekatan berbasis struktur tugas yang secara sistematis menghubungkan karakteristik tugas, kompleksitas kognitif dan potensi human error, sehingga mampu menjelaskan mekanisme terbentuknya kesalahan secara lebih kausal dibandingkan pendekatan HRA konvensional yang cenderung langsung mengestimasi probabilitas kesalahan. Ketiga, penelitian ini merumuskan suatu kerangka terpadu yang mengaitkan analisis tugas, beban kerja dan *human reliabilty*.

Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya meningkatkan akurasi analisis keandalan manusia, tetapi juga memberikan dasar yang lebih kuat untuk

perancangan sistem kerja yang adaptif dan berorientasi pada pengurangan risiko kesalahan operator.

1.2. Rumusan Masalah

Hingga akhir tahun 2025 total jalan tol yang beroperasi di Indonesia adalah 3.092,7 km dan akan bertambah tiap tahunnya. Semakin luas jangkauan tol memungkinkan arus barang, jasa, dan manusia menjadi lebih lancar dan efisien. Semakin luas jaringan jalan tol, semakin kompleks manajemen lalu lintas yang diperlukan seperti sistem keamanan, sistem keselamatan dan efisiensi operasional yang menuntut tingkat keandalan manusia yang tinggi, terutama dalam pemantauan lalu lintas, pegambilan keputusan, dan respon terhadap kondisi darurat. Ruang kendali jalan tol menjadi sangat penting untuk operasional jalan tol. Digitalisasi sistem pada ruang kendali dapat meningkatkan efisiensi namun juga berpotensi menimbulkan tantangan baru.

Operator JMTC menghadapi tuntutan kerja multimodal yang melibatkan pemrosesan visual, auditori, kognitif, dan psikomotorik secara simultan.karakteristik tugas tersebut berpotensi menimbulkan beban kerja kognitif, terutama pada aktivitas pemantauan visual dan pengambilan keputusan rel-time. Dalam kondisi tersebut, peningkatan beban kerja dapat mempengaruhi kondisi kinerja operator dan meningkatkan kemungkinan terjadinya human failure.

Masalah keandalan manusia dapat terjadi dimana saja. Dalam ruang kontrol Telemetri (Kohani et al., 2014) di mana keterlambatan dan kegagalan dalam merespons tanda-tanda vital pasien yang tidak teratur dapat menyebabkan kejadian buruk pada pasien. Dalam bidang *maintenanc*e truk tambang (Hossein et al., 2024) titik akar kritis yang berkontribusi terhadap kesalahan manusia meliputi penjadwalan perawatan preventif dan korektif secara bersamaan, tugas-tugas yang berulang, dan penggunaan alat kontrol yang tidak tepat. Peneliti (Onofrio et al., 2015) Keandalan manusia dalam lingkungan rumah sakit khususnya ruang bedah menemukan bahwa penyebab kesalahan adalah kebisingan, beban kerja tinggi, komunikasi tim yang buruk dan distraksi/gangguan. Masalah keandalan manusia juga ditemukan dalam ruang kontrol PLTN (Porthin et al., 2020) menemukan

bahwa kelalaian operasi, objek yang salah, operasi yang salah, mode yang membingungkan, operasi yang tidak memadai dan operasi yang tertunda. Penelitian (O'Hara John et al., 2002) di ruang kendali pembangkit listrik tenaga nuklir, operator menghadapi kesulitan dalam memperoleh informasi yang berpotensi penting untuk tugas utama mereka karena fokus mereka terbagi antara manajemen antarmuka dan beban kerja yang tinggi. Penelitian (Fonchang, 2021) dalam ruang kendali Kereta Api menemukan kesalahan dalam penerapan signal, kesalahan dalam pengaturan kecepatan kereta, kesalahan pengendalian persinyalan, kesalahan dalam komunikasi, kesalahan dalam pemeliharaan dan inspeksi menyebabkan keandalan operator ruang kontrol.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan keandalan operator ruang kendali JMTC, strategi mitigasi seperti apa yang dapat diterapkan guna meningkatkan keselamatan dan efisiensi dalam pengelolaan infrastruktur tol.

Berdasarkan latar belakang diatas, rumusan masalah dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Bagaimana struktur tugas dan tuntutan kognitif operator ruang kendali JMTC dapat diidentifikasi melalui pendekatan HTA dan Cognitive Task Analysis?
2. Bagaimana karakteristik dan distribusi beban kerja operator berdasarkan modalitas *Visual, Auditory, Cognitive,* dan *Psychomotor* (VACP) pada setiap sub-subtask operasional?
3. Bagaimana tuntutan kognitif dan kondisi kinerja operator mempengaruhi potensi *human failure* pada operator ruang kendali JMTC?
4. Bagaimana mitigasi resiko kesalahan operator untuk meningkatkan keandalan operator dan meminimalkan risiko human *error* pada ruang kendali JMTC?

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah meningkatkan keandalan operator ruang kendali JMTC dengan mengembangkan model analisis keandalan manusia berbasis kognitif untuk operator ruang kendali transportasi melalui integrasi *Cognitive Task*

Analysis, pengukuran beban kerja VACP, dan pendekatan *Cognitive Reliability And Error Method* (CREAM).

Ruang Lingkup Penelitian

Penelitian ini berfokus pada :

1. Analisis keandalan manusia dalam ruang kendali digital Jasa Marga Tollroad Command Center (JMTC) dengan integrasi metode beban kerja kognitif VACP.
2. Ruang kendali JMTC yang menjadi objek dalam penelitian ini adalah Ruang kendali Pusat JMTC yang beralamat Jl. Galaxy I No.18, RT.004/RW.001, Jaka Mulya, Kec. Bekasi Sel., Kota Bks, Jawa Barat 17146

1.4. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat antara lain:

1. Bermanfaat untuk peningkatan layanan lalu lintas dan keselamatan pengguna di jalan tol.
2. Menjadi referensi baru di bidang teknik industri dengan mengintegrasikan Beban kerja, identifikasi resiko kegagalan dan Analisis Keandalan manusia untuk meningkatkan keandalan Operator.
3. Menyediakan rekomendasi mitigasi risiko kesalahan operator yang dapat diimplementasikan oleh pemangku kepentingan JMTC untuk meningkatkan keselamatan dan kinerja sistem.

2. Sistematika Penulisan

Berikut ini adalah sistematika penulisan disertasi yang disusun sebagai berikut:

BAB 1 PENDAHULUAN

Pada bab ini berisikan uraian dari latar belakang penelitian keandalan manusia pada ruang kontrol yang bersifat digital, rumusan masalah berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, tujuan penelitian berdasarkan pada rumusan masalah penelitian, ruang lingkup untuk memperjelas permasalahan yang akan diteliti, kebaruan (*novelty*) dari

adanya gap penelitian pada model yang akan dibangun, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisikan studi literatur yang menjelaskan tahapan dari meta analisis berdasarkan dari kata kunci pada penelitian yaitu keandalan manusia, ruang kontrol digital, dengan bantuan software Publish or Perish dan Vosviewer. Hasil meta analisis tersebut akan diperoleh posisi penelitian berdasarkan pada penelitian-penelitian terdahulu. Bab ini juga berisikan kerangka penelitian yang menggambarkan fenomena atau permasalahan pada keandalan manusia dalam ruang kontrol digital.

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelasan langkah-langkah penelitian secara detail mengenai tahapan dalam perancangan model mitigasi kesalahan manusia dalam lingkup ruang kontrol transportasi yang bersifat digital, waktu dan pelaksanaan penelitian, serta membuat diagram alir penelitian, dan rencana penelitian dan publikasi sebagai indikator luaran dari model yang dibangun.

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab 2 Tinjauan Pustaka

Pada Bab Ini berisi kajian pustaka mengenai faktor manusia/ ergonomi, Faktor Manusia (Ergonomi) dalam sistem yang kompleks, Analisis Keandalan Manusia (*Human Reliability Analysis*), Kesalahan Manusia (*Human Error*) dalam sistem yang komplek, Mitigasi Kesalahan Manusia (*Mitigation Human Error*), beban Kerja Kognitif, posisi penelitian kerangka pikir penelitian dan model awal.

2.1 Human Reliability

Human Reliability/keandalan manusia merupakan kemampuan manusia untuk melaksanakan tugas dengan tingkat kesalahan sedikit mungkin dalam suatu sistem, baik dalam kondisi normal maupun kondisi darurat (Swain et al, 1983). Penilaian human reliability bertujuan untuk memahami, mengukur dan mengurangi kesalahan manusia. Analisis keandalan manusia bertujuan untuk mengidentifikasi potensi serta mekanisme kesalahan manusia yang dapat berdampak pada keselamatan operasional. Menurut (Kirwan, 2008) analisis keandalan manusia cukup matang untuk membantu banyak industri dalam menganalisis tugas, mengidentifikasi kesalahan dan kuantifikasi probabilitas kesalahan manusia.

Analisis Keandalan Manusia dapat dilakukan pada tahap awal desain, awal konseptual atau konseptual sebuah sistem (Hamza & Diaconeasa, 2022). Sebagian besar metode Analisis Keandalan Manusia yang umum digunakan saat ini dikembangkan sebelum adanya ruang kontrol canggih dan digital, sehingga perubahan keandalan dalam pekerjaan tidak dapat diperhitungkan dengan baik (Porthin et al., 2016). Keandalan manusia dapat dipengaruhi oleh organisasi, kondisi lingkungan, support, waktu yang tersedia, pengalaman, kolaborasi (Hollnagell, 1998), beban kerja (Boring et al., 2007), stres dan pemicu stres (Whaley et al., 2011). (Bye, 2023) meneliti keandalan manusia ketika penggunaan teknologi baru dan menemukan bahwa kerja tim dan faktor organisasi dapat diintegrasikan kedalam Analisis Keandalan Manusia. (Porthin et al., 2016) menganalisis keandalan manusia dalam ruang kontrol digital di PLTN menghasilkan kesimpulan bahwa diperlukan *performance shapping faktor* (faktor pembentuk kinerja) yang bersifat digital untuk menganalisis Keandalan manusia

dalam lingkungan digital. (Zou et al., 2017) mengatakan bahwa dampak digitalisasi ruang kontrol utama adalah beban kognitif operator lebih tinggi diandingkan dengan beban kognitif ruang kontrol tradisional.

Keandalan manusia secara signifikan berdampak pada berbagai industri penting, mempengaruhi keselamatan, efisiensi operasional dan menajemen resiko. (Hogenboom et al., 2020) dalam penelitiannya memperoleh temuan bahwa alokasi fungsi kontrol antara operator manusia dan sistem otomatis dapat mempengaruhi keandalan manusia. Temuan tersebut menunjukkan bahwa alokasi fungsi kontrol yang optimal dapat meningkatkan keselamatan dan efisiensi operasional.

Meskipun berbagai metode Human Reliability Analysis telah banya digunakan untuk mengidentifikasi dan mengkuantifikasi probablitas kesalahan manusia, sebagian besar metode tersebut dikembangkan berdasarkan karakteristik sistem analog yang relatif stabil dan prosedural. Metode seperti THERP, CREAM generasi awal, maupun pendekatan HRA konvensional umumnya berasumsi bahwa interaksi operator dengan sistem berlangsung melalui alur kerja yang terstruktur, sumber informasi yang terbatas, dan tingkat otomatisasi yang relatif rendah. Kondisi tersebut berbeda secara signifikan dengan lingkungan ruang kendali digital modern yang ditandai oleh tingginya volume informasi, integrasi berbagai sumber data secara simultan, serta kebuthan pengambilan keputusan secara real-time (Porthin et al., 2016).

Dalam lingkungan ruang kendali digital, operator tidak hanya menjalankan satu tugas secara berurutan, tetapi harus melakukan multitasking, memonitor barbagai tampilan visual secara bersamaan, berpindah antar sumber informasi (*information switching*), serta mengintegrasikan data dari CCTV, sensor, sistem komunikasi, dan aplikasi digital dalam waktu yang terbatas. Kondisi ini meningkatkan tuntutan atensi dan pemrosesan informasi yang tidak secara eksplisit direpresentasikan dalam sebgaian besar metode HRA konvensional. Akibatnya, mekanisme bagaimana tuntutan tgas menghasilkan beban kerja kognitif dan kemudian memengarui keandalan manusia belum dapat dijelaskan secara memadai.

Selain itu, digitalisasi ruang kendali juga meningkatkan risiko *visual overload*, yaitu kondisi ketika operator harus memproses sejumlah informasi visual yang ditampilkan secara simultan pada beberapa layar atau antarmuka digital. Fenomena ini menjadi semakin penting karena banyak keputusan operasional bergantung pada kemampuan operator untuk mendeteksi, menginterpretasikan, dan mengintegrasikan informasi visual secara cepat dan akurat (Zou et al., 2017). Namun demikian, sebagian besar metode HRA masih berfokus pada faktor-faktor umum seperti waktu yang tersedia, prosedur, pelatihan, dan kondisi organisasi, tanpa mengukur secara langsungdistribusi tuntutan visual, auditori, kognitif, dan psikomotor yang muncul selama pelaksanaa tugas.

Oleh karena itu, terdapat kebutuhan utnuk merngembangkan pendekata Human Reliability Analysis yang tidak hanya mempertimbangkan faktor pembentuk kierja (*Performance Shaping Factors*) atau *Commom Performance Condition* (CPCs), tetapi juga mampu menjelaskan bagaimana karakteristik tugas dan tuntutan beban kerja pada lingkungan digital membentuk potensi kesalahan mausia. Pendekatan semacam ini menjadi penting untuk memahami mekanisme hubungan antara tuntutan tugas, beban kerja kognitif, dan keandalan manusia pada ruang kendali transportasi digital yang broperasi secara dinamis dan real-time.

2.2 Beban Kerja Kognitif

Beban kerja kognitif dapat secara intuitif didefinisikan sebagai total kerja kognitif yang diperlukan untuk menyelesaikan tugas tertentu dalam jangka waktu terbatas (Longo, 2014). Beban kerja kognitif mengacu pada upaya yang dilakukan oleh pikiran saat melakukan tugas (Ghanavati et al., 2019). Beban kerja kognitif memproses tugas utama dari waktu ke waktu, dimediasi oleh faktor lingkungan dan situasi dinamis eksternal, serta dipengaruhi oleh karakteristik internal statis tertentu dari operator manusia, misalnya mengatasi tuntutan tugas statis, dengan upaya dan perhatian penuh (Longo, 2022).

Beban kerja kognitif mencerminkan tingkat aktivasi dari kumpulan sumber daya yang terbatas, kapasitas yang terbatas, dan kemampuan kognitif untuk memproses tugas utama secara berkelanjutan. Beban kerja yang tinggi tidak secara otomatis

menghasilkan kesalahan (*error*) namun meningkatkan probabilitas terjadinya kesalahan (Wickens, 2002). Menurut (Reason, 2009) beban kerja bertranslasi menjadi error ketika tekanan kognitif mengganggu salah satu atau lebih fase pemrosesan informasi manusia (*planning, storage, execution*) sehingga menghasilkan *mistake, lapse* atau *slips*. Beban kerja bukan penyebab langsung, tetapi faktor pemicu yang meningkatkan probabilitas kegagalan kognitif.

Teori sumber daya ganda mengindikasikan bahwa interferensi antara dua tugas akan lebih besar jika keduanya menggunakan lebih banyak dimensi yang sama, karena mereka bersaing untuk sumber daya kognitif yang terbatas (Wickens, 2002). Model sumber daya ganda 4-dimensi yang dikembangkan oleh Wickens merinci dimensi-dimensi tersebut dan memungkinkan prediksi komputasional terkait kinerja serta interferensi pada tugas ganda.

Peneliti beban kerja semakin beralih ke ukuran objektif-empiris dengan mengukur kinerja operator atau kondisi fisiologis melalui perilaku. Ukuran objektif-empiris memiliki beberapa keunggulan dibandingkan ukuran subjektif-empiris, termasuk kemampuannya untuk mengukur dalam waktu nyata, menghilangkan bias respons operator, dan gangguan tugas yang relatif rendah (Rusnock et al, 2016). Salah satu pemodelan kinerja manusia komputasi yang paling dapat diandalkan adalah metode VACP (visual, auditori, kognitif, psikomotorik) yang digunakan untuk memprediksi kinerja (Hugo el at, 2012).

2.3 Human Error

Masalah kesalahan manusia dapat dianalisis melalui dua perspektif utama yaitu pendekatan individu dan pendekatan sistem (Reason, 2000). Kedua pendekatan ini memiliki model penyebab kesalahan yang berbeda, yang pada gilirannya menghasilkan filosofi manajemen kesalahan yang sangat kontras. Pendekatan individu berfokus pada kesalahan individu dan pedekatan sistem berfokus pada kondisi sistem dimana individu tersebut bekerja. Menurut (Rasmussen, 1982), ada tiga tingkatan perilaku manusia yang sesuai dengan kesalahan masing-masing tingkatan. Tingkat pertama perilaku berbasis keterampilan, tingkatan kedua perilaku berbasis aturan dan tingkatan ke tiga perilaku berbasis pengetahuan.

Kesalahan manusia dalam sistem yang kompleks sering muncul dari kombinasi faktor kognitif, prosedural, dan lingkungan (Kontogiannis et al., 2009). Dalam faktor kognitif, kesalahan dapat berasal dari kesenjangan pengetahuan, dinamika perhatian, dan pengambilan keputusan strategis dibawah tekanan yang dapat menyebabkan lalai, kesalahan atau pelanggaran (Cook et al., 1994). Kegagalan laten dalam proses organisasi dan pengawasan yang tidak memadai dapat menciptakan kondisi yang kondusif untuk kesalahan (Boroun et al., 2022).

Budaya yang berorientasi pada keselamatan dan program pelatihan yang efektif sagat penting untuk mengurangi tingkat kesalahan dan meningkatkan ketahanan sistem secara keseluruhan (Shaik, 2024). (Pranesh et al., 2017) dalam penelitiannya menemukan human error yang terjadi dalam kasus Macondo Well Blowout adalah kurangnya kepemimpinan dan budaya keselamatan yang buruk, kegagalan dalam mengendalikan respon yang darurat. Menurut (Krishnan et al., 2014;Nazir, 2024) faktor yang mempengaruhi human error dalam kecelakaan bidang maritim adalah kegagalan manajemen, faktor manusia dan organisasi. Penilitian (Maternová et al., 2023) menemukan penyebab kecelakaan maritim di Inggris dari tahun 2015-2022 kesalahan manusia menyumbang 95 kejadian dari 112 kecelakaan. (Nkosi et al., 2020) dalam penelitiannya menemukan manajemen dan pengawasan yang buruk, pelatihan yang tidak memadai, prosedur dan instruksi yang ditulis dengan buruk, komunikasi yang buruk, budaya organisasi yang buruk, tekanan waktu, stres dan kelelahan, inkompetensi, desain peralatan, faktor lingkungan. (Velmurugan et al., 2022) mengungkap bahwa faktor organsasi dan lingkungan memiliki pengaruh terhadap kesalahan manusia. Human error memiliki dampak hilangnya nyawa karena kecelakaan (Latorella et al., 2017;Hobbs, 2015) gangguan ekonomi organisasi (Alkhaldi et al., 2017).

2.4 Metode Visual, Auditori, Cognitive, Psykomotor (VACP)

Metode VACP (*visual, auditori, cognitive, psikomotor*) dibangun oleh Aldrich & McMacren berdasarkan teori sumber daya berganda Wickens (Wickens, 2002), mengakui bahwa permintaan kognitif dapat diarahkan pada saluran sumber daya yang berbeda, yang masing-masing memiliki kapasitas tersendiri. VACP

dikembangkan untuk menilai pekerjaan angkatan udara militer (McCracken, 1984)(Aldrich et al., 1989). Salah satu kelebihan yang dimiliki metode VACP adalah kemampuannya dalam menilai tingkat tuntutan beban kerja pada masing-masing yang dialami oleh operator.

Metode VACP menggunakan peringkat tugas dan metode untuk memperkirakan beban kerja operator sebagai fungsi interaksi antara empat saluran. Hal ini memungkinkan analis untuk menentukan periode beban kerja tinggi dan menyelidiki modifikasi pada sistem yang mungkin mengurangi tingkat beban kerja bagi operator. Dengan menggunakan teknik ini, setiap tugas dalam model diberi skor untuk setiap saluran VACP. Ketika tugas dijalankan dalam simulasi, nilai VACP untuk tugas tersebut ditambahkan oleh sistem ke setiap saluran VACP saat ini agar operator dapat memperolehnya. Skor total untuk setiap saluran pada saat itu juga.

Keseluruhan beban kerja operator untuk suatu waktu tertentu diperoleh dengan Indeks Beban Kerja (W/Index), yang menetapkan bobot yang mewakili jumlah permintaan yang diperlukan untuk suatu tugas di setiap saluran dan mengukurnya. Setelah tugas selesai dijalankan, nilai VACP untuk tugas tersebut dikurangkan dari beban kerja VACP individu serta total beban kerja operator. Dengan pendekatan ini, model simulasi dapat menyediakan data prediktif tentang penggunaan VACP yang dibutuhkan oleh berbagai operator dalam skenario tugas ini (Hugo et al, 2012). Dalam praktiknya, pekerja dapat melakukan tugas lebih dari satu tugas dalam satu waktu, misalnya menyetir sambil mendengarkan musik.
Meskipun metode VACP telah banyak digunakan untuk mengidentifikasi distribusi beban kerja berdasarkan modalitas sumber daya manusia, sebagian besar penelitian memanfaatkan VACP sebagai alat deskriptif untuk mengukur tuntutan tugas. Penelitian terdahulu masih terbatas dalam memanfaatkan hasil VACP untuk menjelaskan konsekuensi beban kerja terhadap keandalan manusia. Padahal kondisi overload pada modalitas tertentu berpotensi menurunkan kualitas pemrosesan informasi, meningkatkan kemungkinan kesalahan, danpada akhirnya memengaruhi keandalan operator. Oleh karena itu, hasil analisis VACP dalam

penelitian ini digunakan sebagai dasar untuk memahami potensi degradasi keandalanmanusia melalui pendekatan CREAM.

2.5 CREAM

CREAM (*Cognitive Reliability and Error Analysis Method*) adalah metode yang dapat digunakan untuk menilai keandalan manusia, dengan fokus pada dampak faktor lingkungan terhadap potensi kesalahan manusia. Keuntungan pendekatan ini terletak pada kemampuannya untuk mengintegrasikan beragam kondisi kinerja dan meningkatkan keandalan manusia melalui analisis terstruktur (Emroozi et al., 2024). Metode ini dapat disesuaikan dengan berbagai konteks, seperti industri Petrokimia (Shirali et al., 2019), pembangkit listrik tenaga nuklir (X. Zhang et al., 2024)(Park et al., 2020), Farmasi (Zheng et al., 2020) yang menunjukkan fleksibilitasnya. Metode CREAM memfasilitasi pengambilan keputusan berdasarkan informasi dengan menyediakan kerangka kerja untuk menilai dan meningkatkan keandalan operator (Żywiec et al., 2020).

Metode CREAM memiliki dua versi, yaitu versi dasar dan versi yang diperluas. Kedua versi ini menawarkan dua peningkatan utama dibandingkan metode generasi pertama. Pertama, metode ini mengintegrasikan model kognitif untuk menilai peran proses mental dalam kinerja manusia. Kedua, metode ini memungkinkan analisis baik secara prospektif maupun retrospektif di setiap tahap. Analisis prospektif bertujuan untuk mengidentifikasi potensi kesalahan manusia sebelum terjadi, sedangkan analisis retrospektif berfokus pada mengungkap dampak dari kesalahan yang sudah terjadi (Yalçın et al., 2024).

Posisi Penelitian

Ruang kendali tol merupakan sistem kerja yang kompleks, dinamis dan beresiko tinggi karena operator harus terus menerus memantau arus lalu lintas melalui CCTV secara real-time, merespon insiden dan berkoordinasi antar sistem. Dalam konteks seperti ini, kapasitas kognitif individu berperan sangat penting dalam menjaga keandalan manusia dan menurunkan kemungkinan kegagalan operasional (Laux & Plott, 2007). Penelitian (Mohammadian et al., 2022) menunjukkan bahwa ketika beban kerja kognitif meningkat, maka performa

operator dalam sistem kontrol ruang kerja yang komleks menurun dan resiko kesalahan operasional meningkat.

Interaksi antara beban kerja operator, evaluasi terhadap resiko kegagalan operasional serta faktor-faktor keandalan manusia sangat penting untuk menjamin keselamatan pengguna jalan tol. Oleh karena itu, dalam konteks studi ruang kendali jalan tol, sangat penting untuk mengukur dan mengelola beban kerja kognitif sebagai bagian ingral dari analisis keandalan manusia.

Berdasarkan kajian literatur yang sudah dilakukan, penelitian Keandalan Manusia dengan objek ruang kendali sudah banyak dilakukan. Jika dilihat dalam konteks penelitian mengenai Keandalan Manusia, sebagian besar studi terdahulu fokus pada satu atau dua kajian utama seperti (De Felice et al., 2016)(Materna et al., 2023)(Birch et al., 2023)(Zhang et al., 2024)(Aliabadi et al., 2024)(Costantino et al., 2024) umumnya mengintegrasikan analisis keandalan manusia dengan pendekatan penilaian risiko (*risk assessment*) yang meneliti keandalan manusia dipadukan dengan risk assessment.

Berbagai penelitian telah menerapkan Human Reliability Analysis (HRA) pada lingkungan ruang kendali industri seperti PLTN, Petrokimia, manufaktur, kesehatan, dan transportasi. Metode yang banyak digunakan antara lain CREAM, SHERPA, THERP, Bayesian Network, dan berbagai pengembangan probablisitik lainnya. Penelitian-penelitian tersebut berhasil mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi keandalan manusia serta memperkirakan propbabilitas kesalahan manusia dalam berbagai konteks operasional. Namun demikian, sebagian besar pendekatan HRA masih berorientasi pada analisis prosedural, faktor organisasi, atau Performance Shaping Factors (PSFs), tanpa menjelaskan secara rinci bagaimana tuntutan kognitif operator terbentuk selama pelaksanaan tugas.

Penelitian pada ruang kendali digital menunjukkan bahwa digitalisasi meningkatkan kompleksitas interaksi manusia-mesin, kebutuhan monitoring multi-sumber informasi, information switching, multitasking, dan tuntutan pengambilan keputusan secara real-time. Studi (Porthin et al., 2016), (Zou et al.,

2017),(Bye, 2023) dan (Skogstad et al., 2024) menunjukkan bahwa metode HRA konvensional belum sepenuhnya adaptif terhadap karakteristik ruang kendali digital. Meskipun demikian, penelitian tersebut masih bersifat konseptual atau berfokus pada pengembangan model HRA tanpa mengukur kognitif operator secara langsung.

Literatur menunjukkan bahwa peningkatan beban kerja berkontribusi terhadap penurunana performa operator dan peningkatan kemungkinan terjadinya human error. Penelitian (Kim et al., 2016a), (Knisel et al., 2020), (Mohammadian et al., 2022), (Chauhan et al., 2024) menegaskan bahwa workload merupakan faktor penting dalam pembentukan kesalahan manusia. Namun sebagian besar penelitian tersebut mengukur beban kerja pada tingkat agregat dan memperlakukan workload hanya sebagai salah satu faktor pembentuk kinerja (PSF), bukan sebagai mekanisme yang menjelaskan bagaimana kesalahan manusia muncul.

Berdasarkan hasil kajian literatur, terdapat empat keterbatasan utama:

1. Sebagian penelitian HRA tidak mengukur beban kerja kognitif secara objektif.
2. Penelitian yang mengukur workload umumnya tidak menghubungkannya dengan Human Error Probability (HEP) atau Human Reliability.
3. Penelitian HTA berbasis CREAM masih sangat bergantung pada penilaian CPC dan Expert judgement.
4. Belum terdapat kerangka yang menghubungkan struktur tugas, proses kognitif, tuntutan beban kerja, dan keandalan manusia dalam satu model yang terintegrasi.

Research Gap

Terdapat kesenjangan penelitian dalam menjelaskan hubungan antara tuntutan kognitif operator pada level aktivitas tugas dengan keandalan manusia pada lingkungan ruang kendali digital yang beroperasi secara real-time. Sebagian besar penelitian human reliability analysis masih memodelkan keandalan manusia pada tingkat prosedural atau kontekstual, tanpa menghubungkan proses kognitif yang mendasari pelaksanaan tugas dengan distribusi beban kerja aktual yang dialami operator.

Hingga saat ini belum terdapat model Human Reliability Analysis yang menjelaskan bagaimana tuntutan tugas pada level aktivitas menghasilkan beban kerja kognitif secara spesifik yang kemudian memengaruhi keandlan manusia pada ruang kendali transportasi digital. Hubungan kausal antara task demand, cognitive workload, Human Error dan Human Reliability masih belum terjelaskan secara memadai dalam literatur.

Tabel 2.2 Posisi Penelitian

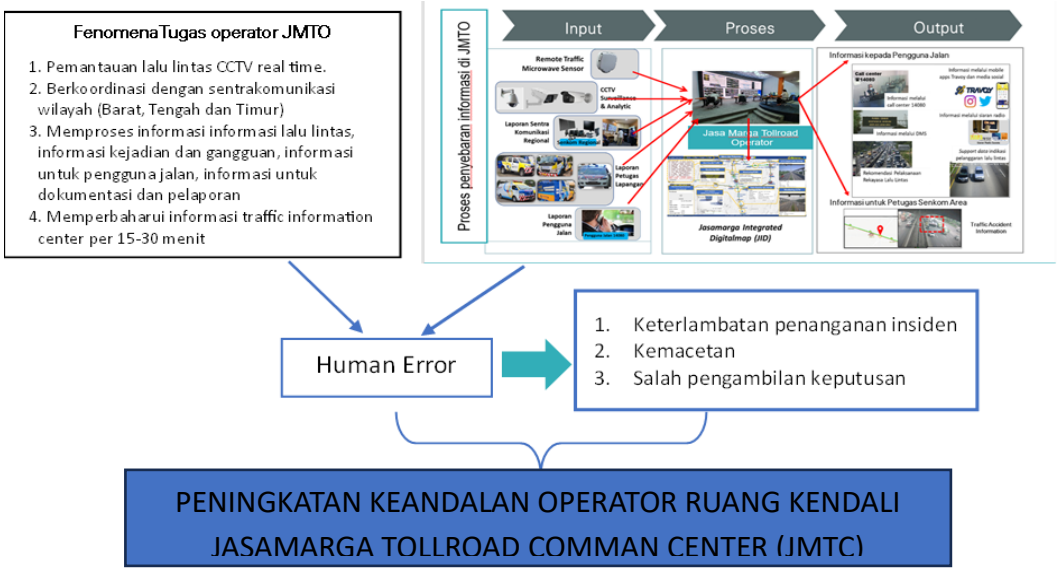
Penulis	Cognitive Analysis (CTA)	Workload Analysis	Human Reliability	Digital Control Room	Integrasi Task–Workload–Reliability
(Shokria et al., 2016)	–	–	✓	✓	–
(Shirali et al., 2019)	–	–	✓	✓	–
(Kim et al., 2016)	–	✓	–	✓	–
(Bye, 2023)	–	✓	✓	✓	–
(Porthin et al., 2024)	–	–	✓	✓	–
(Chauhan et al., 2024)	–	✓	✓	–	–
Penelitian ini	✓	✓	✓	✓	✓

Bab 3 Metodologi Penelitian

Bab 3 ini berisi tentang kerangka pemikiran, metodologi penelitian, sumber data dan data yang diperlukan dalam penelitian.

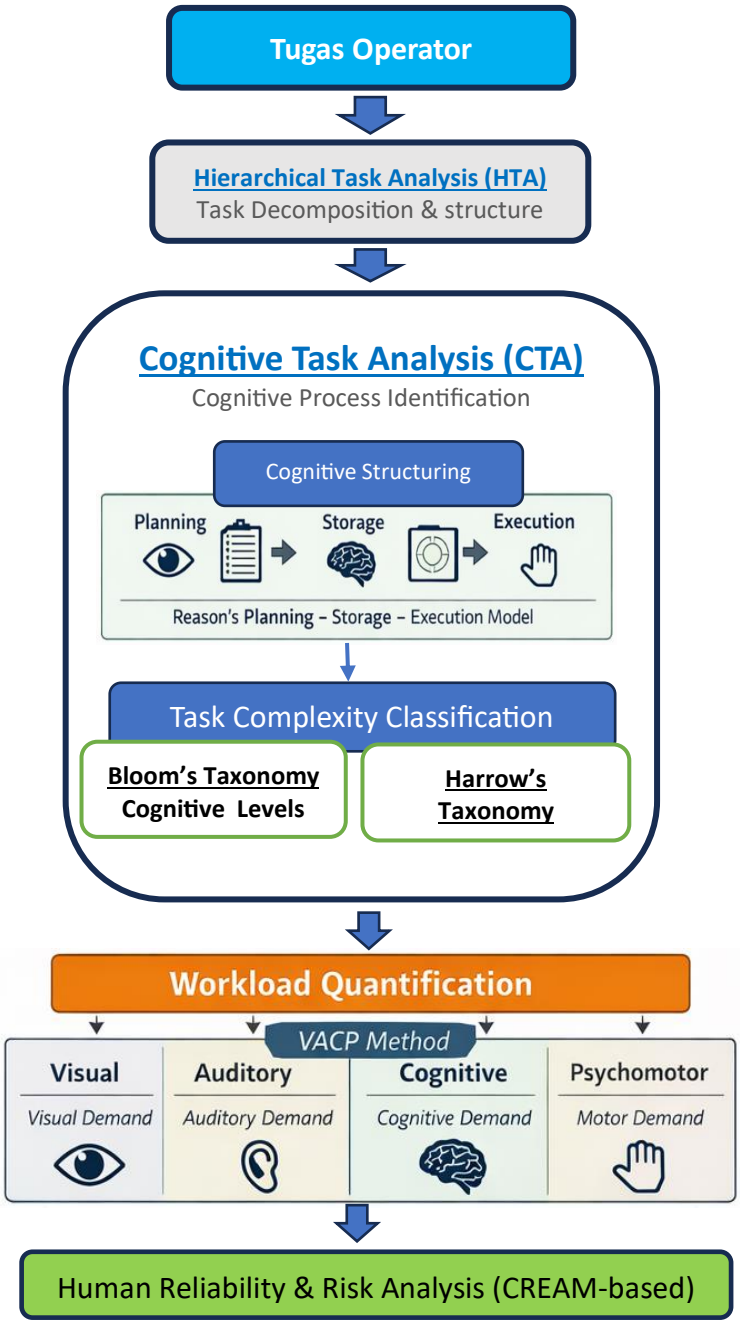
3.1. Kerangka Berpikir

Tugas operator JMTC dalam pemantauan lalu lintas saat secara real-time CCTV, berkoordinasi dengan pusat komunikasi di berbagai wilayah dan memproses serta memperbarui informasi lalu lintas untuk masuk ke pengguna jalan dan petugas lapangan. Proses penyebaran informasi di JMTC yang merupakan rangkaian sistem informasi lalu lintas meliputi penyalinan data melalui sensor dan informasi, kemudian diproses oleh operator melalui sistem integrasi digital dan akhirnya didistribusikan sebagai informasi yang dikirimkan ke berbagai saluran seperti DMS, jaringan sosial, dan aplikasi seluler. Kompleksitas tugas dan tekanan waktu yang tinggi dalam lingkungan kerja ini berpotensi menimbulkan kesalahan manusia (*human error*). Konsekuensi yang dapat terjadi akibat *human error* tersebut meliputi keterlambatan dalam penanganan insiden, meningkatnya kemacetan, hingga kesalahan dalam pengambilan keputusan. Fenomena ini menunjukkan adanya risiko terhadap keandalan kinerja manusia yang berdampak langsung pada keselamatan, kelancaran operasional, dan kepuasan pengguna jalan tol. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan sistematis untuk menganalisis dan meningkatkan keandalan operator dalam ruang kontrol tersebut.



Gambar 3.1 Kerangka Berpikir

3.2. Framework Penelitian



Gambar 3.2 Diagram alir penelitian

Penelitian diawali dengan identifikasi dan deskripsi tugas prosedural operator di ruang kendali JMTC. Tahap ini mencakup obervasi aktivitas rutin seperti pemantauan lalu lintas melalui CCTV, Komunikasi dengan petugas lapangan dan pengambilan keputusan saat terjadi insiden. Dari tugas prosedural didapatkan komposisi tugas operator JMTC berupa tugas utama dan sub tugas. Selanjutanya melakukan analisis beban kerja 4 modalitas Visual, Auditori, Cognitive dan Psikomotor. Secara pararel, membuat *Hierarchical Task Analysis* (HTA) untuk memetakan struktur kerja dalam bentuk sub sub tugas berdasarkan komposisi tugas operator.

Tahap berikutnya adalah *Cognitive Task Analysis* (CTA), CTA dilakukan dengan mengintegrasikan model pemrosesan informasi Reason (*Planning, Storage, Execution*) dengan dua taksonomi pembelajaran, yaitu taksonomi Bloom's dan Taksonomi Harrow. Model Reason digunakan untuk menentukan tahapan proses kognitif yang terlibat dalam setiap tugas hasil HTA yaitu tahap *planning, storage* dan *execution*. Setiap tahap tersebut kemudian diperdalam menggunakan taksonomi Bloom untuk mengidentifikasi tingkat kompleksitas kognitif yang diperlukan. Selain tuntutan kognitif, penelitian ini juga mempertimbangkan tuntutan psikomotorik menggunakan taksonomi Harrow untuk menilai tingkat keterampilan motorik yang diperlukan dalam pelaksanaan tugas. Taksonomi Harrow dipilih karena menyediakan kategori yang secra eksplisit membedakan kemampuan perseptual (*perceptual abilities*) dan keterampilan gerakan terlatih (*skilled movements*). Kedua kategori tersebut relevan dengan karakteristik pekerjaan operator ruang kendali digital yang melibatkan aktivitas pemantauan visual, pengenalan informasi pada antarmuka, serta interaksi visual-motorik melalui perangkat komputer dan sistem komunikasi. Oleh karena itu, meskipun taksonomi Harrow awalnya dikembangkan utuk domain pendidikan, kerangka ini dianggap sesuai untuk mengidentifikasi karakteristik psikomotor yang mendukung pelaksanaan tugas operator ruang kendali. Integrasi ketiga pendekatan ini memungkinkan peneliti untuk menggambarkan beban kerja kognitif dan psikomotor yang dialami operator serta memprediksi potensi kesalahan operator pada setiap tahapan tugas.

Tahapan terakhir adalah menganalisis keandalan operator menggunakan metode *Cognitive Reliability and Error Analysis Methode* (CREAM). Metode CREAM dikembangkan oleh Hollnagel (1998) utuk menilai seberapa andal operator dalam menjalankan tugasnya, dengan mempertimbangkan tugas kognitif yang dilakukan dan kondisi kerja yang mempengaruhi (Hollnagell, 1998). Metode ini digunakan untuk memperkirakan probabilitas kesalahan manusia (*Human Error Probability*) berdasarkan kondisi kerja aktual yang ditentukan melalui penlaian *Common Performance Conditions* (CPCs).

3.3. Tahapan Penelitian

Penelitian ini dilakukan dalam 3 tahap, seperti yang tertera pada gambar 3.1 yaitu:

1. Identifikasi sisitem pelayanan Jasamarga Toll Road Operator.
   Sumber data pada tahap penelitian ini berasal dari observasi langsung ke lapangan, dokumen dan wawancara.
2. Identifikasi Tugas Operator dan Beban kerja Operator
   Sumber data pada tahap ini berasal dari Observasi, Wawancara dengan operator, meninjau SOP, struktur tugas dan tanggung jawab operator.
3. Menganalisis Keandalan operator
   Sumber data pada tahap ini berasal dari hasil olah data beban kerja operator.

Tabel 3.1 Metode/pendekatan yang digunakan pada setiap tahapan penelitian

Tapan penelitian	Sub tahapan penelitian	Pendekatan/Metode	Keluaran
Tahap 1	1. Identifikasi sistem pelayanan JMTC	Dokumentasi, studi literatur, observasi langsung, wawancara,	Sistem pelayanan JMTC
	2. Analisis kebutuhan Stakeholder	Wawancara	Kebutuhan Stakeholder JMTC
Tahap 2	1. Identifikasi Tugas Operator	Observasi, Wawancara dengan operator, meninjau SOP, struktur tugas dan tanggung jawab operator	Tugas prosedural operator JMTC, Komposisi tugas operator JMTC, Hirarcy Task Analysis
	2. Analisis Tugas kognitif	Taksonomi Bloom's dan Taksonomi Harrow	CTA

Tapan penelitian	Sub tahapan penelitian	Pendekatan/Metode	Keluaran
	3. Pengukuran beban kerja	Metode VACP	Beban kerja berdasarkan 4 modalitas VACP
Tahap 3	Analisis Keandalan Operator dan Analisis Resiko (CREAM based)	Metode CREAM	Profil CPC, mode kontrol Potensi kegagalan sistem

Penelitian ini menggunakan pendekatan multi-metode yang terintegrasi untuk menangkap kompleksitas interaksi antara beban kerja kognitif dan keandalan manusia dalam lingkungan ruang kendali transportasi jalan tol. Pendekatan tunggal tidak memadai karena fenomena human reliability melibatkan aspek kognitif, perilaku, dan kontekstual secara simultan. Oleh karena itu, setiap metode dipilih berdasarkan kontribusi spesifiknya dalam membangun model analisis yang komprehensif.

Tahap 1

1.1 Identifikasi Sistem Pelayanan JMTC

Tujuan identifikasi sistem pelayanan JMTC adalah untuk memahami sistem pelayanan JMTC secara menyeluruh, termasuk fungsi ruang kendali, alur informasi, teknologi yang digunakan, serta pperan operator dalam proses pelayanan lalu lintas jalan tol. Pendekatan dokumentasi, observasi dan wawancara digunakan untuk memperoleh pemahaman menyeluruh terhadap sistem layanan JMTC dan kebutuhan stakeholder. Pendekatan ini penting untuk memastikan bahwa model yang dikembangkan berbasis pada kondisi nyata. Pendekatan kuantitatif saja kurang mampu menangkap kompleksitas kebutuhan stakeholder dan dinamika operasional yang bersifat kontekstual dan tidak terstruktur. Bertindak sebagai partisipan pada tahap ini adalah kepala ruang kendali JMTC, supervisor Operasional dan operator ruang kendali. Peneliti melakukan analisis dokumen, hasil observasi, dan wawancara untuk memetakan sistem pelayanan dan fungsi operator dalam sistem.

1.2 Analisis Kebutuhan Stakeholder

Tujuan dari analisis stakeholder adalah mengidentifikasi kebutuhan dan harapan stakeholder terhadap kinerja operator ruang kendali. Pengumpulan data melalui wawancara semi terstruktur dengan stakeholder pengguna jalan, manajemen Jasa marga, kementerian PUPR/BPJT, supervisor/operator JMTC, Tim Teknologi, Tim Lapangan.

Tahap 2

2.1 Identifikasi Tugas Operator

Tujuan dari identifikasi tugas operator adalah mengidentifikasi seluruh tugas, sub tugas dan sub-sub tugas operator ruang kendali JMTC. Observasi aktivitas operator, wawancara operator, penelaahan SOP dan penelaahan struktur tugas dan tanggung jawab. Task Analysis menjadi fondasi untuk memahami struktur kerja operator yang akan dianalisis secara kognitif. Data sekunder atau SOP saja tidak cukup untuk karena sering kurang merepresentasikan praktik nyata di lapangan, terlebih ruang kendali transportasi jalan tol memiliki karakteristik tugas yang dinamis.

Taksonomi Bloom's dan Harrow's digunakan untuk mengklasifikasikan level kognitif dan psikomotorik yang terlibat dalam tugas operator. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi tingkat kompleksitas kognitif tugas yang menjadi dasar dalam analisis beban kerja kognitif. Metode task analysis konvensional tidak mampu mengkuantifikasi dimensi kognitif secara terstruktur.

Metode VACP (*Visual, Auditory, Cognitive, Pshycomotor*) secara klasik menggunakan struktur hirarki *Mission-Segment-Function-Task* untuk merepresentasikan aktivitas operator pada berbagai tingkat analisis. Hirarki ini digunakan untuk memastikan bahwa tuntutan beban kerja diidentifikasi secara sistematis dari tujuan sistem hingga aktivitas elementer yang dilakukan operator.

Namun dalam penelitian ini, struktur hirarki VACP tidak diadopsi secara terminologis apa adanya, melainkan disesuaikan dengan pendekatan

Hierarchical Task Analysis (HTA) dan *Cognitive Task Analysis* (CTA) yang digunakan sebagai dasar analisis tugas. Penyesuaian ini dilakukan untuk menjaga konsistensi konseptual antara metode analisis tugas yang digunakan dan proses kuantifikasi beban kerja.

Penyesuaian terminologi ini dilakukan dengan mempertimbangkan 3 metodologis utama yaitu:

1. *Hirarchical Task Analysis* (HTA) secara eksplisit menggunkaan struktur goal-subgoal-operation, yang secara konseptual ekuivalen dengan *Mission-Segment-Function-Task* dalam VACP klasik. Menggunakan terminologi HTA memungkinkan struktur tugas disusun tugas disusun secara top-down berdasarkan tujuan, sehingga memudahkan penelusuran hubungan antar tujuan sistem dan aktivitas operator.
2. *Cognitive Task Analysis* (CTA) menekankan analisis pada level aktivitas kognitif elementer, seperti persepsi, pengingatan, penilaian, dan pengambilan keputusan. Oleh karena itu, unit analisis yang paling relevan untuk penilaian beban kerja adalah sub-subtugas, karena pada level ini tuntutan visual, auditori, kognitif dan psikomotor muncul secara spesifik.
3. Metode VACP merekomendasikan penilaian beban kerja pada level task elemen, bukan pada deskripsi tugas yang bersifat agregatif. Dengan mendefinisikan task sebagai sub-subtugas, penelitian ini tetap sejalan dengan prinsip dasar VACP, meskipun menggunakan terminologi yang disesuaikan dengan HTA dan CTA.

Dalam penelitian ini, penilaian VACP dilakukan pada level sub-sub tugas, karena level ini merepresentasikan aktivitas elementer yang melibatkan modalitas visual, auditori, kognitif dan psikomotor secara nyata. Skor VACP kemudian diagregasikan ke tingkat sub-tugas dan tugas untuk memperoleh gambaran beban kerja pada level yang lebih tinggi serta untuk mengidentifikasi modalitas dominan dan potensi *overload*. Dengan pendekatan ini, metode VACP tidak hanya digunakan sebagai laat kuantifikasi beban kerja, tetapi juga sebagai jembatan analistis antara hasil HTA-CTA dan analisis risiko serta keandalan manusia pada tahap selanjutnya.

Perbedaan terminologi antara VACP klasik dan penelitian ini bersifat konseptual, bukan substantif. Penilaian beban kerja tetap dilakukan pada level aktivitas elementer sebagaimana direkomendasikan dalam metode VACP, namun struktur hirarki disesuaikan dengan pendekatan HTA dan CTA agar konsisten dengan kerangka analisis kognitif yang digunakan.

Metode VACP digunakan untuk mengukur beban kerja operator berdasarkan empat modalitas utama, yaitu visual, Auditory, Cognitive dan Psychomotor. Metode ini dipilih karena mampu mengidentifikasi distribusi beban kerja secara spesifik pada setiap jenis sumber daya manusia yang digunakan dalam melaksanakan tugas.

Metode lain seperti NASA-TLX tidak digunakan karena bersifat global dan subjektif, sehingga tidak mampu mengidentifikasi variasi beban kerja pada level subtask aytau modalitas spesifik. Dalam konteks ruang kendali yang didominasi oleh interaksi visual dan kognitif, pendekatan berbasis modalitas seperti VACP lebih relevan secara ilmiah untuk mengidentifikasi sumber *overload* secara spesifik.

Tahap 3

Tahap ketiga dalam penelitian ini adalah analisis keandalan manusia (human reliability) dan analisis risiko operasional yang timbul dari pelaksanaan tugas operator di ruang kendali JMTC. Pendekatan yang digunakan adalah Cognitive Reliability and Error Analysis Method (CREAM), yang memungkinkan analisis dilakukan secara komprehensif dengan mempertimbangkan aspek kognitif, kondisi kerja, serta konteks sosio-teknis sistem.

DAFTAR PUSTAKA

Abbas, A. N., Amazu, C. W., Mietkiewicz, J., Briwa, H., Perez, A. A., Baldissone, G., Demichela, M., Chasparis, G. G., Kelleher, J. D., & Leva, M. C. (2024). *Analyzing Operator States and the Impact of AI-Enhanced Decision Support in Control Rooms: A Human-in-the-Loop Specialized Reinforcement Learning Framework for Intervention Strategies*. http://arxiv.org/abs/2402.13219

Aldrich, T. B., Szabo, S. M., & Bierbaum, C. R. (1989). The Development and Application of Models to Predict Operator Workload During System Design. In G. R. McMillan, D. Beevis, E. Salas, M. H. Strub, R. Sutton, & L. Van Breda (Eds.), *Applications of Human Performance Models to System Design* (pp. 65–80). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-9244-7_5

Aliabadi, M. M., Mohammadfam, I., & Khorshidikia, S. (2024). Human error identification and risk assessment in loading and unloading of petroleum products by road trucks using the SHERPA and fuzzy inference system method. *Heliyon*, *10*(15). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34072

Alkhaldi, M., Pathirage, C., Kulatunga, U., Alkhaldi, K., Alkhldi, M., Pathirage, C., & Kulatunga, U. (2017). *The role of human error in accidents within oil and gas industry in Bahrain The role of human error in accidents within oil and gas industry in Bahrain Title The role of human error in accidents within oil and gas industry in Bahrain THE ROLE OF HUMAN ERROR IN ACCIDENTS WITHIN OIL AND GAS INDUSTRY IN BAHRAIN*. http://usir.salford.ac.uk/43983/

Alvarenga, M. A. B., Frutuoso e Melo, P. F., & Fonseca, R. A. (2014). A critical review of methods and models for evaluating organizational factors in Human Reliability Analysis. *Progress in Nuclear Energy*, *75*, 25–41. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2014.04.004

Badmus, Shahab Anas, John Babatope Arogundade, & Mosope Williams. (2024). AI-driven business analytics and decision making. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, *24*(1), 616–633. https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.24.1.3093

Bafandegan Emroozi, V., Modares, A., & Roozkhosh, P. (2024). A new model to optimize the human reliability based on CREAM and group decision making. *Quality and Reliability Engineering International*, *40*(2), 1079–1109. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/qre.3457

Birch, D., Miller, E., & Bradley, T. (2023). Human Reliability Analysis using a Human Factors Hazard Model. *Journal of System Safety*, *58*(2), 7–29. https://doi.org/10.56094/jss.v58i2.251

Bona, G. Di, Falcone, D., Forcina, A., & Silvestri, L. (2021). Systematic Human Reliability Analysis (SHRA): A New Approach to Evaluate Human Error Probability (HEP) in a Nuclear Plant. *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*, *6*(1), 345–362. https://doi.org/10.33889/IJMEMS.2021.6.1.022

Boring, R. L., & Blackman, H. S. (2007). The origins of the SPAR-H method's performance shaping factor multipliers. *IEEE Conference on Human Factors and Power Plants*, 177–184. https://doi.org/10.1109/HFPP.2007.4413202

Boroun, S., Gholamnia, R., & Jabari, M. (2022). Analysis of Human Factors Influencing Error Occurrence Using RCA And HFACS-OGI in a Gas Company. *Occupational Hygiene and Health Promotion*. https://doi.org/10.18502/ohhp.v5i4.8457

Buku_BPJT_2023. (n.d.).

Bye, A. (2023). Future needs of human reliability analysis: The interaction between new technology, crew roles and performance. *Safety Science*, *158*. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.105962

Chauhan, A., Golestani, N., Liu, H., Salehi, F., & Abbassi, R. (2024). Human reliability assessment in hydrogen refuelling stations: A system dynamic approach. *International Journal of Hydrogen Energy*, *56*, 41–54. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.11.298

Chowdhury. (2024). AI-driven business analytics for operational efficiency. *World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences*, *12*(2), 535–543. https://doi.org/10.30574/wjaets.2024.12.2.0329

Ciani, L., Guidi, G., Patrizi, G., & Galar, D. (2021). Improving Human Reliability Analysis for Railway Systems Using Fuzzy Logic. *IEEE Access*, *9*, 128648–128662. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3112527

Cook, R. I., & Woods, D. D. (1994a). *Operating at the Sharp End: The Complexity of Human Error*. https://www.researchgate.net/publication/313407259

Cook, R. I., & Woods, D. D. (1994b). *Operating at the Sharp End: The Complexity of Human Error*. https://www.researchgate.net/publication/313407259

Costantino, F., Di Gravio, G., Patriarca, R., & Tronci, M. (2024). A systemic approach for stochastic reliability management in human–machine systems. *Decision Analytics Journal*, *10*. https://doi.org/10.1016/j.dajour.2024.100410

De Carvalho, P. V. R. (2006). Ergonomic field studies in a nuclear power plant control room. *Progress in Nuclear Energy*, *48*(1), 51–69. https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2005.04.001

De Felice, F., Petrillo, A., & Zomparelli, F. (2016). A Hybrid Model for Human Error Probability Analysis. *IFAC-PapersOnLine*, *49*(12), 1673–1678. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.821

Dogan, O., Arslan, O., Cengiz Tirpan, E., & Cebi, S. (2024). Risk Assessment of Employing Digital Robots in Process Automation. *Systems*, *12*(10). https://doi.org/10.3390/systems12100428

Fonchang, F.-E. (2021). *HUMAN FACTORS FOR SAFETY IN THE RAILWAY INDUSTRY REVIEW*. https://doi.org/10.17605/OSF.IO/4HFGR

Ghanavati, F. K., Choobineh, A., Keshavarzi, S., Nasihatkon, A. A., & Roodbandi, A. S. J. (2019). Assessment of mental workload and its association with work ability in control room operators. *Medicina Del Lavoro*, *110*(5), 389–397. https://doi.org/10.23749/mdl.v110i5.8115

Hamza, M., & Diaconeasa, M. A. (2022). A framework to implement human reliability analysis during early design stages of advanced reactors. *Progress in Nuclear Energy*, *146*. https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2022.104171

Helmreich, R. L. (2000). On error management: lessons from aviation. *BMJ*, *320*(7237), 781. https://doi.org/10.1136/bmj.320.7237.781

Hobbs, A. (2015). *An Overview of Human Factors in Aviation Maintenance*. https://www.researchgate.net/publication/265240960

Hogenboom, S., Rokseth, B., Vinnem, J. E., & Utne, I. B. (2020). *Human Reliability and the Impact of Control Function Allocation in the Design of Dynamic Positioning Systems*.

Hollnagell. (1998). *COGNITIVE RELIABILITY AND ERROR ANALYSIS METHOD CREAM*. http://www.elsevier.nl

Hugo, J., & Gertman, D. (2012). *The Use of Computational Human Performance Modeling as Task Analysis Tool American Nuclear Society (NPIC&HMIT) THE USE OF COMPUTATIONAL HUMAN PERFORMANCE MODELING AS TASK ANALYSIS TOOL*.

Jabbari, M. (2013). *Identification of the Human Errors in Control Room Operators by Application of HEIST Method (Case Study in an Oil Company)*. https://www.researchgate.net/publication/285031934

Jack H. McCracken, Ph. D. T. B. A. (1984). *Research Note ANALYSES OF SELECTED LHX MISSION FUNCTIONS IMPLICATIONS FOR OPERATOR WORKLOAD AND SYSTEM AUTOMATION GOALS*.

Janota, A., Pirník, R., Ždánsky, J., & Nagy, P. (2022). Human Factor Analysis of the Railway Traffic Operators. *Machines*, *10*(9). https://doi.org/10.3390/machines10090820

Kennedy, R., & Kirwan, B. (1998). *Development of a Hazard and Operability-based method for identifying safety management vulnerabilities in high risk systems*.

Kim, S., Kim, Y., & Jung, W. (2016a). Operations strategy for workload balancing of crews in an advanced main control room. *Journal of Nuclear Science and Technology*, *53*(8), 1097–1111. https://doi.org/10.1080/00223131.2015.1092398

Kim, S., Kim, Y., & Jung, W. (2016b). Operations strategy for workload balancing of crews in an advanced main control room. *Journal of Nuclear Science and Technology*, *53*(8), 1097–1111. https://doi.org/10.1080/00223131.2015.1092398

Kirwan, B. (2008). Human Reliability Assessment. In *Encyclopedia of Quantitative Risk Analysis and Assessment*. Wiley. https://doi.org/10.1002/9780470061596.risk0489

Knisely, B. M., Joyner, J. S., Rutkowski, A. M., Wong, M., Barksdale, S., Hotham, H., Kharod, K., & Vaughn-Cooke, M. (2020a). A cognitive decomposition to empirically study human performance in control room environments. *International Journal of Human Computer Studies*, *141*. https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2020.102438

Knisely, B. M., Joyner, J. S., Rutkowski, A. M., Wong, M., Barksdale, S., Hotham, H., Kharod, K., & Vaughn-Cooke, M. (2020b). A cognitive decomposition to empirically study human performance in control room environments. *International Journal of Human Computer Studies*, *141*. https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2020.102438

Kohani, M., Berman, J., Catacora, D., Kim, B., & Vaughn-Cooke, M. (2014). Evaluating operator performance for patient telemetry monitoring stations

using virtual reality. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society*, *2014-January*, 2388–2392. https://doi.org/10.1177/1541931214581497

Kontogiannis, T., & Malakis, S. (2009). A proactive approach to human error detection and identification in aviation and air traffic control. *Safety Science*, *47*(5), 693–706. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2008.09.007

Krishnan Veluplay, G., Mokhtar, K., Muhamad Amir Ahmad, W. W., & Halim, N. (2014). Modeling and Analysis of Factors Affecting Inefficient Management of Vessels: A Malaysian Case Study. *International Journal of Innovation and Research in Educational Sciences*, *1*(1).

Latorella, K. A., & Prabhu, P. V. (2017). A review of human error in aviation maintenance and inspection. In *Human Error in Aviation* (pp. 521–549). CRC Press. https://doi.org/10.4324/9781315092898-27

Laux, L., & Plott, C. (2007). *Using operator workload data to inform human reliability analyses*. https://doi.org/10.1109/HFPP.2007.4413225

Liu, P., Qiu, Y., Hu, J., Tong, J., Zhao, J., & Li, Z. (2020). Expert judgments for performance shaping Factors' multiplier design in human reliability analysis. *Reliability Engineering and System Safety*, *194*. https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.12.022

Longo, L. (2014). *Formalising Human Mental Workload as a Defeasible Computational Concept*. (October).

Longo, L. (2022). Modeling Cognitive Load as a Self-Supervised Brain Rate with Electroencephalography and Deep Learning. *Brain Sciences*, *12*(10). https://doi.org/10.3390/brainsci12101416

Materna, M., Maternová, A., Kamenická, D., & Chodelka, F. (2023). The Influence of Human Factor on Aviation Accidents in Slovakia through HFACS Framework: A Comprehensive Study. *Transportation Research Procedia*, *75*, 173–182. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.12.020

Maternová, A., & Materna, M. (2023). Research of maritime accidents based on HFACS framework. *Transportation Research Procedia*, *74*, 1224–1231. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.265

Mohammadian, M., Parsaei, H., Mokarami, H., & Kazemi, R. (2022a). Cognitive demands and mental workload: A filed study of the mining control room operators. *Heliyon*, *8*(2). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e08860

Mohammadian, M., Parsaei, H., Mokarami, H., & Kazemi, R. (2022b). Cognitive demands and mental workload: A filed study of the mining control room operators. *Heliyon*, *8*(2), e08860. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e08860

Nazir, S. (2024, June 6). *Human Error: A 10-Year Review of Trends and Techniques in Maritime and Process Industries*. https://doi.org/10.46254/an14.20240560

Nkosi, M., Gupta, K., & Mashinini, M. (2020). Causes and Impact of Human Error in Maintenance of Mechanical Systems. *MATEC Web of Conferences*, *312*, 05001. https://doi.org/10.1051/matecconf/202031205001

Ntuen, C. A., & Park, E. H. (2007). *PREDICTING HUMAN RELIABILITY UNDER WORKLOAD AND SKILL PERFORMANCE*. https://doi.org/10.1109/AUIC

O'Hara John, Brown, Lewis, & J.J Persenssky. (2002). *NUREG/CR-6690, Vol 1, The Effects of Interface Management Tasks On Crew Performance and Safety in Complex, Computer-Based Systems - Overview & Main Findings.* (Vol. 1, Number 52656). www.nrc.gov/NRC/ADAMS/index.html.

Onofrio, R., Trucco, P., & Torchio, A. (2015). Towards a Taxonomy of Influencing Factors for Human Reliability Analysis (HRA) Applications in Surgery. *Procedia Manufacturing*, *3*, 144–151. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.119

Park, J., Jung, W., & Kim, J. (2020). Inter-relationships between performance shaping factors for human reliability analysis of nuclear power plants. *Nuclear Engineering and Technology*, *52*(1), 87–100. https://doi.org/10.1016/j.net.2019.07.004

Porthin, M., Liinasuo, M., & Kling, T. (2020). Effects of digitalization of nuclear power plant control rooms on human reliability analysis – A review. In *Reliability Engineering and System Safety* (Vol. 194). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.03.022

Porthin, M., Podofillini, L., & Dang, V. N. (2024). Task reliability index for operator performance and failure probability assessment in control room simulators. *Reliability Engineering and System Safety*, *251*. https://doi.org/10.1016/j.ress.2024.110390

Porthin Markus, Liinasuo Marja, & Terhi Kling. (2016). *HRA of digital control rooms – Literature review*.

Pranesh, V., Palanichamy, K., Saidat, O., & Peter, N. (2017). Lack of dynamic leadership skills and human failure contribution analysis to manage risk in deep water horizon oil platform. *Safety Science*, *92*, 85–93. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.09.013

Proctor, & Zandt. (2008). *Human Factors in Simple and Complex Systems Second Edition Proctor/Human Factors in Simple and Complex Systems ER411X_C000 Final Proof page i 24.3.2008 4:56pm Compositor Name: VBalamugundan*.

Ramezanifar, S., Ramezanifar, E., Salehi Sahlabadi, A., & Sahlabadi, A. S. (2022). *Investigating the probability of human error in Iran's industrial control rooms-A systematic review IJOH INTERNATIONAL JOURNAL OF OCCUPATIONAL HYGIENE*. http://ijoh.tums.ac.ir

Rasmussen, J. (1982). Human errors. A taxonomy for describing human malfunction in industrial installations. *Journal of Occupational Accidents*, *4*(2–4), 311–333. https://doi.org/10.1016/0376-6349(82)90041-4

Rasmussen Skogstad, M., Boring, R., & Hayes, J. (2024a). Challenges in Applying Human Reliability Analysis in Systems Containing Artificial Intelligence. *Human Error, Reliability, Resilience, and Performance*, *132*. https://doi.org/10.54941/ahfe1004875

Rasmussen Skogstad, M., Boring, R., & Hayes, J. (2024b). Challenges in Applying Human Reliability Analysis in Systems Containing Artificial Intelligence. *Human Error, Reliability, Resilience, and Performance*, *132*. https://doi.org/10.54941/ahfe1004875

Reason, J. (2000). Education and debate Human error: models and management. In *BMJ* (Vol. 320). www.bmj.com

Reason, J. (2009). *Human Error*.

Rusnock, C. F., & Borghetti, B. J. (2016). *Workload Profiles: A Continuous Measure of Mental Workload*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169814116301287

Selvik, J. T., & Bellamy, L. J. (2020). Addressing human error when collecting failure cause information in the oil and gas industry: A review of ISO 14224:2016. In *Reliability Engineering and System Safety* (Vol. 194). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.03.025

Shaik, S. (2024). Significance of Human factors in Aviation Maintenance. *Journal of Engineering and Applied Sciences Technology*, 1–2. https://doi.org/10.47363/JEAST/2024(6)E118

Shirali, G. A., Hosseinzadeh, T., Ahamadi angali, K., & Rostam Niakan Kalhori, S. (2019). Modifying a method for human reliability assessment based on CREAM-BN: A case study in control room of a petrochemical plant. *MethodsX*, *6*, 300–315. https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.02.008

Shirali, G. A., Motamedzade, M., & Mohammadfam, I. (2019). Cognitive Reliability and Error Analysis Method (CREAM) Bayesian Network for human reliability assessment in petrochemical control room. *Quality and Reliability Engineering International*, *35*(8), 2545–2561. https://doi.org/10.1002/qre.2482

Shokria, S., Varmazyar, S., & Heydari, P. (2016). A cognitive human error analysis with CREAM in control room of petrochemical industry. *Biotechnology and Health …*. https://www.researchgate.net/profile/Sakineh-Varmazyar/publication/309274348_A_cognitive_Human_Error_Analysis_with_CREAM_in_Control_Room_of_Petrochemical_Industry/links/582d79e708aef19cb812dbce/A-cognitive-Human-Error-Analysis-with-CREAM-in-Control-Room-of-Petrochemical-Industry.pdf

Swain, A. D., & Guttmann, H. E. (1983). *Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications Final Report*.

Tropschuh, B., Brunner, S., Dillinger, F., & Hagemann, F. (2022). An Approach to Analyze Human-caused Work Errors. *Procedia CIRP*, *106*, 9–14. https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.147

Ullagaddi, P. (2024). Leveraging Digital Transformation for Enhanced Risk Mitigation and Compliance in Pharma Manufacturing. *Journal of Advances in Medical and Pharmaceutical Sciences*, *26*(6), 75–86. https://doi.org/10.9734/jamps/2024/v26i6697

Velmurugan, K., Saravanasankar, S., Venkumar, P., Sudhakarapandian, R., & Bona, G. Di. (2022). Hybrid fuzzy AHP-TOPSIS framework on human error factor analysis: Implications to developing optimal maintenance management system in the SMEs. *Sustainable Futures*, *4*. https://doi.org/10.1016/j.sftr.2022.100087

Whaley, A. M., Kelly, D. L., Boring, R. L., & Galyean, W. J. (2011). *SPAR-H Step-by-Step Guidance*. http://www.inl.gov

Wickens, C. D. (2002). Multiple resources and performance prediction. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, *3*(2), 159–177. https://doi.org/10.1080/14639220210123806

Wickens, C. D., Vidulich, M., & Sandry-Garza, D. (1984). Principles of S-C-R Compatibility with Spatial and Verbal Tasks: The Role of Display-Control Location and Voice-Interactive Display-Control Interfacing. *Human Factors*, *26*(5), 533–543. https://doi.org/10.1177/001872088402600505

Xu, X. G., Li, M., & Chen, J. (2024). An integrated CREAM under probabilistic linguistic environment: consensus model for human reliability analysis. *Systems*, *12*(3). https://doi.org/10.3390/systems12030125

Yalçın, E., Altun Ciftcioglu, G., & Güzel, B. (2024). Human reliability analysis methods. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, *30*(2), 282–292. https://doi.org/10.5505/pajes.2023.33958

Yang, S., Demichela, M., Geng, J., Wang, L., & Ling, Z. (2024). A data-driven Bayesian network of management and organizational factors for human reliability analysis in the process industry. *Heliyon*, *10*(15). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35048

Zaker Hossein, A. R., Sayadi, A. R., Javad Rahimdel, M., & Reza Moradi, M. (2024). Human reliability analysis in maintenance and repair operations of mining trucks: A Bayesian network approach. *Heliyon*, *10*(15). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34765

Zhang, X., Yan, S., & Liu, X. (2024). Extended cognitive reliability and error analysis method for advanced control rooms of nuclear power plants. *Nuclear Engineering and Technology*, *56*(9), 3472–3482. https://doi.org/10.1016/j.net.2024.03.044

Zhang, X., Zhang, W., & Li, X. (2024). Extended CREAM for more accurate human error probability. *Reliability Engineering & System Safety*. https://doi.org/10.1016/j.ress.2024.110605

Zheng, X., Bolton, M. L., Daly, C., & Biltekoff, E. (2020). The development of a next-generation human reliability analysis: Systems analysis for formal pharmaceutical human reliability (SAFPH[Formula presented]). *Reliability Engineering and System Safety*, *202*. https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.106927

Zou, Y., Zhang, L., Dai, L., Li, P., & Qing, T. (2017). Human Reliability Analysis for Digitized Nuclear Power Plants: Case Study on the LingAo II Nuclear

Power Plant. *Nuclear Engineering and Technology*, *49*(2), 335–341. https://doi.org/10.1016/j.net.2017.01.011

Żywiec, J., & Tchórzewska-Cieślak, B. (2020). Use of the CREAM Method for the Assessment of Operator Reliability in the Process of Backwashing Filters at a Water Treatment Station. *Journal of KONBiN*, *50*(3), 115–133. https://doi.org/10.2478/jok-2020-0053